ИД «Академия Естествознания»

СОВРЕМЕННЫЕ НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

№ 6 2026

MODERN HIGH TECHNOLOGIES

Scientific journal

No. 6 2026

PH Academy of Natural History

Современные наукоемкие технологии
Научный журнал

Журнал издается с 2003 года.
Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. **Свидетельство – ПИ № ФС 77-63399** от 16.10.2015.
«Современные наукоемкие технологии» – рецензируемый научный журнал, в котором публикуются статьи, обладающие научной новизной, представляющие собой результаты завершенных исследований, проблемного или научно-практического характера, научные обзоры.
Журнал включен в действующий Перечень рецензируемых научных изданий (**ВАК РФ**). **К1**.
Журнал ориентируется на ученых, преподавателей, инженерно-технических специалистов, сотрудников информационных технологий и информатики, использующих в своих исследованиях междисциплинарный подход. Авторы журнала уделяют особое внимание методологии преподавания технических дисциплин.
Основные научные направления: 1.2. Компьютерные науки и информатика, 2.3. Информационные технологии и телекоммуникации, 2.5. Машиностроение, 5.8. Педагогика.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
Ледванов Михаил Юрьевич, д.м.н., профессор

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ
Бизенкова Мария Николаевна, к.м.н.

Технический редактор
Доронкина Е. Н.

Корректор
Галенкина Е. С.,
Дудкина Н. А.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.х.н. к.ф.-м.н., проф. ***Алоев В. З.*** (Нальчик); д.т.н., проф. ***Ахтулов А. Л.*** (Омск); д.т.н., проф. ***Баёв А. С.*** (Санкт-Петербург); д.п.н., к.х.н., проф. ***Безрукова Н. П.*** (Красноярск); д.п.н., доцент ***Бобыкина И. А.*** (Челябинск); д.г.-м.н. к.т.н., проф. ***Бондарев В. И.*** (Екатеринбург); д.псх.н., проф. ***Долгова В. И.*** (Челябинск); д.т.н., доцент ***Дубровин А. С.*** (Воронеж); д.п.н., доцент ***Евтушенко И. В.*** (Москва); д.п.н. к.ф.-м.н., проф. ***Ефремова Н. Ф.*** (Ростов-на-Дону); д.т.н., проф. ***Иванова Г. С.*** (Москва); д.т.н., проф. ***Калмыков И. А.*** (Ставрополь); д.ф.-м.н. ***Катаева Л. Ю.*** (Нижний Новгород); д.псх.н. к.п.н., доцент ***Кибальченко И. А.*** (Таганрог); д.п.н., к.т.н., проф. ***Козлов О. А.*** (Москва); д.т.н., проф. ***Козлов А. М.*** (Липецк); д.т.н., профессор ***Козловский В. Н.*** (Самара); д.т.н., доцент ***Красновский А. Н.*** (Москва); д.т.н., доцент ***Кузяков О. Н.*** (Тюмень); д.п.н., проф. ***Куликовская И. Э.*** (Ростов-на-Дону); д.ф.-м.н., доцент ***Ломазов В. А.*** (Белгород); д.т.н., доцент ***Лубенцов В. Ф.*** (Краснодар); д.т.н., проф. ***Мадера А. Г.*** (Москва); д.п.н., к.филос.н., проф. ***Матис В. И.*** (Барнаул); д.п.н., проф. ***Микерова Г. Ж.*** (Краснодар); д.т.н., к.ф.-м.н. ***Мишин В. М.*** (Ставрополь); д.п.н., к.б.н., проф. ***Моисеева Л. В.*** (Екатеринбург); д.т.н., проф. ***Мурашкина Т. И.*** (Пенза); д.т.н., проф. ***Надеждин Е. Н.*** (Москва); д.ф.-м.н., проф. ***Никонов Э. Г.*** (Дубна); д.т.н., проф. ***Осипов Г. С.*** (Южно-Сахалинск); д.т.н., проф. ***Пивень В. В.*** (Тюмень); д.т.н. ***Попок В. Н.*** (Москва); д.п.н., проф. ***Рахимбаева И. Э.*** (Саратов); д.т.н., проф. ***Рогачев А. Ф.*** (Волгоград); д.т.н., проф. ***Сердобинцев Ю. П.*** (Волгоград); д.э.н., проф. ***Сихимбаев М. Р.*** (Караганда); д.т.н., проф. ***Скрыпник О. Н.*** (Беларусь, Минский район, агрогородок Колодищи); д.п.н., проф. ***Собянин Ф. И.*** (Белгород); д.т.н., проф. ***Страбыкин Д. А.*** (Киров); д.т.н., проф. ***Сугак Е. В.*** (Красноярск); д.п.н., проф. ***Ульянова И. В.*** (Москва); к.т.н., доцент ***Хайдаров А. Г.*** (Санкт-Петербург); д.п.н., проф. ***Хода Л. Д.*** (Нерюнгри); д.т.н., проф. ***Часовских В. П.*** (Екатеринбург); д.т.н., проф. ***Ченцов С. В.*** (Красноярск); д.ф.-м.н., проф. ***Ширапов Д. Ш.*** (Улан-Удэ); д.т.н., проф. ***Шишков В. А.*** (Самара)

ISSN 1812–7320
Электронная версия: top-technologies.ru/ru
Правила для авторов: top-technologies.ru/ru/rules/index
Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 1,279
Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,523

Периодичность	12 номеров в год		
Учредитель, издатель и редакция	ООО ИД «Академия Естествознания»		
Почтовый адрес	105037, г. Москва, а/я 47		
Адрес редакции и издателя	440026, обл. Пензенская, г. Пенза, ул. Московская, влд. 27		
Типография	ООО «НИЦ Академия Естествознания» 410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, 5		
E-mail	edition@rae.ru	**Телефон**	+7 (499) 705-72-30
Подписано в печать	30.06.2026	**Дата выхода номера**	30.07.2026
Формат	60x90 1/8	**Усл. печ. л.**	40,5
Тираж	1000 экз.	**Заказ**	СНТ 2026/6

Распространяется по свободной цене
© ООО ИД «Академия Естествознания»

Modern high technologies
Scientific journal

The journal has been published since 2003.
The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications. **Certificate – PI No. FS 77-63399** dated October 16, 2015.
"Modern high technologies" is a peer-reviewed scientific journal that publishes articles with scientific novelty, representing the results of completed research, problematic or scientific-practical character, scientific reviews.
The journal is included in the current List of peer-reviewed scientific publications (**HCC RF**). **К1**.
The journal is oriented to scientists, teachers, engineering and technical specialists, employees of information technology and computer science, using an interdisciplinary approach in their research. The authors of the journal pay special attention to the methodology of teaching technical disciplines.
Main scientific directions: 1.2. Computer Science and Informatics, 2.3. Information technologies and telecommunications, 2.5. Engineering, 5.8. Pedagogy.

CHIEF EDITOR
Ledvanov Mikhail Yurievich, Dr. Sci. (Medical), Prof.

EXECUTIVE SECRETARY
Bizenkova Maria Nikolaevna, Cand. Sci. (Medical)

Technical editor
Doronkina E. N.

Corrector
Galenkina E. S.,
Dudkina N. A.

EDITORIAL BOARD

D.Sc., C.Sc., Prof. ***Aloev V. Z.*** (Nalchik); D.Sc., Prof. ***Akhtulov A. L.*** (Omsk); D.Sc., Prof. ***Bajov A. S.*** (St. Petersburg); D.Sc., C.Sc., Prof. ***Bezrukova N. P.*** (Krasnoyarsk); D.Sc., Docent ***Bobykina I. A.*** (Chelyabinsk); D.Sc., Prof. ***Bondarev V. I.*** (Ekaterinburg); D.Sc., Prof. ***Dolgova V. I.*** (Chelyabinsk); D.Sc., Prof. ***Dubrovin A. S.*** (Voronezh); D.Sc., Docent ***Evtushenko I. V.*** (Moscow); D.Sc., C.Sc., Prof. ***Efremova N. F.*** (Rostov-on-Don); D.Sc. ***Ivanova G. S.*** (Moscow); D.Sc., Prof. ***Kalmykov I. A.*** (Stavropol); D.Sc. ***Katayeva L. Yu.*** (Nizhny Novgorod); D.Sc C.Sc., Docent ***Kibalchenko I. A.*** (Taganrog); D.Sc., C.Sc., Prof. ***Kozlov O. A.*** (Moscow); D.Sc., Prof. ***Kozlov A. M.*** (Lipetsk); D.Sc., Prof. ***Kozlovsky V. N.*** (Samara); D.Sc. ***Krasnovsky A. N.*** (Moscow); D.Sc., Docent ***Kuzyakov O. N.*** (Tyumen); D.Sc., Prof. ***Kulikovskaya I. E.*** (Rostov-on-Don); D.Sc., Docent ***Lomazov V. A.*** (Belgorod); D.Sc., Docent ***Lubentsov V. F.*** (Krasnodar); D.Sc., Prof. ***Madera A. G.*** (Moscow); D.Sc. C.Sc., Prof. ***Matis V. I.*** (Barnaul); D.Sc., Prof. ***Mikerova G. J.*** (Krasnodar); D.Sc., C.Sc. ***Mishin V. M.*** (Stavropol); D.Sc., C.Sc., Prof. ***Moiseeva L. V.*** (Ekaterinburg); D.Sc., Prof. ***Murashkina T. I.*** (Penza); D.Sc., Prof. ***Nadezhdin E. N.*** (Moscow); D.Sc., Prof. ***Nikonov E. G.*** (Dubna); D.Sc., Prof. ***Osipov G. S.*** (Yuzhno-Sakhalinsk); D.Sc., Prof. ***Piven V. V.*** (Tyumen); D.Sc., D.Sc. ***Popok V. N.*** (Moscow); D.Sc., Prof. ***Rakhimbaeva I. E.*** (Saratov); D.Sc., Prof. ***Rogachev A. F.*** (Volgograd); D.Sc., Prof. ***Serdobintsev Yu. P.*** (Volgograd); D.Sc., Prof. ***Sikhimbaev M. R.*** (Karaganda); D.Sc., Prof. ***Skrypnik O. N.*** (Belarus, Minsk District, Kolodishchi agricultural town); D.Sc., Prof. ***Sobyanin F. I.*** (Belgorod); D.Sc., Prof. ***Strabykin D. A.*** (Kirov); D.Sc., Prof. ***Sugak E. V.*** (Krasnoyarsk); D.Sc., Prof. ***Ulyanova I. V.*** (Moscow); C.Sc., Docent ***Khaidarov A. G.*** (St.-Petersburg); D.Sc., Prof. ***Khoda L. D.*** (Neryungri); D.Sc., Prof. ***Chasovskikh V. P.*** (Ekaterinburg); D.Sc., Prof. ***Chentsov S. V.*** (Krasnoyarsk); D.Sc., Prof. ***Shirapov D. Sh.*** (Ulan-Ude); D.Sc. ***Shishkov V. A.*** (Samara)

ISSN 1812–7320
Electronic version: top-technologies.ru/ru
Rules for authors: top-technologies.ru/ru/rules/index
Impact-factor RISQ (two-year) = 1,279
Impact-factor RISQ (five-year) = 0,523

Periodicity	12 issues per year		
Founder, publisher and editors	LLC PH Academy of Natural History		
Mailing address	105037, Moscow, p.o. box 47		
Editorial and publisher address	440026, Penza region, Penza, Moskovskaya st., bldg. 27		
Printing	LLC SPC Academy of Natural History 410035, Saratov, st. Mamontova, 5		
E-mail	edition@rae.ru	**Telephone**	+7 (499) 705-72-30
Signed for print	30.06.2026	**Number issue date**	30.07.2026
Format	60x90 1/8	**Conditionally printed sheets**	40,5
Circulation	1000 copies	**Order**	CHT 2026/6

Distribution at a free price
© LLC PH Academy of Natural History

СОДЕРЖАНИЕ

Технические науки (1.2.2, 2.3.3, 2.3.4, 2.3.5, 2.5.3, 2.5.5, 2.5.7, 2.5.8)

СТАТЬИ

МЕТОД СНИЖЕНИЯ КОНТЕКСТНОГО ПЕРЕПОЛНЕНИЯ В АДАПТИВНЫХ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ КОНВЕЙЕРАХ НА ОСНОВЕ СУММАРИЗАЦИИ КОНТЕКСТА НА ГИПЕРРЁБРАХ

Алпатов А. Н. 12

МЕТОД АДАПТИВНОГО КОНСИСТЕНТНОГО ХЕШИРОВАНИЯ С БЮДЖЕТНЫМ ОГРАНИЧЕНИЕМ СТОИМОСТИ ПЕРЕСТРОЙКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ

Батанов А. О., Болбаков Р. Г. 23

АЛГОРИТМЫ БЕЗМАРКЕРНОГО ВИДЕОАНАЛИЗА БИОМЕХАНИКИ ХОДЬБЫ НА ОСНОВЕ ПЛАТФОРМЫ MEDIAPIPE: МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ АТТЕСТАЦИЯ И СОПОСТАВЛЕНИЕ С ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМ МАРКЕРНЫМ АНАЛИЗОМ

Батышева Т. Т., Тихонов С. В., Алексеева М. В., Климов Ю. А., Пеганский Д. А., Куликова О. М., Усачева Е. В. 33

НЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ СМЫСЛОВОГО ПРОСТРАНСТВА В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕОРИИ СЕМАНТИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Вишняков Ю. М., Вишняков Р. Ю. 45

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ УСЛОВНОГО ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТВЁРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Гатауллин А. М., Минкин А. С. 54

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕСТИРОВАНИЯ ГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА ANDROID-ПРИЛОЖЕНИЙ БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ ИСХОДНОГО КОДА С ВНЕДРЕНИЕМ ТЕСТОВОГО АГЕНТА

Голдышев Д. М., Фетисов М. В. 60

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕННОГО АБСОРБЕРА

Голодков Ю. Э., Голодкова А. В., Китаев А. В. 67

ПРИМЕНЕНИЕ СКРЫТЫХ МАРКОВСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЙ ТРЕХЭЛЕМЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

Даева С. Г. 75

МЕТОД БЫСТРЫХ РАЗЛОЖЕНИЙ В КОНТЕКСТЕ КЛАССИЧЕСКОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ В ПАРАДИГМЕ НЕЛОКАЛЬНОСТИ

Дубровин А. С., Сумин В. И., Кравченко А. С. 82

ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КИНЕТИКИ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В СПЕЧЕННОМ ДИФФУЗИОННО-ЛЕГИРОВАННОМ ПОРОШКОВОМ МАТЕРИАЛЕ Fe–Ni–Cu–Mo

Егоров М. С., Егорова Р. В., Жеволуков В. Е., Коробка И. О., Егоров А. М. 90

РЕЖИМНО-АДАПТИВНОЕ АРХИВИРОВАНИЕ ТЕЛЕМЕТРИИ ВИБРОДИАГНОСТИКИ НА ОСНОВЕ МЕРТВОЙ ЗОНЫ С СОХРАНЕНИЕМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И УМЕНЬШЕНИЕМ ОБЪЕМА ДАННЫХ

Журавлева М. О., Киселев Д. С., Зорина Н. В. *98*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ ВЕРИФИКАЦИИ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Зиновьев В. И., Ромашкова О. Н. *110*

ГРАНИЧНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ СТЕНКИ РЕАКТОРА ПИРОЛИЗА МЕТАНА

Колотилкина К. В. *117*

МЕТОД ПОДГОТОВКИ ПАТЕНТНОГО ЛАНДШАФТА В НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Королев М. К. *124*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВАКУАЦИИ ПЕШЕХОДНЫХ ПОТОКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Наумова Н. А., Чубырь Н. О. *132*

СРЕДНЕСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБЪЕМА ФИНАНСИРОВАНИЯ СОЦИАЛЬНОГО И ПЕНСИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Носков С. И., Медведев А. П. *142*

МУЛЬТИАГЕНТНЫЙ ПОДХОД К АВТОМАТИЗАЦИИ СКВОЗНОГО ПРОЦЕССА ОЦЕНКИ ДОРОЖНЫХ УСЛОВИЙ И РАСЧЕТА БЕЗОПАСНЫХ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ

Остроух А. В., Подберёзкин А. А., Пронин Ц. Б., Поспелов П. И., Котов А. А. *148*

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПАЦИЕНТОВ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ПСИХОЛОГИЧЕСКОМ КОНСУЛЬТИРОВАНИИ

Путинцева А. А., Андреева В. Д., Эбрахим А., Хасанов И. И. *156*

ДЕКОДИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИИ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ОБУЧАЮЩИХ СИСТЕМ: ОБЗОР ПОДХОДОВ И КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА «НЕЙРОТЬЮТОР»

Рак Д. В., Аникин А. В. *162*

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРУДОУСТРОЙСТВА ВЫПУСКНИКОВ ВУЗА НА ОСНОВЕ АКАДЕМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Ромащенко А. И., Харитонов И. М., Панфилов А. Э., Шеховцова Е. С., Огар Т. П. *170*

ВЕКТОРЫ РАЗВИТИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ: ПАТЕНТНЫЙ АНАЛИЗ АППАРАТНЫХ И ПРОГРАММНЫХ РЕШЕНИЙ

Сарайкин А. И. *176*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Сергеев Н. П. *182*

РАЗРАБОТКА СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОГО ОПЕРАТОРА ИНТЕРПОЛЯЦИИ ДЛЯ L-МАРКОВСКОГО ПРОЦЕССА

Фадеева Л. Ю., Титов А. Н. *187*

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА СОСТАВ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИПУСКА ПРИ ТОЧЕНИИ ЗАГОТОВКИ С УСИЛЕННЫМ СВАРНЫМ ШВОМ

Фоминов Е. В. *197*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НАХОЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЗАЯВОК СО СЛУЧАЙНЫМ ВРЕМЕНЕМ ЖИЗНИ

Шайдуллина Н. К., Нуриев Н. К., Печеный Е. А. *204*

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Сафин А. Р., Шакурова З. М., Шавалеев Б. Д. *210*

Педагогические науки (5.8.1, 5.8.2, 5.8.3, 5.8.7)

СТАТЬИ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АДАПТИВНЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ДЕТЕЙ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ ЗДОРОВЬЯ МЛАДШЕГО И СРЕДНЕГО ШКОЛЬНОГО ВОЗРАСТА

Азизова Л. Х., Гаджимагомедова Т. Г., Абдуллаева М. С. *217*

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ПОЛИТОЛОГИЧЕСКОМ ОБРАЗОВАНИИ: PROMPT-AUDIT КАК ТЕХНОЛОГИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ИИ-ГРАМОТНОСТИ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЙ СБАЛАНСИРОВАННОСТИ

Графин А. Д., Золин А. А., Шеховцов О. И. *223*

ОТ ЭКОПСИХОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОБЛЕМАТИКИ К ПРАКТИКЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЫ

Гришаева Ю. М., Усачева И. Н., Усачев А. В. *235*

ДИДАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЧАТ-БОТОВ В ЯЗЫКОВОМ ОБРАЗОВАНИИ

Демиденко К. А., Рольгайзер А. А. *242*

ТЕХНОЛОГИЯ ОБУЧЕНИЯ БУДУЩИХ ВРАЧЕЙ РЕШЕНИЮ КЛИНИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЗАДАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Диденко Г. А., Касюк С. Т., Степанова О. А. *247*

МНОГООБРАЗИЕ КАК СУЩНОСТНЫЙ ПРИЗНАК КРОСС-МНОГОМЕРНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА В СОВРЕМЕННОЙ ШКОЛЕ

Елистратова К. А. *253*

ВЗАИМОСВЯЗЬ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ И ПЕРСОНАЛОМ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Ермолина Л. В., Мельникова Д. А. *262*

ДИАГНОСТИКА АКТУАЛЬНОГО УРОВНЯ ПОНИМАНИЯ ОБУЧАЮЩИМИСЯ СОДЕРЖАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Каменева Ю. Ф. *269*

АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON

Козлов С. В., Быков А. А. *275*

СУЩНОСТЬ И СОДЕРЖАНИЕ МЕТАПРЕДМЕТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ АКТИВИЗАЦИИ ЯЗЫКОВОЙ КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ НА УРОКАХ РОДНОГО (ЯКУТСКОГО) ЯЗЫКА

Кондратьева С. А., Поликарпова Е. М. *281*

SUMMARY КАК ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ПРОФЕССИОНАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ ТЕКСТОВ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ РУССКИМИ И КИТАЙСКИМИ СТУДЕНТАМИ

Минина О. Г., Потемкина В. А. *287*

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СТУДЕНТОВ В MOODLE В КОНТЕКСТЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ

Потапов А. А., Зайнуллин Р. Р. *295*

ТРАДИЦИИ В КОНТЕКСТЕ ЭТНОПЕДАГОГИЧЕСКОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ВУЗА

Птицына Е. В., Березина Т. И., Федорова Е. Н. *301*

ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ И БЕЛАРУСИ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЫПУСКА СПЕЦИАЛИСТОВ И ПОТРЕБНОСТЕЙ ОТРАСЛИ

Рущицкая О. А., Куликова Е. С., Кружкова Т. И., Фетисова А. В. *307*

МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ БУДУЩИХ IT-СПЕЦИАЛИСТОВ

Швыров В. В., Суворова Е. Ю., Капустин Д. А. *312*

ФОРМИРОВАНИЕ УСПЕШНОСТИ УНИВЕРСИТЕТСКОГО ОБУЧЕНИЯ ИНОСТРАННЫХ ГРАЖДАН В СОВРЕМЕННЫХ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ: ОРГАНИЗАЦИОННО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ

Шимкович Е. Д. *319*

CONTENTS

Technical sciences (1.2.2, 2.3.3, 2.3.4, 2.3.5, 2.5.3, 2.5.5, 2.5.7, 2.5.8)

ARTICLES

REDUCING CONTEXT OVERFLOW IN ADAPTIVE MULTI-AGENT PIPELINES VIA HYPEREDGE-BASED CONTEXT SUMMARIZATION

Alpatov A. N. 12

ADAPTIVE CONSISTENT HASHING METHOD WITH BUDGETED REDISTRIBUTION COST CONSTRAINT

Batanov A. O., Bolbakov R. G. 23

ALGORITHMS FOR NON-MARKER VIDEO ANALYSIS OF WALKING BIOMECHANICS BASED ON THE MEDIAPIPE PLATFORM: METROLOGICAL CERTIFICATION AND COMPARISON WITH INSTRUMENTAL MARKER ANALYSIS

Batysheva T. T., Tikhonov S. V., Alekseeva M. V., Klimov Yu. A., Peganskiy D. A., Kulikova O. M., Usacheva E. V. 33

A FUZZY MODEL OF THE SEMANTIC SPACE IN THE COMPUTATIONAL THEORY OF SEMANTIC INTERPRETATION

Vishnyakov Yu. M., Vishnyakov R. Yu. 45

A MODEL FOR ESTIMATING THE CONDITIONAL RESIDUAL LIFE OF SOLID INSULATION BASED ON AMPLITUDE-PHASE DIAGRAMS OF PARTIAL DISCHARGES

Gataullin A. M., Minkin A. S. 54

METHOD FOR AUTOMATED GRAPHICAL INTERFACE TESTING OF ANDROID APPLICATIONS WITHOUT SOURCE CODE MODIFICATION THROUGH TEST AGENT INJECTION

Goldyshev D. M., Fetisov M. V. 60

A HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEM FOR AUTOMATED CONTROL AND MONITORING OF INDUSTRIAL AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF A FOAM ABSORBER

Golodkov Yu. E., Golodkova A. V., Kitaev A. V. 67

APPLICATION OF HIDDEN MARKOV MODELS TO STATE ANALYSIS OF A THREE-ELEMENT SYSTEM

Daeva S. G. 75

FAST EXPANSIONS METHOD IN THE CONTEXT OF CLASSICAL MATHEMATICAL PHYSICS IN THE PARADIGM OF NONLOCALITY

Dubrovin A. S., Sumin V. I., Kravchenko A. S. 82

HIGH-TECH METHODS OF CONTROLLED FRACTURE GROWTH KINETICS IN SINTERED DIFFUSION-ALLOYED POWDER MATERIAL Fe–Ni–Cu–Mo

Egorov M. S., Egorova R. V., Zhevolukov V. E., Korobka I. A., Egorov A. M. 90

REGIME-ADAPTIVE DEAD-ZONE-BASED ARCHIVING OF VIBRATION-DIAGNOSTIC TELEMETRY WITH PRESERVATION OF TRANSIENT PROCESSES AND REDUCED DATA VOLUME

Zhuravleva M. O., Kiselev D. S., Zorina N. V. *98*

MATHEMATICAL MODELING OF HYBRID VERIFICATION FOR INTELLIGENT DECISION SUPPORT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS

Zinovev V. I., Romashkova O. N. *110*

BOUNDARY METHOD FOR ANALYSIS OF THE THERMAL STATE OF A METHANE PYROLYSIS REACTOR WALL

Kolotilkina K. V. *117*

METHOD FOR PATENT LANDSCAPE PREPARATION IN A RESEARCH ORGANIZATION

Korolev M. K. *124*

SIMULATION OF PEDESTRIAN EVACUATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Naumova N. A., Chubyr N. O. *132*

MEDIUM-TERM FORECASTING OF SOCIAL AND PENSION FINANCING

Noskov S. I., Medvedev A. P. *142*

MULTI-AGENT APPROACH TO AUTOMATING THE END-TO-END PROCESS OF ROAD CONDITION ASSESSMENT AND SAFE SPEED CALCULATION

Ostroukh A. V., Podberezkin A. A., Pronin Ts. B., Pospelov P. I., Kotov A. A. *148*

APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS TO ASSESS THE EMOTIONAL STATE OF PATIENTS IN REMOTE PSYCHOLOGICAL COUNSELING

Putintseva A. A., Andreeva V. D., Ebrakhim A., Khasanov I. I. *156*

EEG SIGNAL DECODING FOR INTELLIGENT TUTORING SYSTEMS: A REVIEW OF APPROACHES AND THE “NEUROTUTOR” CONCEPTUAL ARCHITECTURE

Rak D. V., Anikin A. V. *162*

THE USE OF REGRESSION ANALYSIS TO PREDICT THE EMPLOYMENT OF UNIVERSITY GRADUATES BASED ON ACADEMIC INDICATORS

Romaschenko A. I., Kharitonov I. M., Panfilov A. E., Shekhovtsova E. S., Ogar T. P. *170*

VECTORS OF DEVELOPMENT OF PARALLEL DATA PROCESSING: PATENT ANALYSIS OF HARDWARE AND SOFTWARE SOLUTIONS

Saraykin A. I. *176*

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROBLEM OF ENSURING SECURITY BASED ON A MODIFIED GENETIC ALGORITHM

Sergeev N. P. *182*

DEVELOPMENT OF A STOCHASTIC MODEL OF THE OPTIMAL INTERPOLATION OPERATOR FOR THE L-MARKOV PROCESS

Fadeeva L. Yu., Titov A. N. *187*

THE INFLUENCE OF THE TECHNOLOGICAL SYSTEM' GEOMETRIC PARAMETERS ON THE COMBINED ALLOWANCE COMPOSITION WHEN TURNING TO A WORKPIECE WITH A REINFORCED WELD

Fominov E. V. 197

MATHEMATICAL MODELING AND SOLUTION TO THE PROBLEM OF FINDING THE CHARACTERISTICS OF A QUEUE SERVICE SYSTEM WITH A RANDOM LIFETIME

Shaydullina N. K., Nuriev N. K., Pechenyy E. A. 204

REVIEW

ALTERNATIVE MAGNETIC MATERIALS AND MOTORS FOR ELECTRIC DRIVES

Safin A. R., Shakurova Z. M., Shavaleev B. D. 210

Pedagogical sciences (5.8.1, 5.8.2, 5.8.3, 5.8.7)

ARTICLES

COMPARATIVE ANALYSIS OF ADAPTIVE EDUCATIONAL TECHNOLOGIES FOR CHILDREN WITH DISABILITIES OF PRIMARY AND SECONDARY SCHOOL AGE

Azizova L. Kh., Gadzhimagomedova T. G., Abdullaeva M. S. 217

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN POLITICAL SCIENCE EDUCATION: PROMPT-AUDIT AS A TECHNOLOGY OF CRITICAL AI LITERACY AND METHODOLOGICAL BALANCE

Grafin A. D., Zolin A. A., Shekhovtsov O. I. 223

FROM ECOPSYCHOLOGICAL ISSUES TO THE PRACTICE OF FORMING AN ECOLOGICAL CULTURE

Grishaeva Yu. M., Usacheva I. N., Usachev A. V. 235

DIDACTIC ASPECTS OF USING CHATBOTS IN TEACHING FOREIGN LANGUAGES

Demidenko K. A., Rolgayzer A. A. 242

A PEDAGOGICAL APPROACH TO TRAINING MEDICAL STUDENTS IN CLINICAL PROBLEM-SOLVING USING MACHINE LEARNING

Didenko G. A., Kasyuk S. T., Stepanova O. A. 247

DIVERSITY AS AN ESSENTIAL FEATURE OF THE CROSS-MULTIDIMENSIONAL EDUCATIONAL PROCESS IN A MODERN SCHOOL

Elistratova K. A. 253

INTERRELATION OF PRODUCTION PROCESS AND PERSONNEL MANAGEMENT SYSTEMS IN THE CONTEXT OF DIGITAL TRANSFORMATION OF MODERN ENTERPRISES

Ermolina L. V., Melnikova D. A. 262

ASSESSING THE CURRENT LEVEL OF STUDENT UNDERSTANDING OF THE CONTENT OF BIOLOGICAL MATERIAL

Kameneva Yu. F. 269

ANALYZING INFORMATION MODELS USING THE PYTHON PROGRAMMING LANGUAGE

Kozlov S. V., BykovA. A. *275*

THE ESSENCE AND CONTENT OF META-SUBJECT TECHNOLOGY FOR ACTIVATING STUDENTS' LANGUAGE COMPETENCE IN THEIR NATIVE (YAKUT) LANGUAGE LESSONS

Kondrateva S. A., Polikarpova E. M. *281*

SUMMARY AS A TECHNOLOGY TO CREATE SECONDARY PROFESSIONALLY ORIENTED TEXTS IN ENGLISH BY RUSSIAN AND CHINESE STUDENTS

Minina O. G., Potemkina V. A. *287*

ORGANIZATION OF STUDENTS' PROJECT ACTIVITIES IN MOODLE IN THE CONTEXT OF AN INDIVIDUAL EDUCATIONAL TRAJECTORY

Potapov A. A., Zaynullin R. R. *295*

TRADITIONS IN THE CONTEXT OF THE ETHNO-PEDAGOGICAL ORIENTATION OF THE UNIVERSITY EDUCATIONAL PROCESS

Ptitsyna E. V., Berezina T. I., Fedorova E. N. *301*

EDUCATIONAL SUPPORT FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX OF RUSSIA AND BELARUS: A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PRODUCTION OF SPECIALISTS AND THE NEEDS OF THE INDUSTRY

Ruschitskaya O. A., Kulikova E. S., Kruzhkova T. I., Fetisova A. V. *307*

METHODOLOGY FOR USING INTELLIGENT SYSTEMS TO FORM INDIVIDUAL EDUCATIONAL TRAJECTORIES OF FUTURE IT SPECIALISTS

Shvyrov V. V., Suvorova E. Yu., Kapustin D. A. *312*

FORMATION OF SUCCESS IN UNIVERSITY EDUCATION OF FOREIGN CITIZENS IN MODERN SOCIO-ECONOMIC CONDITIONS: ORGANIZATIONAL AND PEDAGOGICAL MECHANISMS

Shimkovich E. D. *319*

СТАТЬИ

УДК 004.42
DOI 10.17513/snt.40812

CC BY 4.0

МЕТОД СНИЖЕНИЯ КОНТЕКСТНОГО ПЕРЕПОЛНЕНИЯ В АДАПТИВНЫХ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ КОНВЕЙЕРАХ НА ОСНОВЕ СУММАРИЗАЦИИ КОНТЕКСТА НА ГИПЕРРЁБРАХ

Алпатов А. Н. ORCID ID 0000-0001-8624-1662

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Российская Федерация, e-mail: aleksej01-91@mail.ru

Рост сложности распределённых конвейеров, а также развитие мультиагентных адаптивных самоорганизующихся распределённых конвейеров обработки данных и расширение спектра используемых протоколов взаимодействия порождают проблему контекстного переполнения, при котором объём передаваемых между агентами данных превышает практические ограничения контекстного окна и пропускной способности. Целью исследования является разработка метода снижения контекстного переполнения в таких конвейерах, обеспечивающего ограниченность объёма локального контекста на каждом узле в условиях динамически перестраиваемой топологии и гетерогенности протоколов взаимодействия. В качестве методологической основы использованы принципы формализации распределённых систем, теория гиперграфов, а также методы математического моделирования динамических систем. В работе адаптивный мультиагентный конвейер описан как временной гиперграф, а накопление контекста представлено двухуровневой моделью состояния узла. В работе представлен метод адаптивной суммаризации контекста, реализуемый на уровне гиперрёбер временного гиперграфа в виде промежуточного программного слоя. Ключевым элементом данного подхода является перенос логики редукции на уровень гиперребра, что обеспечивает детерминированную обработку контекста на промежуточном слое и позволяет реализовать совмещённый реактивный и проактивный режимы сжатия контекста. Сформулированы и доказаны утверждения об устойчивости и ограниченности локального контекста при срабатывании детектора, что определяет условия предотвращения переполнения. Сделан вывод о том, что предложенный подход обеспечивает ограниченность объёма контекста, предотвращает накопление ошибок в циклических взаимодействиях и позволяет повысить масштабируемость распределённых конвейеров без модификации протоколов интеграции агентов.

Ключевые слова: мультиагентные системы, адаптивные вычислительные конвейеры, самоорганизующиеся распределённые системы, контекстное переполнение, временной гиперграф

REDUCING CONTEXT OVERFLOW IN ADAPTIVE MULTI-AGENT PIPELINES VIA HYPEREDGE-BASED CONTEXT SUMMARIZATION

Alpatov A. N. ORCID ID 0000-0001-8624-1662

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «MIREA – Russian Technological University», Moscow, Russian Federation, e-mail: aleksej01-91@mail.ru

The increasing complexity of distributed pipelines, along with the development of multi-agent adaptive self-organizing distributed data processing pipelines and the expansion of the range of interaction protocols, leads to the problem of context overflow, in which the volume of data exchanged between agents exceeds the practical limits of context windows and bandwidth capacity. The objective of this study is to develop a method for reducing context overflow in such pipelines, ensuring bounded local context at each node under conditions of dynamically reconfigurable topology and heterogeneous interaction protocols. The methodological foundation of this work is based on principles of distributed systems formalization, hypergraph theory, and mathematical modeling of dynamic systems. In this work, the adaptive multi-agent pipeline is described as a temporal hypergraph, while context accumulation is represented by a two-level node state model. This paper presents a method for adaptive context summarization implemented at the level of hyperedges of a temporal hypergraph in the form of an intermediate software layer. A key element of the proposed approach is the relocation of reduction logic to the hyperedge level, which enables deterministic context processing within the intermediate layer and supports the combined use of reactive and proactive context compression modes. Formal statements on the stability and boundedness of local context under detector activation are formulated and proven, defining the conditions for overflow prevention. It is concluded that the proposed approach ensures bounded context size, prevents error accumulation in cyclic interactions, and improves the scalability of distributed pipelines without requiring modifications to agent integration protocols.

Keywords: multi-agent systems, adaptive computational pipelines, self-organizing distributed systems, context overflow, temporal hypergraph

Введение

Многие современные вычислительные конвейеры обработки данных в настоящее время вышли за рамки традиционных ETL (англ. Extract, Transform, Load) конвейеров, которые строились на жёсткой фиксации логики и схем взаимодействия внутри конвейера и являлись, фактически, стандартом промышленной аналитики. Это связано с тем, что традиционные ETL-конвейеры представляют собой статичные ориентированные ациклические графы задач и по своей природе не являются очень гибкими, что проявляется в случаях, когда любое изменение бизнес-требований требует переписывания кода, пересмотра схем взаимодействия и повторного развёртывания в продакшен-среде, а это требует значительных финансовых и временных расходов. В результате им на смену приходят более адаптивные мультиагентные самоорганизующиеся распределённые конвейеры, в которых вся логика обработки данных формируется на лету в режиме реального времени, исходя из контекста конкретной задачи, требуемых условий выполнения и других ограничений и условий. В основе таких реализаций конвейеров находятся автономные агенты, которые умеют самостоятельно разбирать неструктурированные запросы на естественном языке, поступающие на вход конвейера, а также самостоятельно координироваться друг с другом при решении сложных многоэтапных задач, что приводит к фактическому перестроению топологии конвейера в реальном времени. Иными словами, конвейеры переходят от жёсткой заранее запрограммированной последовательности шагов к самоорганизующимся, основанным на намерениях (англ. Intent-driven design) сценариям и целеориентированной архитектуре.

На практике для интеграции агентов между собой и с внешними инструментами используются специализированные протоколы, в частности Model Context Protocol (англ. MCP) [1; 2]. Подходы к межагентному взаимодействию подробно рассматриваются в работах [3; 4], где описываются A2A (англ. Agent-to-Agent) интерфейсы. В качестве инструментальной реализации также часто применяются фреймворки агентной коммуникации, например LangGraph [5]. Подобные решения резко снижают сложность реализации, что упрощает создание сложных мультиагентных систем. Например, распространённый в разработке протокол MCP за счёт стандартизации интерфейса превращает разрозненные API, базы данных, сторонние сервисы и службы в унифицированные контекстные серверы. Согласно текущей спецификации [2], технически это реализуется за счёт создания легковесного процесса, который может представлять собой как обычный исполняемый бинарный файл, так и легковесный контейнер, на стороне источника данных, который экспонирует возможности источника через три унифицированных примитива протокола MCP: «Инструменты» (англ. Tools), «Ресурсы» (англ. Resources) и «Инструкции» (англ. Prompts), описывающих, соответственно, исполняемые функции, ссылки на содержимое (через URI) и параметризованные шаблоны инструкций. Вызовы инструментов осуществляются через JSON-RPC, а описания передаются агенту в формате JSON Schema [2].

Такая схема интеграции приводит к тому, что любой агент в вычислительном конвейере подключается через единую унифицированную среду. Однако такое упрощение интеграции может приводить к резкому росту объёма контекстной информации, необходимой для корректной обработки потоков данных, тогда как архитектурные ограничения систем остаются в значительной мере статичными. Данная проблема усугубляется также гетерогенностью современных вычислительных конвейеров, многие из них одновременно обрабатывают потоки событий, пакетные задания, а также запросы реального времени, каждый из которых предъявляет принципиально разные требования к управлению контекстом.

Здесь важно отметить, что данная проблема проявляется по-разному и на разных уровнях в зависимости от уровня архитектуры вычислительного конвейера. Так, в вычислительных конвейерах на основе NLP-моделей контекстное переполнение проявляется как некоторая деградация семантической согласованности и характеризуется тем, что по мере роста контекстного окна точность рассуждений агента снижается нелинейно, так как модель показывает свои лучшие результаты, когда релевантная информация находится в самом начале или конце длинного запроса к модели [6]. А в рамках современных потоковых распределённых систем, реализованных, например, с использованием методологии Prompt2DAG [7] или иных подходов, данная проблема принимает уже форму переполнения буферов операторов и деградации пропускной способности, то есть той ситуации, когда скорость поступления данных превышает скорость их потребления [8]. В случае же реализации гетерогенных конвейеров механизмы деградации часто действуют одновременно и взаимно усилива-

ют друг друга, что явно проявляется при росте числа подключённых MCP-серверов, это увеличивает объём JSON описаний инструментов в контексте каждого агента, тогда как накопление промежуточных результатов JSON-RPC вызовов дополнительно насыщает контекстное окно.

В связи с этим возникает необходимость разработки специализированного метода, который позволял бы эффективно управлять контекстом в условиях высокой динамики и самоорганизации, сохраняя при этом адаптивность и масштабируемость распределённой системы.

Цель исследования – разработка метода снижения контекстного переполнения в адаптивных мультиагентных самоорганизующихся распределённых конвейерах, обеспечивающего ограниченность объёма локального контекста на каждом узле в условиях динамически перестраиваемой топологии и гетерогенности протоколов взаимодействия. В основе предлагаемого подхода лежит размещение логики адаптивной суммаризации непосредственно на уровне гиперрёбер временного гиперграфа.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено в форме теоретико-прикладного анализа архитектур адаптивных мультиагентных самоорганизующихся распределённых вычислительных конвейеров и механизмов управления контекстным состоянием в условиях динамически изменяемой топологии. В качестве основного материала использованы формализованные модели вычислительных конвейеров, представленных в виде временных гиперграфов, а также описания протоколов взаимодействия агентов (MCP, A2A), спецификации форматов обмена данными (JSON-RPC, JSON Schema) и структур контекстных состояний агентов. Дополнительно рассмотрены архитектурные паттерны (централизованные, децентрализованные и гибридные конвейеры), а также экспериментальные схемы распространения и аккумуляции контекста в гиперграфовых моделях.

Методологической основой исследования послужили принципы формализации распределённых систем, теории графов и гиперграфов, а также методы математического моделирования динамических систем. В качестве метода решения поставленной задачи использован разработанный подход адаптивной прогнозирующей суммаризации контекста, реализуемый на уровне гиперрёбер временного гиперграфа. Архитектурная реализация предложенного решения рассматривается в рамках промежуточного слоя, интегрируемого в вычислительный конвейер. В качестве технологической основы предполагается использование распределённых сервисных архитектур с поддержкой REST/gRPC взаимодействия, контейнеризации и масштабируемых key-value хранилищ для поддержки таблицы состояний гиперрёбер.

Результаты исследования и их обсуждение

В отличие от традиционного подхода, при котором описанные выше формы контекстного переполнения рассматриваются независимо, в данной работе оно определяется как состояние конвейера, при котором объём накопленного контекстного состояния превышает допустимый предел его результативной обработки, что сопровождается монотонным ухудшением метрик производительности и/или семантической согласованности. Такая фиксация позволяет перейти от рассмотрения отдельных механизмов деградации к совокупному анализу архитектурных особенностей адаптивных мультиагентных самоорганизующих распределённых конвейеров. В связи с этим целесообразно рассмотреть разнообразие подходов к построению таких конвейеров, выделить их ключевые структурные и функциональные характеристики.

Как было отмечено выше, на практике выделяют большое количество подходов для реализации мультиагентных адаптивных самоорганизующихся распределённых конвейеров. В данной работе выделяются три основных класса архитектур, различающихся по степени децентрализации управления и механизмам формирования топологии.

Так, одним из распространённых архитектурных паттернов является конвейер с центральным оркестратором [9], в котором центральный агент-оркестратор управляет набором специализированных агентов-воркеров. На рисунке 1 показана реализация данного архитектурного паттерна.

При таком подходе топология конвейера формируется динамически, но под контролем единого центра принятия решений. Несмотря на широкое распространение такого рода решения, оно может приводить к потенциальному возникновения узкого места в архитектуре и повышать риск его контекстного переполнения при масштабировании числа агентов. Это связано с тем, что оркестратор в адаптивном конвейере получает результаты от всех агентов и передаёт их в следующую итерацию, и уже после нескольких итераций его контекст заполняется сырыми выводами агентов, цепочками рассуждений, историей вызовов инструментов.



Рис. 1. Мультиагентный адаптивный конвейер с центральным оркестратором
Источник: составлено автором

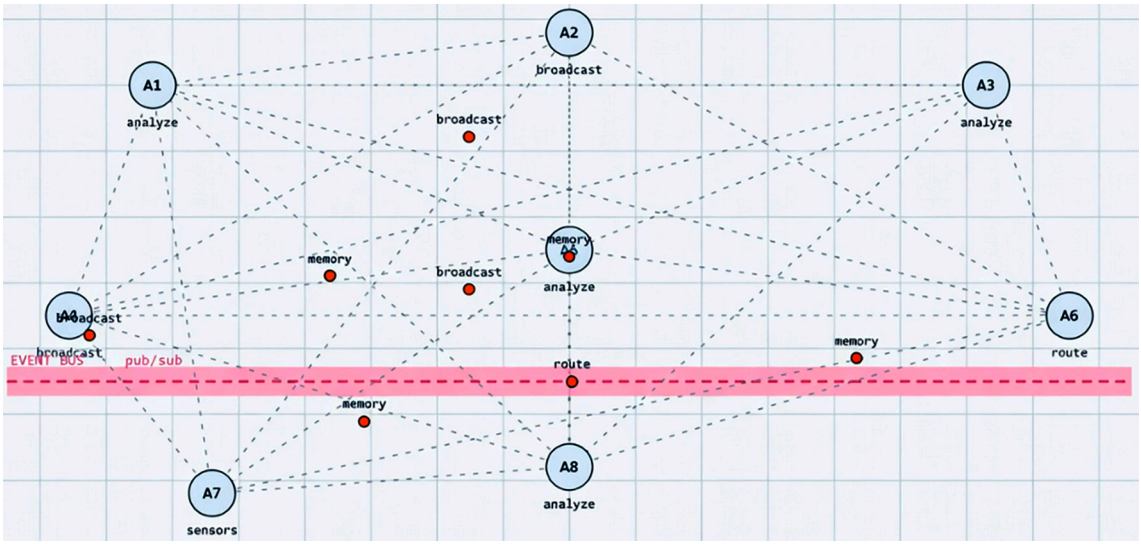


Рис. 2. Пример децентрализованной роевой архитектуры вычислительного конвейера
Источник: составлено автором

В самоорганизующихся системах агенты могут порождать подагентов динамически, а в случае если агенты представлены языковыми моделями, то записывать в общую шину памяти промежуточные схемы рассуждений. В результате объём контекста оркестратора растёт по оценке

$$O(n \times d \times i), \quad (1)$$

где n – число агентов,
d – глубина рассуждений,
i – число итераций.

Децентрализованные роевые архитектуры [10] исключают единый управляющий центр. Агенты взаимодействуют напрямую через протоколы интеграции, обмениваясь сообщениями по принципу публикации/подписки или через общую шину событий, без единого центра управления. Здесь топология вычислительного конвейера возникает и меняется в процессе самоорганизации, за счёт локальных взаимодействий между агентами. На рисунке 2 показан пример такой архитектуры из восьми равно-

правных агентов, координирующих действия (analyze, validate, broadcast, memory) через pub/sub-шину.

Гибридные адаптивные конвейеры сочетают элементы обеих моделей. Здесь высокоуровневое планирование осуществляется централизованно, тогда как исполнение и координация на уровне доменов делегируются автономным подагентам. Такая реализация показана на рисунке 3.

Для единого анализа всех трёх выделенных классов введём математическую модель адаптивного конвейера. Традиционное моделирование таких систем как статических направленных ациклических графов, имеет ряд существенных ограничений при описании самоорганизующихся систем. Обычные рёбра в направленных ациклических графах (англ. Directed Acyclic Graph, DAG) отражают только бинарные взаимодействия (REST/HTTP API вызовы, gRPC, Point-to-Point и т. д.) от источника к приёмнику, без возможности простым способом моделировать многостороннюю координацию, проявляющуюся в виде агрегации результатов от нескольких MCP-серверов, консенсуса нескольких агентов или широковещательной рассылки. Кроме того, динамика топологии в таких моделях задаётся внешним параметром, что затрудняет совместный анализ структурных изменений и накопления контекстного состояния. В рамках данной работы для устранения данной проблемы предлагается описать адаптивный мультиагентный самоорганизующийся конвейер как временной гиперграф.

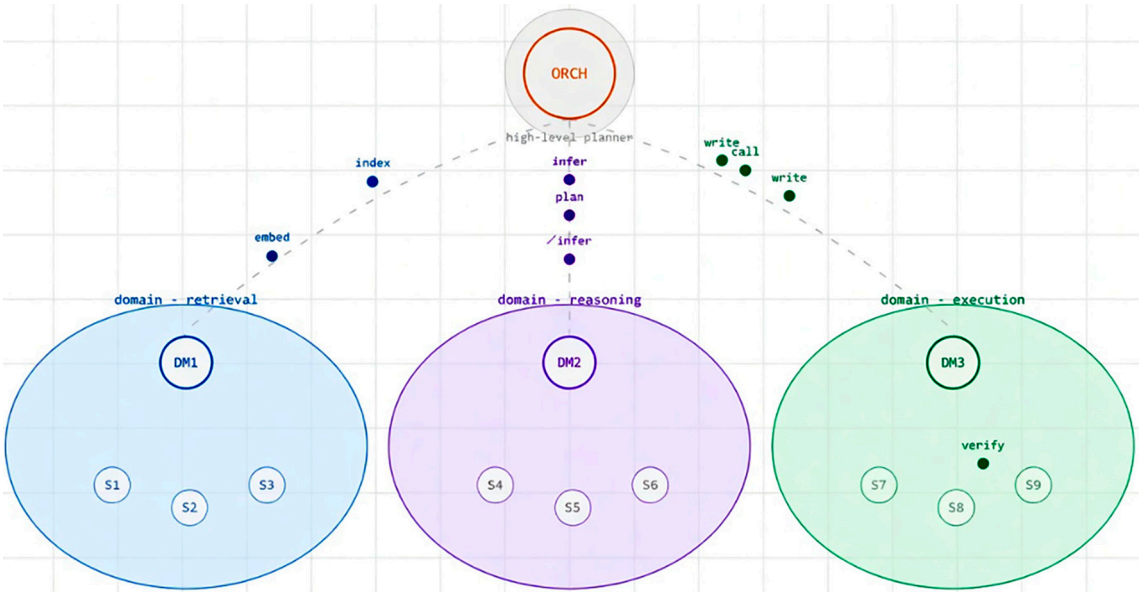


Рис. 3. Пример гибридной архитектуры вычислительного конвейера
Источник: составлено автором

Формальная модель временного гиперграфа

Пусть в момент времени t адаптивный мультиагентный самоорганизующийся конвейер описывается временным гиперграфом с динамическим множеством узлов

$$H(t)=(V(t), E(t), T), \qquad (2)$$

где V(t) – конечное, но изменяемое во времени множество узлов; E(t) – множество активных гиперрёбер в момент времени t.

Каждое гиперребро $e=(S_e,T_e,[\tau_{start},\tau_{end}])$ определяется непустыми непересекающимися подмножествами источников $S_e \subset V(t)$ и приёмников $T_e \subset V(t)$ ($S_e \cap T_e=\varnothing$), а также временным интервалом существования источника; $T:E \to R_+ \times R_+$ – функция, сопоставляющая каждому гиперребру интервал его активности.

Представленная выше формализация с использованием гиперграфа даёт строгое и адекватное описание, а также отражает ключевые особенности самоорганизующихся конвейеров. Так, например, атомарные вызовы инструментов через протокол MCP в такой модели интерпретируются как гиперрёбра с единичной кардинальностью множеств $e = (\{v_{agent}\},\{v_{mcp}\},[\tau,\tau])$, то есть гиперребро с $|S_e| = |T_e| = 1$ структурно эквивалентно стандартной дуге ориентированного графа.

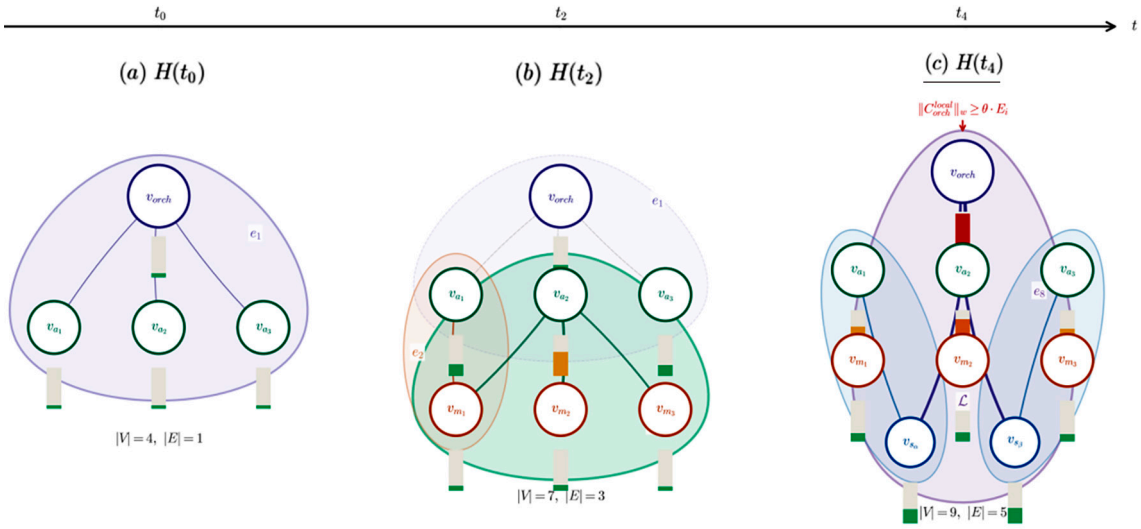


Рис. 4. Пример эволюции временного гиперграфа H(t)=(V(t), E(t), T) адаптивного самоорганизующегося распределённого конвейера
Источник: составлено автором

Переход к более сложным паттернам, например асинхронной событийной рассылке, многосторонней агрегации, агентному консенсусу, реализуется параметрически, через варьирование интервала активности и оператора агрегации, без введения новых классов рёбер. В отличие от DAG, гиперграф непосредственно кодирует отношение инцидентности множества источников приёмнику на уровне самого ребра. Динамическое же перестроение топологии вычислительного конвейера определяется как появление/исчезновение гиперрёбер и узлов в V(t) и E(t). На рисунке 4 показана данная динамика.

Гиперграф задаёт топологию и формальные пути распространения контекста, однако для анализа переполнения требуется также описать механизм аккумуляции и эволюции самого контекстного состояния. Для этого в рамках данной статьи вводится двухуровневая модель состояния каждого узла $v_i \in V(t)$ разделяющая долгосрочную историю вычислений и активное рабочее окружение. Полное сохраняемое состояние $C_i^{full}(t)$ аккумулирует архивированные чекпойнты, долгосрочную память и артефакты, вынесенные во внешние хранилища, например в объектном хранилище S3. Локальный контекст $C_i^{local}(t)$ представляет собой оперативную часть состояния, непосредственно загруженную в контекстное окно модели или буфер оператора. Именно динамика локального контекста является центральным объектом изучения, поскольку его рост вдоль гиперрёбер напрямую приводит к переполнению. Для количественного анализа используется взвешенный объём контекста, определяемый формулой

$$\left\|C_i^{local}(t)\right\|_w = \sum_{j=1}^{d} w_{ij} \cdot \left\|c_{i,j}^{local}(t)\right\|_1. \quad (3)$$

Веса $w_{ij} \geq 0$ калибруются эмпирически с помощью профилировщика путём измерения зависимости задержки инференса (или буферизации) от объёма контекста каждого типа. Подобный подход полностью согласуется с методологиями оценки стоимости внимания в NLP-моделях, где квадратичная сложность механизма самовнимания (англ. self-attention) оправдывает повышенные веса для текстовых и эмбеддинг-компонентов [11]. Далее динамика контекста на v_i узле может быть описана уравнением эволюции контекстного состояния на гиперграфе

$$C_i^{local}(t_{k+1}) = C_i^{local}(t_k) + \sum_{e \in E_i(t_k)} A_e(t_k) A\left(\{C_j^{local}(t_k)\}_{j \in S_e}\right) - B_i(t_k) p_i(t_k) + \delta_i(t_k), \quad (4)$$

где $A(\cdot)$ – это агрегирующая функция гиперребра;

$A_e(t_k)$ – матрица трансформации контекста при передаче по гиперребру;

$B_i(t_k)p_i(t_k)$ – объём контекста, удаляемого в результате обработки (реализуется через через механизмы TTL (англ. Time to Live) или выноса в многоуровневые хранилища);

$\delta_i(t_k)$ – дополнительные накладные расходы протоколов (служебные заголовки JSON-RPC, метаданные трассировки, дескрипторы согласования и т. д.).

Агрегирующая функция гиперребра принимает множество локальных состояний всех источников (отправителей) в гиперребре e, $\{C_j^{local}(t_k)\}_{j\in S_e}$ и возвращает одно агрегированное значение, которое представляет результат взаимодействия внутри данного гиперребра в момент времени t. В случае отсутствия механизма контроля контекста, то есть когда $B_i(t) \approx 0$ уравнение (4) гарантирует монотонный рост нормы

$$\left\|C_i^{local}(t)\right\|_w,$$

особенно ярко проявляющийся при динамическом увеличении множества узлов V(t).

Учитывая, что формы контекстного переполнения в данной работе рассматриваются в едином контуре, фиксируется, что контекстное переполнение формализуется через две функции потерь, которые отражают деградацию производительности L_p и семантической согласованности L_s. Деградация производительности определяется через отклонение текущей глубины очереди от целевой пропускной способности узла, в соответствии с формулой

$$L_P^{stream}(t_k) = \alpha_P \cdot \max\left(0, \frac{Q_i(t_k)}{Q_i^{max}} - \theta_P\right)^{\gamma},$$

$$\gamma \geq 2, \qquad (5)$$

где $Q_i(t_k) \propto \left\|c_i^{data}(t_k)\right\|_l$ – текущая глубина очереди оператора;

Q_i^{max} – максимальная допустимая глубина очереди;

θ – пороговое значение устойчивости (backpressure) [12, с. 12–28].

Параметр степени полинома в функции деградации производительности выбран больше 2, что обеспечивает сверхлинейный рост штрафа при превышении порога, а также является стандартным подходом в методах штрафов и барьеров [13].

Деградация же семантической согласованности описывает эффект затерянности в середине (англ. lost-in-the-middle) [6], что может быть описано формулой

$$L_S(t_k) = 1 - \frac{\sum_{p\in R} u(p, N(t_k))}{\sum_{q=1}^{N(t_k)} u(q, N(t_k))},$$

где $u(p, N) = e^{-\lambda \cdot p} + e^{-\lambda \cdot (N-p)}$ – U-образный профиль эффективного внимания с пиками у границ контекста;

R – позиции релевантных артефактов в контексте;

$N(t_k) = \left\|c_i^{agent}(t_k)\right\|_l$ – текущий размер контекста агента;

$\lambda > 0$ – параметр экспоненциального спада внимания.

При $N(t_k) \to N_{max}$ распределение внимания становится практически равномерным и $L_s(t_k) \to 1$, иными словами, релевантная информация почти полностью теряется при значениях, близких к 1.

На основе введённых выше метрик формулируется строгое условие перехода системы в критическое состояние. Состояние конвейера считается переполненным на уровне узла $v_i \in V(t)$ в момент времени t_k, если выполняется неравенство

$$\left\|C_i(t)\right\|_w \geq \theta_i \cdot E_i(t),$$

где $E_i(t)$ представляет собой динамическую эффективную ёмкость обработки. Пороговый коэффициент θ_i рекомендуется брать больше 0.8, так как такой порог обеспечивает раннее обнаружение проблемы деградации семантической согласованности, когда система ещё работоспособна, но уже входит в режим плавной деградации, характеризуемый строго положительными производными функций потерь

$$\frac{dL_P}{dt} > 0 \text{ и } \frac{dL_S}{dt} > 0,$$

обеспечивая тем самым запас устойчивости узла до достижения его эффективной ёмкости $E_i(t)$.

В гетерогенных конвейерах гиперрёбра нередко формируют не изолированные потоки, а циклические зависимости, при которых результаты одного узла рекурсивно порождают контекстную нагрузку на другие узлы того же цикла. В гибридных и роевых архитектурах вычислительного конвейера такие циклы могут активироваться асинхронно и взаимно усиливать накопление контекста. Рассмотрим упрощённую модель взаимодействия между потоковым узлом и агентным узлом, связанными гиперребром. Пусть в гиперграфе существует замкнутый цикл

$$L = (x_1 \to x_2 \to \cdots \to x_m \to x_1),$$

где каждое ребро соответствует локальному приращению контекстного состояния узла. Если выполняется условие

$$\prod_{(x\to y)\in L} \frac{\partial y}{\partial x} > 1,$$

то за каждый полный обход цикла совокупный объём контекста возрастает, и система

переходит в режим лавинообразного переполнения. Таким образом, задача снижения контекстного переполнения сводится к построению такого механизма регулирования динамики временного гиперграфа H(t), который обеспечивает минимизацию взвешенной суммы потерь $w_p L_p + w_s L_s$. Решение этой задачи представлено в следующем разделе.

Метод адаптивной прогнозирующей суммаризации контекста на гиперрёбрах

Из формальной модели следуют два принципиально разных режима деградации конвейера. В первом сценарии $\left\|C_i^{local}(t)\right\|_w$ растёт монотонно вследствие, как отмечалось ранее, $B_i(t) \approx 0$. Во втором сценарии система входит в режим самоусиливающегося каскада, при котором задержки потокового слоя порождают рекурсивные вызовы агента, и в этом случае пороговое сравнение нормы срабатывает с запозданием. Предлагаемый метод покрывает оба сценария единым программным механизмом, встроенным в оператор передачи $A_e(t_k)$. Ключевым архитектурным решением предлагаемого подхода является размещение логики редукции контекста непосредственно на уровне гиперребра, то есть до записи данных в контекстное окно узла-приёмника. Такой подход соответствует принципу раннего связывания ресурсных ограничений, применяемому в планировщиках операционных систем и менеджерах памяти современных систем [14, с. 200–230, 354–380].

Предлагаемый метод структурно состоит из трёх программных модулей, взаимодействующих через разделяемую структуру данных, и представляет собой таблицу состояния гиперрёбер гиперграфа. Первый модуль представляет собой двухканальный детектор, основной задачей которого, реализуемой в рамках первого канала, является расчёт взвешенной нормы $\left\|C_i^{local}(t)\right\|_w$ и сравнения её с установленным порогом. Второй канал обходит список активных гиперрёбер из таблицы состояний гиперрёбер и инкрементально обновляет произведение

$$\Gamma_i(t_k) = \prod_{(x \to y) \in L} \left| \frac{\partial y}{\partial x} \right|$$

и формирует сигнал бинарного флага

$$\delta_i(t_k) = 1\left[\left\|C_i\right\|_w \geq \theta_i \cdot E_i(t_k)\right] \vee 1\left[\Gamma_i(t_k) > 1\right].$$

В случае если значение флага становится равным 1, это приводит к активации компонента, представляющего собой классификатор данных.

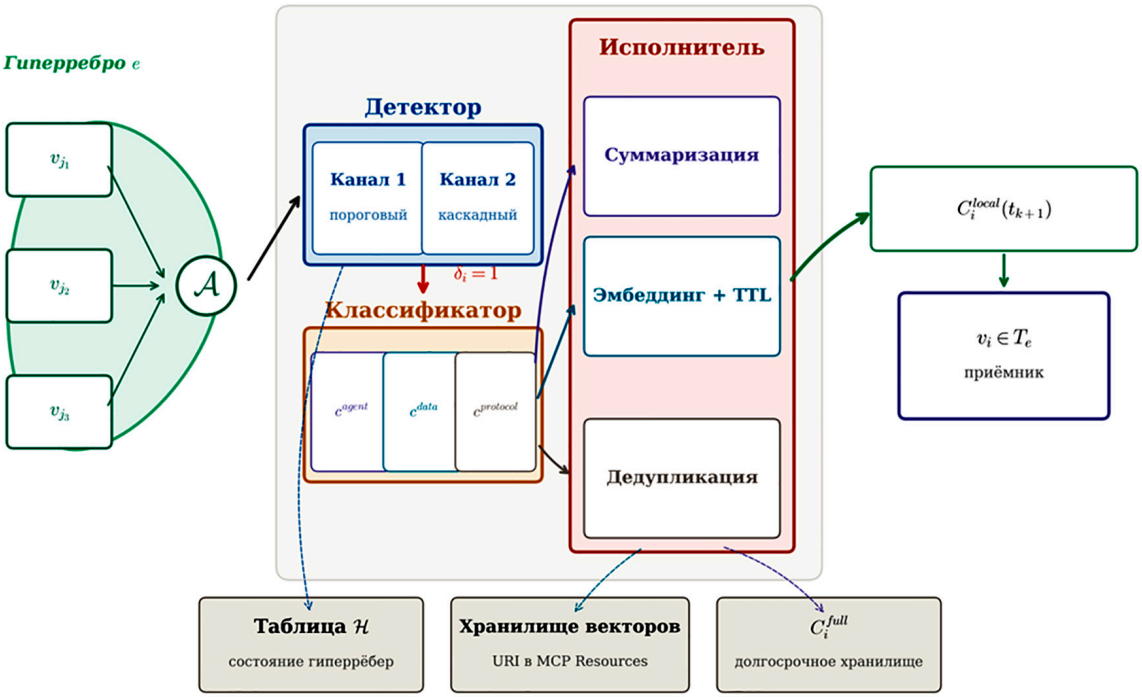


Рис. 5. Структурная схема двухканального детектора и тип-зависимого исполнителя редукции контекста на гиперребре
Источник: составлено автором

Данный компонент выполняет однократный обход локального контекста и разбивает его на три непересекающихся компонента по тегам типа «агентный контекст» (c_i^{agent}), «потоковые данные» (c_i^{date}) и «накладные расходы протокола» ($c_i^{protocol}$). При этом реализация классификатора не требует реализации сложного семантического анализа, так как теги типа проставляются детерминированно на основе источника записи в контекстное окно.

Далее модуль исполнения применяет соответствующую стратегию к каждому определённому ранее компоненту, вызывая соответствующую подпрограмму. Например, для типа c_i^{agent} вызывается подпрограмма суммаризации, которая генерирует краткое семантическое резюме цепочки рассуждений. Сам же оригинальный контекст сериализуется и помещается в полное сохраняемое состояние $C_i^{full}(t)$ для возможного последующего восстановления при необходимости. После исполнения всех трёх подпрограмм локальный контекст узла-приёмника обновляется, а в таблицу состояния гиперрёбер записываются новые значения нормы и коэффициентов для следующего такта. На рисунке 5 показана архитектура данного промежуточного слоя.

Реализация разработанного метода и его анализ

Описанный выше метод реализуется в виде самостоятельного программного компонента, представляющего собой промежуточный программный слой. Такая архитектурная реализация упрощает процесс встраивания в инфраструктуру мультиагентного конвейера без модификации протоколов взаимодействия агентов, что может быть полезно для уже существующих реализаций. На практике данный слой разворачивается как лёгкий вспомогательный процесс, размещаемый рядом с каждым узлом вычислительного конвейера (паттерн sidecar [15]). Он перехватывает передаваемые данные до их поступления в узел-приёмник и выполняет необходимую обработку, связанную с редукцией контекста. Таблица состояния гиперрёбер, через которую взаимодействуют три описанных выше модуля, реализуется в виде разделяемой структуры данных типа key-value хранилища с поддержкой атомарных операций чтения и обновления, что позволяет избежать повторных вычислений. В качестве идентификатора записи используется хеш, объединяющий множества источников и приёмников гиперребра, а также идентификатор временного окна.

Алгоритм 1 Адаптивная суммаризация контекста на гиперрёбрах

Вход: $H(t_k) = (V(t_k), E(t_k), T)$, таблица состояний $\mathcal{H}$, пороги $\{\theta_i\}$, веса $\{w_{ij}\}$
Выход: $\{C_i^{local}(t_{k+1})\}$, обновлённая таблица $\mathcal{H}$

for all $v_i \in V(t_k)$ параллельно **do**
  $norm_i \leftarrow \sum_j w_{ij} \, \|c_{i,j}^{local}(t_k)\|_1$
  $\Gamma_i \leftarrow \prod_{(x \to y) \in L_i,\ \mathcal{H}[e].changed = true} \left| \frac{\partial y}{\partial x} \right|$
  if $norm_i < \theta_i E_i(t_k)$ **and** $\Gamma_i \leq 1$ **then**
    continue
  end if
  $(C_{agent}, C_{data}, C_{proto}) \leftarrow split(C_i^{local}(t_k))$
  $C_{agent}^{new} \leftarrow Summarize_{LLM}(C_{agent})$
  $C_{data}^{new} \leftarrow CompressData(C_{data})$
  $C_{proto}^{new} \leftarrow Deduplicate(C_{proto}, D(t_k))$
  $C_i^{local}(t_{k+1}) \leftarrow C_{agent}^{new} \cup C_{data}^{new} \cup C_{proto}^{new}$
  UpdateState$(\mathcal{H}, v_i, C_i^{local}(t_{k+1}), \Gamma_i, t_{k+1})$
end for

Инвариант: $\|C_i^{local}(t_{k+1})\|_w < \theta_i \cdot E_i(t_{k+1})$ для всех $v_i \in V(t_k)$

Рис. 6. Псевдокод алгоритма адаптивной суммаризации контекста на гиперграфах
Источник: составлено автором

Реализация компонента двухканального детектора осуществлена в виде отдельного рабочего потока, выполняющего периодический опрос таблицы состояний с настраиваемым интервалом дискретизации. Классификатор данных реализуется как детерминированный компонент, не использующий никаких моделей машинного обучения, что принципиально отличает его от типовых решений на основе семантической классификации. Обработка контекста осуществляется дифференцированно в зависимости от его типа. Например, агентный контекст подвергается суммаризации с помощью облегчённой языковой модели с последующей сериализацией исходных данных во внешнее хранилище, а потоковые данные уже обрабатываются по принципу скользящего окна. В свою очередь, активация редукции определяется двухканальным детектором, который реализует как реактивный, так и прогнозирующий подход.

Алгоритм работы одного такта системы представлен ниже в виде псевдокода, что показано на рисунке 6.

Для формального обоснования метода покажем, что предложенный программный компонент гарантирует инвариант ограниченности локального контекста и сохраняет вычислительную сложность на уровне, не зависящем от числа потенциальных циклов в гиперграфе. Для этого можно воспользоваться теорией липшицевых отображений, применённой не к непрерывным динамическим системам [16, с. 25–40], а, в рамках данной работы, к дискретным операторам над контекстом.

Допущение A1 (ограниченность приращения контекста за такт). Существует константа Δ_{max}, такая, что для любого t_k выполняется

$$\left\| \Sigma_e \; A_e(t_k)\, A(C_j^{local}(t_k)_{(j\in S_e)}) + \delta_i(t_k) \right\|_w \le \; \Delta_{max}. \qquad (7)$$

Данное допущение связано с тем, что на практике число одновременно активных гиперрёбер, нормы матриц трансформации ограничено топологией конвейера (программной составляющей), а также используемыми форматами сообщений (например, размер заголовков JSON-RPC ограничен сверху по конструкции, а практические лимиты на объём передаваемых данных определяются конфигурацией сервера, в том числе значениями по умолчанию для распространённых реализаций [17, с. 35–50]).

Допущение A2 (нижняя оценка ёмкостной характеристики). Существует константа $E_{min} > 0$ такая, что $E_i(t) \ge E_i^{min}$ для всех $t \ge t_0$ и всех $v_i \in V(t)$. Это допущение соответствует физическим ограничениям инфраструктуры развёртывания вычислительного конвейера, таким как, например, размер контекстного окна модели узла конвейера, без привязки к конкретной реализации.

Утверждение 1 (свойства оператора редукции). Реализуемый программный модуль определяет оператор редукции R, состоящий из трёх независимых компонентов, обрабатывающих агентный контекст, потоковые данные и накладные расходы от используемого протокола интеграции. Оператор R обладает следующими свойствами:

a) ограниченность нормы контекста, когда для любого входного контекста C локальный контекст на каждом узле/агенте никогда не превышает определённый безопасный порог, то есть выполняется

$$\left\| R(C) \right\|_w \le \beta_{eff}, \;\; \beta_{eff} = L_{sum} \cdot w_{i_{agent}} + W_{size} \cdot w_{i_{data}} + TT \cdot v_{max} \cdot w_{i_{protocol}}. \qquad (8)$$

b) нерасширяющее отображение, что означает, что для любых двух локальных пар контекстов C_1 и C_2, попадающих в область активации детектора, выполняется

$$\left\| R(C_1) - R(C_2) \right\|_w \le L_R \cdot \left\| C_1 - C_2 \right\|_w,$$

$$L_R \in [0,1).$$

Доказательство. Свойство (а) следует из детерминированных ограничений классификатора, который разделяет контекст на три типа компонентов. Компонент (как подпрограмма) суммаризации ограничивает агентный контекст, скользящее окно ограничивает потоковые данные, а механизм TTL удаляет устаревшие метаданные. Свойство (б) обеспечивается уже конструкцией подпрограмм, так как компоненты обработки потоковых данных и протокольных расходов являются линейными, с константой Липшица, не превышающей 1, а компонент суммаризации проектируется с ограничением вариации выхода, что гарантирует, что константа Липшица также не превышает 1. Общая же константа Липшица всего реализуемого модуля определяется как максимум констант отдельных подпрограмм, что с учётом вышеизложенного гарантирует сходимость и устойчивость процесса суммаризации/редукции.

Утверждение 2 (ограниченность локального контекста). Допущения A1 и A2 совместно определяют границы задачи регуляции контекста. Программный компонент редукции функционирует в пределах допустимого рабочего диапазона, не допуская, чтобы накопленный объём контекста приближался

к пороговому значению быстрее, чем оператор R успевает его уменьшить. Пусть двухканальный детектор активирует редукцию с периодом Δt, удовлетворяющим условию

$$\Delta t \le \frac{\theta_i E_i^{min} - \beta_{eff}}{\Delta_{max}}, \theta_i E_i^{min} > \beta_{eff}, \quad (9)$$

где Δ_{max} – максимальное приращение нормы контекста за один такт;

E_i^{min} – нижняя оценка эффективной ёмкости.

Тогда после первой активации детектора для любого $t_k \ge t_0$ выполняется

$$\left\| C_i^{local}(t_k) \right\|_w \le \beta_{eff} + \Delta_{max} \cdot \Delta t. \quad (10)$$

При срабатывании детектора оператор R гарантирует $\|C\|_w \le \beta_{eff}$. Рассмотрим последовательность моментов активации t_k. После применения оператора R в момент t_k норма не превосходит β_{eff}. По индукции норма остаётся ограниченной указанной константой независимо от числа тактов. Это напрямую предотвращает переполнение контекстного окна и даёт гарантии того, что локальный контекст на каждом узле/агенте никогда не превышает определённый безопасный порог. Иными словами, при выборе параметров, удовлетворяющих $\beta_{eff} + \Delta_{max}\Delta t < \theta_i E_i^{min}$, норма локального контекста никогда не достигает порога переполнения, что делает переход узла в критическое состояние алгоритмически невозможным.

Заключение

Проведённое исследование позволило разработать метод снижения контекстного переполнения в мультиагентных самоорганизующихся конвейерах на основе адаптивной суммаризации контекста, реализуемый в виде промежуточного слоя на уровне гиперрёбер временного гиперграфа. Предложенная архитектура обеспечивает отделение слоя регулирования контекста от прикладной логики агентов, заменяя реактивную обработку переполнения ранним связыванием ресурсных ограничений. Показано, что использование такого слоя позволяет перейти от реактивной обработки переполнения к ранней регуляции ресурсных ограничений, при которой стратегия редукции выбирается с учётом типа передаваемого контекста и текущего состояния гиперребра. Решение ориентировано, прежде всего, на гетерогенные распределённые среды и применимо для повышения устойчивости интеллектуальных конвейеров без модификации протоколов интеграции, всё чаще применяемых в таких системах.

Список литературы

1. Hou X., Zhao Y., Wang S., Wang H. Model Context Protocol (MCP): Landscape, Security Threats, and Future Research Directions // ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. 2026. DOI: 10.1145/3796519.

2. What is the Model Context Protocol (MCP)? URL: https://modelcontextprotocol.io/docs/getting-started/intro (дата обращения: 11.01.2026).

3. Liao C. C., Liao D., Gadiraju S. S. AgentMaster: A Multi-Agent Conversational Framework Using A2A and MCP Protocols for Multimodal Information Retrieval and Analysis // Proceedings of the 2025 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: System Demonstrations. 2025. P. 52–72. DOI: 10.18653/v1/2025.emnlp-demos.5.

4. Agent2Agent (A2A) Protocol Specification. URL: https://a2a-protocol.org/latest/ (дата обращения: 20.01.2026).

5. LangGraph. LangChain. URL: https://www.langchain.com/langgraph (дата обращения: 20.01.2026).

6. Liu N. F., Lin K., Hewitt J., Paranjape A., Bevilacqua M., Petroni F., Liang P. Lost in the Middle: How Language Models Use Long Contexts // Transactions of the Association for Computational Linguistics. 2024. Vol. 12. P. 157–173. DOI: 10.1162/tacl_a_00638.

7. Alidu A., Ciavotta M., De Paoli F. Prompt2DAG: A Modular Prompting Approach for Democratizing Data Pipeline Generation // 2025 IEEE International Conference on Software Services Engineering (SSE). 2025. P. 1–11. DOI:10.1109/SSE67621.2025.00010.

8. Matteussi K. J., dos Anjos J. C. S., Leithardt V. R. Q., Geyer C. F. R. Performance Evaluation Analysis of Spark Streaming Backpressure for Data-Intensive Pipelines // Sensors. 2022. Vol. 22. № 13. Article 4756. DOI: 10.3390/s22134756.

9. Nguyen T. C., Nguyen V. S., Nguyen N. H., Van D. C., Nguyen M. H., Nguyen T. D., Nguyen H. T. AutoMind: Automated Insight Discovery via Multi-Agent Navigation // IEEE Access. 2026. Vol. 14. P. 23936–23955. DOI: 10.1109/ACCESS.2026.3661202.

10. Joseph A. A., Nambiar G. S., Jayapandian N. Swarm Intelligence Decentralized Decision Making in Multi-Agent System // 2023 8th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES). 2023. P. 1425–1430. DOI: 10.1109/ICCES57224.2023.10192625.

11. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention Is All You Need // Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. Vol. 30. P. 5998–6008.

12. Davis A. L. Reactive Streams in Java: Concurrency with RxJava, Reactor, and Akka Streams. Berkeley, CA: Apress, 2019. 153 p. DOI: 10.1007/978-1-4842-4176-9. ISBN: 978-1-4842-4175-2.

13. Chen X., Xin L., Zhao M. Hidden Convexity in Queueing Models // SSRN Electronic Journal. 2025. DOI: 10.2139/ssrn.5709506.

14. Silberschatz A., Galvin P. B., Gagne G. Operating System Concepts. 10th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019. 896 p. ISBN: 978-1-119-45408-3.

15. Meadows C., Hounsinou S., Wood T., Bloom G. Sidecar-based path-aware security for microservices // Proceedings of the 28th ACM Symposium on Access Control Models and Technologies. 2023. P. 157–162. DOI: 10.1145/3589608.3594742.

16. Арнольд В. И. Обыкновенные дифференциальные уравнения. 3-е изд., стер. М.: МЦНМО. 2024. 344 с. ISBN: 978-5-4439-4548-4.

17. Sharma R. NGINX High Performance. Birmingham: Packt Publishing, 2015. 168 p. ISBN: 978-1-78528-183-9.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 004.75:004.424.47
DOI 10.17513/snt.40813

CC BY 4.0

МЕТОД АДАПТИВНОГО КОНСИСТЕНТНОГО ХЕШИРОВАНИЯ С БЮДЖЕТНЫМ ОГРАНИЧЕНИЕМ СТОИМОСТИ ПЕРЕСТРОЙКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ

Батанов А. О. ORCID ID 0009-0004-6968-1139, Болбаков Р. Г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Российская Федерация, e-mail: batanov@mirea.ru

Рассматривается задача балансировки нагрузки в распределенных системах хранения данных с гетерогенными узлами. Применяемые подходы на основе консистентного хеширования либо не учитывают изменение нагрузки во времени, либо не ограничивают стоимость перестройки распределения, что ведет к избыточным миграциям данных. Цель исследования – разработать метод адаптивного управления распределением ключей, обеспечивающий снижение дисбаланса нагрузки при соблюдении ограничений на стоимость перестройки. Предложен метод, включающий коэффициент интенсивности управления, пошаговый бюджет переназначений токенов и гистерезис порогов чувствительности для подавления ложных срабатываний при шумной телеметрии. Разработана имитационная модель кластера с параметризованной гетерогенностью узлов трех классов, нестационарной пуассоновской нагрузкой, распределением ключей Ципфа и зашумленной телеметрией. Проведен вычислительный эксперимент из 7 серий по 30 повторений каждая с проверкой инвариантов корректности на каждом шаге. По результатам вычислительного эксперимента зафиксировано статистически значимое снижение дисбаланса нагрузки относительно алгоритма равномерного распределения в стационарных и нестационарных сценариях. В стационарных условиях качество балансировки сопоставимо с алгоритмом статического взвешивания, требующим знания емкостей узлов заранее. При динамическом изменении состава кластера снижение дисбаланса статистически значимо относительно обоих статических алгоритмов. Стоимость перестройки ниже, чем у алгоритма динамического взвешивания без бюджетного ограничения. Установлены условия, при которых применение метода нецелесообразно: совокупное влияние значительного шума, задержки и пропусков телеметрии приводит к избыточной миграционной активности без соответствующего снижения дисбаланса.

Ключевые слова: консистентное хеширование, распределенные системы, балансировка нагрузки, адаптивное управление, гетерогенные кластеры, миграция данных, бюджет перестройки

ADAPTIVE CONSISTENT HASHING METHOD WITH BUDGETED REDISTRIBUTION COST CONSTRAINT

Batanov A. O. ORCID ID 0009-0004-6968-1139, Bolbakov R. G.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "MIREA – Russian Technological University", Moscow, Russian Federation, e-mail: batanov@mirea.ru

This paper considers the problem of load balancing in distributed data storage systems with heterogeneous nodes. Existing consistent hashing approaches either do not account for load dynamics over time or do not constrain redistribution costs, leading to excessive data migrations. The aim of this study is to develop an adaptive key distribution method that reduces load imbalance subject to constraints on redistribution cost. The proposed method employs a control intensity coefficient, a per-step token reassignment budget, and hysteresis-based sensitivity thresholds to suppress spurious activations under noisy telemetry. A simulation model was developed incorporating heterogeneous nodes, non-stationary workload, and telemetry noise. A computational experiment across seven series showed a statistically significant reduction in load imbalance in both stationary and non-stationary scenarios. Under stationary conditions, balancing quality is comparable to a static weighted algorithm that requires prior knowledge of node capacities. Under dynamic cluster membership changes, the reduction in imbalance is statistically significant relative to both static algorithms. Redistribution cost is lower than that of the dynamic reweighting algorithm without budget constraints. Conditions under which application of the method is inadvisable were identified: concurrent high noise, telemetry lag, and measurement gaps lead to excessive migration activity without a corresponding reduction in imbalance.

Keywords: consistent hashing, distributed systems, load balancing, adaptive control, heterogeneous clusters, data migration, redistribution budget

Введение

В распределенных системах хранения данных назначение ключей узлам осуществляется через консистентное хеширование: каждому ключу сопоставляется позиция на хеш-кольце, а ближайший токен определяет ответственный узел [1]. Данный механизм используется в промышленных системах распределенного хранения данных [2, 3]. Он также применяется в одноранговых протоколах [4] и сетевых балансировщиках нагрузки [5]. Масштабируемые варианты

консистентного хеширования направлены на снижение стоимости переназначений при изменении состава множества узлов [6].

При неоднородности узлов по ресурсным емкостям равномерное распределение токенов приводит к дисбалансу нагрузки: слабые узлы перегружены, сильные простаивают. Статическое взвешивание через виртуальные узлы, применяемое в схемах горизонтального масштабирования [7], не адаптируется к динамике нагрузки. Динамическое взвешивание по наблюдаемой нагрузке, рассматриваемое в работах по балансировке неоднородных систем [8, 9], может быть чувствительно к колебаниям параметров распределения и само по себе не задает бюджета перестройки. Современные работы по балансировке нагрузки в гетерогенных вычислительных средах также фиксируют компромисс между учетом текущей нагрузки, затратами на взаимодействие узлов и устойчивостью планирования [10]. Метод bounded loads [11] ограничивает нагрузку перенаправлением запросов, но не управляет числом токенов и не формализует ограничения на объем миграций.

Каждое переназначение токенов влечет миграцию данных между узлами, что создает дополнительную нагрузку на сетевую подсистему и подсистему хранения [2, 12]. Исследования распределенных систем и оптимизации ресурсов баз данных показывают, что маршрутизация запросов, репликация, миграции данных и балансировка соединений создают самостоятельные накладные расходы [12, 13]. Отсутствие формализованных ограничений на объем миграций приводит к режиму непрерывной перестройки, ухудшающему качество обслуживания [9, 14]. В работах по балансировке при гетерогенных узлах [7, 14] используются виртуальные токены и квантованные весовые схемы, однако бюджет перестройки не формализуется. Подход на основе динамических весов с эвристической оптимизацией [9] снижает дисбаланс, но не ограничивает накопленную стоимость миграций. Ни в одном из перечисленных подходов ограничения на стоимость адаптации не формализованы явно.

Среди современных алгоритмов консистентного хеширования с малым потреблением памяти выделяются MementoHash [15], DxHash [16] и JumpHash [17]. По данным сравнительного обзора [18], remap-rate этих алгоритмов близок к теоретическому минимуму K/N (K – число ключей, N – число узлов): при добавлении или удалении узла мигрирует приблизительно 1/N доли ключевого пространства. По памяти MementoHash и DxHash требуют O(N), JumpHash – O(1); по сложности поиска JumpHash и DxHash – O(1), MementoHash – O(log N) в среднем. В базовой постановке и в проверенных источниках эти алгоритмы не формализуют адаптацию к разным текущим емкостям узлов; поэтому они не закрывают задачу распределения нагрузки между узлами различной емкости. Смежные направления включают динамическую балансировку на основе хеш-слотов [19], консистентное хеширование с динамическими весами [9] и модификацию равномерности кольца консистентного хеширования [20], а также аналитическое описание сценариев LRU-кэширования при консистентном хешировании [21]. Альтернативный подход в Pegasus [22] основан на избирательной репликации горячих ключей через программируемые сетевые коммутаторы. Метод ACH дополняет перечисленные работы: он управляет назначением токенов гетерогенных узлов на хеш-кольце при ограничении стоимости перестройки и совместим с указанными схемами минимального переназначения.

Цель исследования – разработать метод адаптивного управления распределением ключей на основе консистентного хеширования, при котором дисбаланс нагрузки снижается в рамках заданных ограничений на стоимость перестройки.

Материалы и методы исследования

Предлагаемый метод адаптивного консистентного хеширования (ACH) функционирует на уровне маршрутизации запросов между клиентом и узлами кластера. Схема встраивания в архитектуру распределенной системы показана на рис. 1: метод размещается между клиентом и узлами кластера, получает телеметрию от узлов и управляет назначением токенов хеш-кольца. Метод включает три конструктивных элемента.

Элемент 1. Коэффициент интенсивности управления. Коэффициент интенсивности $C(t) = C_max \cdot \gamma(t) \cdot \eta(t)$ задает масштаб вмешательства на уровне кластера. Коэффициент разрешенности перестройки $\gamma(t) = clip((\tau - total_load(t)) / (\tau - \tau_min), 0, 1)$ подавляет перестройку при приближении агрегированной загрузки кластера к насыщению. Показатель локального дисбаланса $\eta(t) = I(t) / (I(t) + \kappa)$ связывает интенсивность управления с масштабом перегрузки, где $I(t)$ – максимальное положительное отклонение загрузки узла от целевого уровня ℓ^*. Мультипликативная форма $C(t)$ приводит к нулевой интенсивности управления в двух случаях: при отсутствии локальной перегрузки ($\eta = 0$) и при насыщении кластера ($\gamma = 0$) [23].

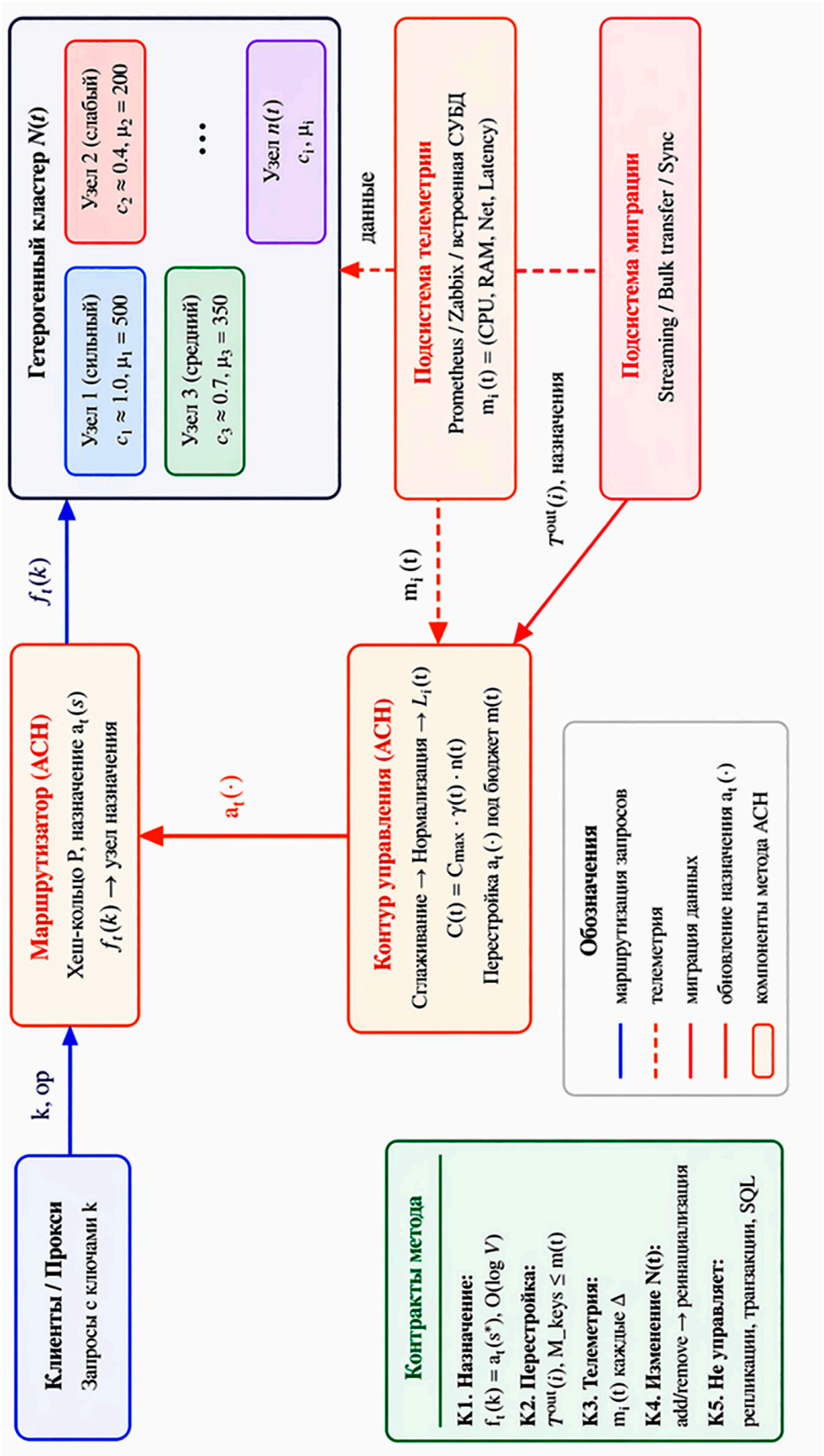


Рис. 1. Архитектурная схема встраивания метода АСН в распределенную систему управления данными.
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

Элемент 2. Бюджет переназначений. Позиции токенов на хеш-кольце фиксированы; адаптация выполняется через переназначение токенов между узлами. Стоимость перестройки определяется как доля переназначенного ключевого пространства: M_keys(t) = Σ L_s по токенам с измененным назначением, где L_s – длина сегмента хеш-пространства. Бюджет переназначений

$$m(t) = \min(M_{max}, \Delta/H \cdot M_H) \cdot C(t)/C_{max}$$

ограничивает плановый объем переназначений; из-за дискретной длины токенов фактическая величина дополнительно контролируется инвариантом

$$M_{keys}(t) \le m(t) + |O| \cdot \max_s L_s.$$

Двойное ограничение (пошаговое M_max и горизонтное M_H) ограничивает как одиночные крупные перестройки, так и накопление миграционной активности на горизонте [23].

Элемент 3.

Гистерезис порогов чувствительности. Дискретное состояние σ_i(t) ∈ {−1, 0, +1} определяет, включен ли узел в множество источников (перегруженных, σ = +1) или приемников (недогруженных, σ = −1). Пороги ε_on > ε_off > 0 обеспечивают запас устойчивости: переключение σ_i из нейтрального состояния (σ = 0) требует отклонения загрузки не менее ε_on, а возврат в нейтральное состояние – снижения отклонения до ε_off. При шуме телеметрии |ξ_i(t)| ≤ ε_off состояние σ_i остается нейтральным и перестройка не инициируется [23].

Для экспериментального исследования разработана имитационная модель кластера из 10 узлов трех классов гетерогенности (табл. 1). Модель включает пуассоновский поток запросов с интенсивностью Λ(t), распределение ключей маршрутизации по закону Ципфа с параметром s, модель насыщения ресурсов (очередь M/M/1) и модель искажений телеметрии (аддитивный шум σ_ν, лаг d шагов, пропуски с вероятностью p_miss). Интенсивность Λ = 1437,5 запросов в шаг определена калибровкой, при которой слабые узлы перегружены (ℓ_i > ℓ* + ε_on = 0,75), а сильные недогружены (ℓ_i < ℓ* − ε_on = 0,55).

Таблица 1

Параметры классов узлов в имитационной модели

Параметр	Класс A (сильный)	Класс B (средний)	Класс C (слабый)
c_cpu (отн. ед.)	1,0	0,55	0,25
μ_i (запр./шаг)	350	193	88
Доля в кластере	30 %	40 %	30 %

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Алгоритм 1. Перестройка распределения токенов на шаге t

Вход: кольцо R, оценки загрузки ℓ_i, шаг t
состояния σ_i ∈ {−1, 0, +1}
Выход: обновленное кольцо R, M_keys(t)
1. обновить σ_i по правилам гистерезиса (ε_on, ε_off)
2. C_norm ← γ(t) · η(t) // C_norm = C(t) / C_max
3. m ← min(M_max, M_H / H) · C_norm
4. если C ≤ 0 или m ≤ 0 – возврат 0
5. O ← {i : σ_i = +1}; U ← {j : σ_j = −1}
6. g_i ← max(ℓ_i − ℓ*, 0) для i ∈ O
7. r_j ← max(ℓ* − ℓ_j, 0) для j ∈ U
8. если Σ g_i = 0 или Σ r_j = 0 – возврат 0
9. T_out ← ∅ // Фаза 1
10. для каждого i ∈ O:
11. share_i ← m · g_i / Σ_k g_k
12. отсортировать токены узла i по убыванию L_s
13. набирать токены в T_out, пока Σ L_s < share_i
14. остановка по достижении v_min оставшихся токенов
15. для каждого j ∈ U: // Фазы 2 – 3
16. n_j ← ⌊|T_out| · r_j / Σ_k r_k⌋
17. переназначить n_j токенов из T_out на узел j
18. M_keys(t) ← Σ L_s по переназначенным токенам
19. проверить инвариант: M_keys(t) ≤ m + |O| · max_s L_s
20. возврат M_keys(t)

Таблица 1а

Параметры метода АСН, используемые в экспериментах

Параметр	Значение	Назначение
ℓ^*	0,65	Целевой уровень загрузки узла
ε_on	0,10	Порог включения коррекции для узла
ε_off	0,04	Порог выключения коррекции (запас гистерезиса)
τ	0,85	Верхний порог подавления перестройки при насыщении кластера
τ_min	0,50	Нижний порог насыщения; ниже него $\gamma(t) = 1$
κ	0,10	Смещение в показателе локального дисбаланса $\eta(t)$
M_max	0,02	Максимальная пошаговая доля переназначенного пространства
M_H	0,25	Бюджет переназначений на горизонте H шагов
H	100	Длина горизонтного окна (шагов)
v_min	3	Минимальное число токенов на узле

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования; значения соответствуют программной реализации имитационной модели.

Таблица 2

Сводные результаты метода АСН по сериям C1–C5 (30 повторений)

Серия	Сценарий	$\bar{D}$(ACH)	$\bar{D}$(A0)	Снижение	M_cum	n_viol
C1	Стационарный	0,177	0,225	−21,5 %	0,063	0
C2	Нестационарный	0,016	0,035	−55,4 %	0,028	0
C3	Ципф + churn	0,340	0,496	−31,6 %	0,310	0
C4a	Шум $\sigma = 0,02$	0,172	0,224	−23,2 %	0,070	0
C4b	Шум $\sigma = 0,05$	0,166	0,222	−25,2 %	0,167	0
C4c	Шум + лаг	0,198	0,219	−9,8 %	4,565	0

Примечание: $\bar{D}$ – средний дисбаланс на окне анализа [40, 2000), M_cum – накопленная стоимость перестройки, n_viol – число нарушений инвариантов корректности. Критерий Вилкоксона: $p < 0,001$ для серий C1–C4c.

Составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Процедура переназначения токенов реализована в три фазы. На первой фазе для каждого узла-источника ($\sigma_i = +1$) токены упорядочиваются по убыванию длины дуги L_s и отбираются до достижения индивидуальной доли бюджета

$$share_i = m(t) \cdot g_i / \Sigma_j\, g_j,$$

где $g_i = \max(\ell_i - \ell^*, 0)$; отбор прекращается также по достижении минимума v_min токенов на узле. На второй фазе отобранные токены объединяются в общий пул. На третьей фазе пул распределяется между узлами-приемниками ($\sigma_i = -1$) пропорционально дефициту $r_i = \max(\ell^* - \ell_i, 0)$. Аддитивный гауссовский шум применяется к телеметрии с одинаковой реализацией для всех сравниваемых алгоритмов на каждом шаге, что обеспечивает корректность парного критерия Вилкоксона; лаг моделируется задержкой наблюдения на d шагов, пропуски – независимыми событиями с вероятностью p_miss и замещением последним валидным значением. Для каждой серии выполняется 30 повторений с воспроизводимыми начальными условиями генераторов псевдослучайных чисел; на каждом шаге каждого повторения контролируется выполнение пяти инвариантов корректности.

Полная программная реализация имитационной модели, конфигурации серий, исходные значения seed-ов, агрегированные выборки результатов, индивидуальные значения по 30 повторениям для построения boxplot и ECDF, расчетные скрипты для критерия Вилкоксона и дельты Клиффа, а также набор из 57 модульных тестов опубликованы в открытом репозитории: https://github.com/Kronv3rk/ach-experiment (MIT License).

Эксперимент включает семь серий: стационарный режим (C1), нестационарная нагрузка с деградацией узлов (C2), изменение состава узлов с распределением Ципфа (C3),

три подсерии устойчивости при различном уровне шума (C4a, C4b, C4c) и чувствительность к параметрам (C5) (табл. 2).

Для сравнения используются четыре алгоритма: статическое распределение без взвешивания (A0), статическое взвешивание пропорционально емкости (A1), динамическое взвешивание без бюджета [8] (A2), ограничение нагрузки [11] (A3). Каждая серия выполнена в 30 повторениях. Статистическая значимость различий проверяется критерием Вилкоксона при $\alpha = 0{,}05$. Корректность программной реализации проверялась набором из 57 модульных тестов; на каждом шаге каждого повторения контролировалось выполнение пяти инвариантов.

Результаты исследования и их обсуждение

В стационарном режиме (серия C1) метод снижает средний дисбаланс $\bar{D}$ на 21,5 % по сравнению с алгоритмом равномерного распределения A0 (0,177 против 0,225, $p < 0{,}001$). По качеству балансировки метод сопоставим с алгоритмом статического взвешивания A1, использующим априорные знания об емкостях узлов ($\bar{D} = 0{,}175$, различие незначимо). Стоимость перестройки составляет M_cum = 0,063, тогда как у алгоритма динамического взвешивания A2 M_cum = 30,028 при сопоставимом снижении дисбаланса (рис. 2).

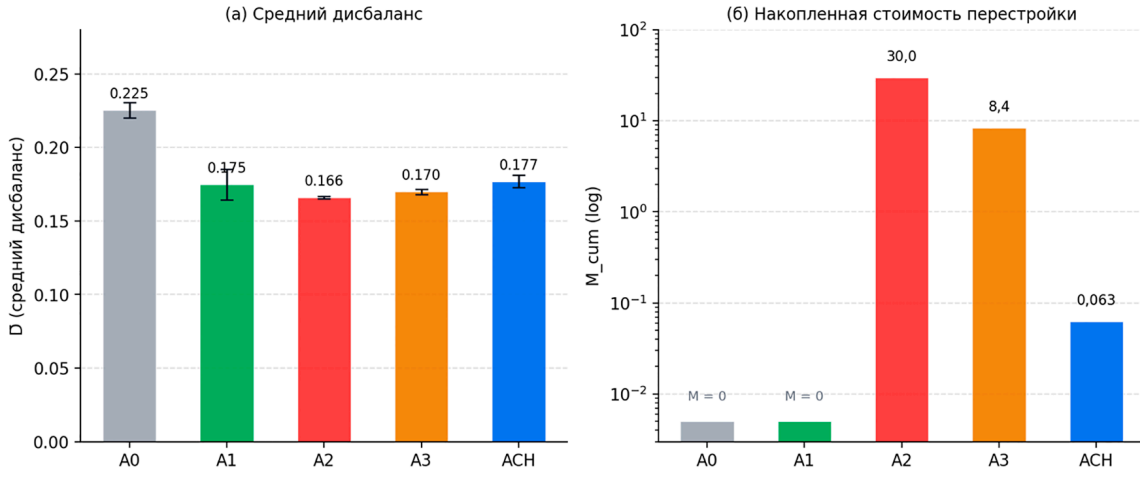


Рис. 2. Сравнение алгоритмов по среднему дисбалансу $\bar{D}$ (а) и стоимости перестройки M_cum (б) в серии C1
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

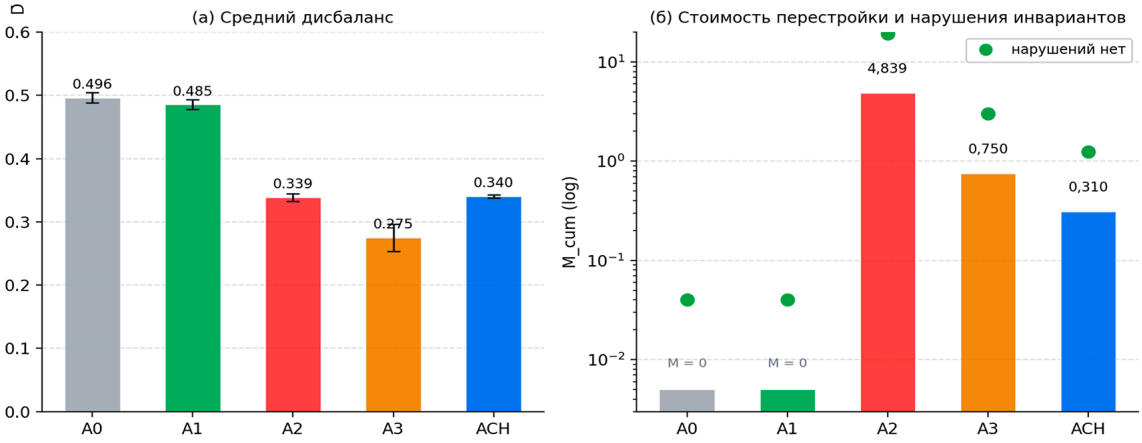


Рис. 3. Сравнение алгоритмов в серии C3: средний дисбаланс $\bar{D}$ (а) и стоимость перестройки M_cum с числом нарушений инвариантов (б). Кружки обозначают число нарушений: красный – нарушения, зеленый – ноль
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

Таблица 3

Сравнение адаптивных алгоритмов в серии C3 (30 повторений)

Алгоритм	$\bar{D} \pm CI_{95}$	M_cum	π_chg	n_viol
A0 (статич.)	0,496 ± 0,008	0,000	0,000	0
A1 (взвешен.)	0,485 ± 0,008	0,000	0,000	0
A2 (динамич.)	0,339 ± 0,006	4,839	0,155	0
A3 (ограничен.)	0,275 ± 0,023	0,750	0,045	0
ACH (предлагаемый)	0,340 ± 0,003	0,310	0,058	0

Примечание: CI_{95} – 95 %-ный доверительный интервал, π_chg – доля шагов с ненулевой перестройкой, n_viol – число нарушений инвариантов.

Составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Серия C3 моделирует изменение состава узлов (удаление двух узлов на шаге t = 150, добавление трех на шаге t = 300) при неравномерном распределении запросов по закону Ципфа с параметром s = 1,0. Снижение $\bar{D}$ в ней составляет 31,6 % относительно A0 (0,340 против 0,496, $p < 0,001$) и 30,0 % относительно A1 (0,485). В данном сценарии метод показывает статистически значимое снижение дисбаланса относительно как A0, так и A1 ($p < 0,001$): статические алгоритмы не адаптируют распределение при изменении состава кластера. Стоимость перестройки ACH составила M_cum = 0,310 против 4,839 у A2 (табл. 3, рис. 3). При смене состава узлов статические алгоритмы не перераспределяют ключевое пространство без явного пересчета весов; ACH перераспределяет ключевое пространство инкрементально, в рамках бюджетного ограничения.

Отсутствие нарушений у предлагаемого метода объясняется конструкцией: бюджет m(t) вычисляется до начала перестройки, процедура выбора токенов прекращается при достижении предела; фактический расход дополнительно проверяется инвариантом с дискретной верхней оценкой $M_keys(t) \le m + |O| \cdot \max_s L_s$ [23].

Серии C4a–C4c иллюстрируют изменение характеристик метода при возрастающем уровне искажений телеметрии (рис. 4). При шуме σ = 0,02 (C4a) и σ = 0,05 (C4b) метод снижает $\bar{D}$ на 23–25 % по сравнению с A0 ($p < 0,001$) при качестве балансировки, практически неотличимом от A1. В подсерии C4c (σ = 0,10, лаг d = 2 шага, пропуски p_miss = 10 %) снижение дисбаланса относительно A0 составляет 9,8 % ($\bar{D}$ = 0,198 против 0,219, $p < 0,001$). Вместе с тем накопленная стоимость перестройки в C4c возрастает до M_cum = 4,565 (против 0,070 в C4a и 0,167 в C4b): шум телеметрии превышает зону нечувствительности гистерезиса и вызывает избыточные переназначения токенов. Нарушений инвариантов во всех подсериях не зафиксировано.

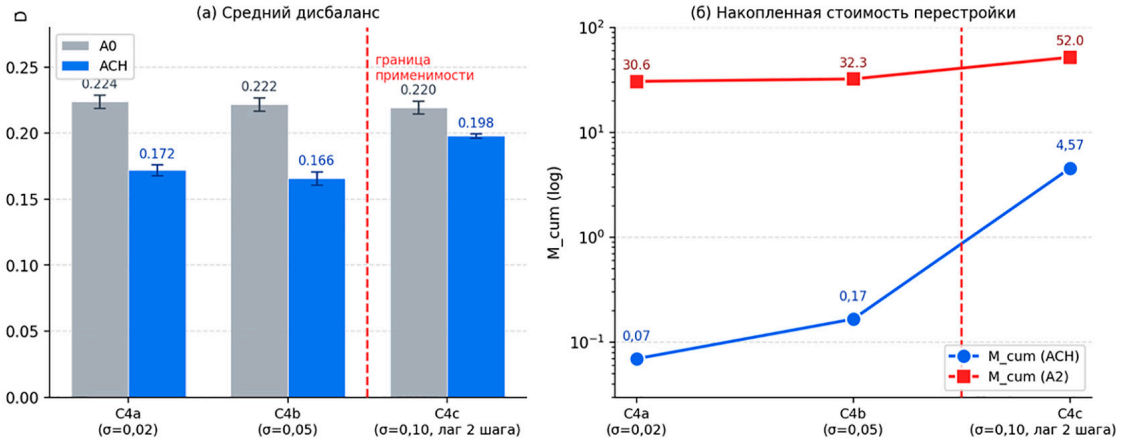


Рис. 4. Градиент деградации ACH при увеличении искажений телеметрии
Серые столбцы – алгоритм статического распределения A0, синие – ACH
Красная штриховая линия обозначает границу применимости ($\sigma > \varepsilon_off \wedge d > 1$)
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

Таблица 4

Чувствительность АСН к параметрам ε_on, κ, τ, M_max

Параметр	Значение	D̄	M_cum	π_chg	Замечание
ε_on	0,05	0,169	0,234	0,256	Агрессивная коррекция
ε_on	0,10 (база)	0,176	0,064	0,036	Рабочая точка
ε_on	0,15	0,208	0,000	0,000	Коррекция не запускается
κ	0,05–0,20	0,176	0,064	0,036	В диапазоне без эффекта
τ	0,70–0,80	0,225	0,000	0,000	γ = 0, подавление
τ	0,85 (база)	0,176	0,064	0,036	Возобновление коррекции
M_max	0,005–0,10	0,176	0,064	0,036	Ограничен M_H/H

Примечание: по параметрам κ и M_max представлен интервал значений, в котором агрегированные показатели одинаковы в пределах разрешающей способности эксперимента (10 повторений). Полные результаты sweep по 5 значениям ε_on, 4 значениям κ, 5 значениям τ и 5 значениям M_max сохранены в repos./results/C5/sensitivity.json. Доверительные интервалы (95 %) для всех метрик не превышают: $\Delta\bar{D} < 0{,}008$, $\Delta M_cum < 0{,}012$, $\Delta\pi_chg < 0{,}015$.

Составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Результат подсерии C4c определяет количественную границу применимости метода: эффективность сохраняется при $\sigma_\nu \le \varepsilon_off$ (порог выключения коррекции, в эксперименте $\varepsilon_off = 0{,}04$) и при лаге $d \le 1$ шаг. При нарушении этих условий шум телеметрии превышает зону нечувствительности гистерезиса, что приводит к ложным включениям коррекции и нецелесообразным переназначениям.

Для пары АСН–A0 в каждой серии (30 повторений) рассчитана дельта Клиффа |δ| как мера эффекта: C1 – 0,996; C2 – 1,000; C3 – 1,000; C4a – 1,000; C4b – 1,000; C4c – 0,936. Значения близки к 1 и указывают на сильное разделение эмпирических распределений D̄. По шкале Romano и др. (2006) $|\delta| \ge 0{,}474$ классифицируется как «большой» эффект, что выполнено во всех сериях, включая C4c ($|\delta| = 0{,}936$). Индивидуальные значения D̄ по 30 повторениям, использованные для расчета |δ|, и позволяют независимо построить графики boxplot и ECDF распределений D̄.

По результатам анализа чувствительности (серия C5), поведение метода определяют два параметра: порог включения коррекции ε_on и порог подавления перестройки τ. При $\varepsilon_on = 0{,}05$ переназначения выполняются на 25,6 % шагов ($\bar{D} = 0{,}169$); при $\varepsilon_on \ge 0{,}15$ перестройка не инициируется ($\bar{D} \approx 0{,}208$). Параметр τ демонстрирует пороговое поведение: при $\tau \le 0{,}80$ перестройка полностью подавлена ($\gamma = 0$, так как $total_load \ge \tau$), при $\tau \ge 0{,}85$ перестройка возобновляется. Детальные результаты серии C5 с разбиением по четырем параметрам (ε_on, κ, τ, M_max) приведены в табл. 4. Диапазоны выбраны симметрично относительно базовых значений из табл. 1a: $\varepsilon_on \in [0{,}05;\ 0{,}20]$ покрывает область от агрессивной до консервативной коррекции; $\kappa \in [0{,}05;\ 0{,}20]$ – от двукратного снижения до удвоения базового значения $\kappa = 0{,}10$; $\tau \in [0{,}70;\ 0{,}95]$ – от уровня tau_min до близкого к насыщению; $M_max \in [0{,}005;\ 0{,}10]$ – от пятикратного снижения до пятикратного увеличения базового бюджета 0,02. Параметры κ и M_max в исследованном диапазоне не показали значимого влияния на агрегированные показатели D̄ и M_cum: при базовой удельной потребности $|\bar{O}| \cdot g_i \approx 0{,}0025$ на шаг ограничивающим всегда выступает компонент $M_H/H = 0{,}0025$, а не M_max; параметр κ входит как мультипликативное смещение в множителе η и при M_keys, ограниченном бюджетом, его варьирование в указанном диапазоне не выходит за погрешность повторений.

При развертывании в производственной среде метод АСН работает как отдельный сервис маршрутизации между клиентами и узлами кластера (рис. 1). Источником телеметрии $m_i(t)$ служит внешняя система мониторинга (Prometheus, Zabbix) или встроенные средства СУБД. Подсистема миграции данных вызывается контуром управления через потоковую передачу, bulk transfer или штатные механизмы перебалансировки СУБД; переназначение токена фиксируется только после завершения переноса соответствующего сегмента ключевого пространства. Это позволяет не изменять протоколы транзакционной согласованности и репликации при условии, что переключение маршрутизации выполняется атомарно после подтвержденного переноса сегмента и согласовано с механизмом репликации.

Выводы

1. Предложен метод адаптивного консистентного хеширования, включающий мультипликативный коэффициент интенсивности управления C(t), бюджет переназначений m(t) и гистерезис порогов чувствительности. Ограничения на стоимость перестройки соблюдаются на каждом шаге и на заданном временном горизонте с учетом дискретной верхней оценки перерасхода на длины токенов.

2. Вычислительный эксперимент (7 серий, 30 повторений каждая для C1–C4) показал статистически значимое ($p < 0{,}001$) снижение дисбаланса нагрузки относительно алгоритма равномерного распределения A0 в диапазоне 9,8–55,4 % в зависимости от сценария. В стационарных условиях качество балансировки сопоставимо с алгоритмом статического взвешивания A1, который требует априорного знания емкостей узлов. При динамическом изменении состава кластера (C3) снижение дисбаланса относительно A0 и A1 статистически значимо ($p < 0{,}001$). Стоимость перестройки ниже, чем у алгоритма динамического взвешивания A2.

3. Установлены условия ограниченной применимости метода: при одновременном действии шума телеметрии $\sigma_v > \varepsilon_{off}$ и задержки измерений $d \geq 2$ шагов стоимость перестройки возрастает до $M_{cum} = 4{,}565$, а снижение дисбаланса ограничено 9,8 %; без предварительной фильтрации телеметрии применение метода в таких условиях нецелесообразно. При доминировании горячих ключей (распределение Ципфа, $s = 1{,}0$) снижение дисбаланса ограничено 31,6 %.

4. Среди возможных направлений дальнейшей работы – распространение подхода на управление отдельными горячими ключами и оперативная адаптация параметров гистерезиса.

Список литературы

1. Karger D., Lehman E., Leighton T., Panigrahy R., Levine M., Lewin D. Consistent hashing and random trees: distributed caching protocols for relieving hot spots on the World Wide Web // Proceedings of the 29th Annual ACM Symposium on Theory of Computing. 1997. P. 654–663. DOI: 10.1145/258533.258660.

2. DeCandia G., Hastorun D., Jampani M., Kakulapati G., Lakshman A., Pilchin A., Sivasubramanian S., Vosshall P., Vogels W. Dynamo: Amazon's highly available key-value store // ACM SIGOPS Operating Systems Review. 2007. Vol. 41. Is. 6. P. 205–220. DOI: 10.1145/1323293.1294281.

3. Lakshman A., Malik P. Cassandra: a decentralized structured storage system // ACM SIGOPS Operating Systems Review. 2010. Vol. 44. Is. 2. P. 35–40. DOI: 10.1145/1773912.1773922.

4. Stoica I., Morris R., Liben-Nowell D., Karger D. R., Kaashoek M. F., Dabek F., Balakrishnan H. Chord: a scalable peer-to-peer lookup protocol for internet applications // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2003. Vol. 11. Is. 1. P. 17–32. DOI: 10.1109/TNET.2002.808407.

5. Eisenbud D. E., Yi C., Contavalli C., Smith C., Kononov R., Mann-Hielscher E., Cilingiroglu A., Cheyney B., Shang W., Hosein J. D. Maglev: A Fast and Reliable Software Network Load Balancer // Proceedings of the 13th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 2016). 2016. P. 523–535. URL: https://www.usenix.org/conference/nsdi16/technical-sessions/presentation/eisenbud (дата обращения: 24.04.2026).

6. Mendelson G., Vargaftik S., Barabash K., Lorenz D. H., Keslassy I., Orda A. AnchorHash: A Scalable Consistent Hash // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2021. Vol. 29. Is. 2. P. 517–528. DOI: 10.1109/TNET.2020.3039547.

7. Зернов А. С., Ожиганов А. А. Горизонтальное масштабирование базы данных с использованием консистентного хеширования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 3. С. 234–238. URL: https://openbooks.itmo.ru/ru/article/16608/gorizontalnoe_masshtabirovanie_bazy_dannyh_s_ispolzovaniem_konsistentnogo_heshirovaniya.htm (дата обращения: 24.04.2026). DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-3-234-238.

8. Алексеев И. А., Егунов В. А., Панюлайтис С. В., Чекушкин А. А. Методы и средства балансировки нагрузки в неоднородных вычислительных системах // Инженерный вестник Дона. 2020. № 11. С. 160–168. URL: https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2020/6667 (дата обращения: 24.04.2026).

9. Wang C., Chen Y., Wang J., Wang B. A Dynamic Weights Consistent Hashing Load Balancing Method Based on Heuristic Optimization // 2023 3rd International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Science (EIECS). 2023. P. 492–496. DOI: 10.1109/EIECS59936.2023.10435520.

10. Куровский С. В., Мишин Д. А., Шульман В. Д. Алгоритм балансировки нагрузки в гетерогенной среде вычислительной системы // Международный научно-исследовательский журнал. 2025. № 5 (155). URL: https://research-journal.org/archive/5-155-2025-may/10.60797/IRJ.2025.155.67 (дата обращения: 24.04.2026). DOI: 10.60797/IRJ.2025.155.67. EDN: HKQFAE.

11. Mirrokni V., Thorup M., Zadimoghaddam M. Consistent hashing with bounded loads // Proceedings of the 29th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms. 2018. P. 587–604. URL: https://research.google/pubs/consistent-hashing-with-bounded-loads/ (дата обращения: 24.04.2026). DOI: 10.1137/1.9781611975031.39.

12. Kleppmann M. Designing Data-Intensive Applications: The Big Ideas Behind Reliable, Scalable, and Maintainable Systems. Sebastopol: O'Reilly Media, 2017. 616 p. [Электронный ресурс]. URL: https://www.oreilly.com/library/view/designing-data-intensive-applications/9781491903063/ (дата обращения: 24.04.2026). ISBN 978-1-4493-7332-0.

13. Боронников А. С., Цынгалев П. С., Ильин В. Г., Деменкова Т. А. Оценка эффективности балансировщика соединений PgBouncer для оптимизации вычислительных ресурсов реляционных баз данных // Russian Technological Journal. 2024. Т. 12. № 3. С. 7–24. URL: https://www.rtj-mirea.ru/jour/article/view/915 (дата обращения: 24.04.2026). DOI: 10.32362/2500-316X-2024-12-3-7-24. EDN: BNQNDI.

14. Levi Y., Keslassy I. Beyond the Ring: Quantized Heterogeneous Consistent Hashing // 2023 IEEE 31st International Conference on Network Protocols (ICNP). 2023. P. 1–12. URL: https://icnp23.cs.ucr.edu/assets/papers/icnp23-final77.pdf (дата обращения: 24.04.2026). DOI: 10.1109/ICNP59255.2023.10355577.

15. Coluzzi M., Brocco A., Antonucci A., Leidi T. MementoHash: A Stateful, Minimal Memory, Best Performing Consistent Hash Algorithm // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2024. Vol. 32. Is. 4. P. 3528–3543. DOI: 10.1109/TNET.2024.3393476.

16. Dong C., Wang F., Feng D. DxHash: A Memory-saving Consistent Hashing Algorithm // ACM Transactions on Internet Technology. 2024. Vol. 24. Is. 1. Art. 3. P. 1–22. DOI: 10.1145/3631708.

17. Lamping J., Veach E. A Fast, Minimal Memory, Consistent Hash Algorithm // arXiv preprint arXiv:1406.2294. 2014. URL: https://arxiv.org/abs/1406.2294 (дата обращения: 10.05.2026). DOI: 10.48550/arXiv.1406.2294.

18. Coluzzi M., Brocco A., Leidi T. Consistently Faster: A Survey and Fair Comparison of Consistent Hashing Algorithms // Proceedings of the 31st Symposium on Advanced Database Systems (SEBD 2023). CEUR Workshop Proceedings. 2023. Vol. 3478. P. 51–64. URL: https://ceur-ws.org/Vol-3478/paper03.pdf (дата обращения: 10.05.2026).

19. Zhang M. Dynamic Load Balance Strategy Based on Hash Slots in Distributed Storage Environment // 2022 4th International Conference on Frontiers Technology of Information and Computer (ICFTIC). IEEE, 2022. P. 485–488. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/10075322 (дата обращения: 10.05.2026). DOI: 10.1109/ICFTIC57696.2022.10075322.

20. Waqas M., Lin S.-J., Liu B., Fazi A. On the Modification of Ring Consistent Hash Uniformity: A Case Study // 2024 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). IEEE, 2024. P. 4778–4783. DOI: 10.1109/SMC54092.2024.10831430.

21. Ji K., Quan G., Tan J. Asymptotic Miss Ratio of LRU Caching with Consistent Hashing // Proceedings of the IEEE INFOCOM 2018 – IEEE Conference on Computer Communications. 2018. P. 450–458. DOI: 10.1109/INFOCOM.2018.8485860.

22. Li J., Nelson J., Michael E., Jin X., Ports D. R. K. Pegasus: Tolerating Skewed Workloads in Distributed Storage with In-Network Coherence Directories // Proceedings of the 14th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI '20). USENIX Association, 2020. P. 387–406. URL: https://www.usenix.org/conference/osdi20/presentation/li-jialin (дата обращения: 10.05.2026). ISBN 978-1-939133-19-9.

23. Батанов А. О., Литвинова А. С. Передовой подход к распределенным системам: динамические алгоритмы и эффективная обработка больших данных // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 3. С. 8–13. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40317 (дата обращения: 24.04.2026). DOI: 10.17513/snt.40317. EDN: HRSYLI.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 004.932.2:612.766.1
DOI 10.17513/snt.40814

CC BY 4.0

АЛГОРИТМЫ БЕЗМАРКЕРНОГО ВИДЕОАНАЛИЗА БИОМЕХАНИКИ ХОДЬБЫ НА ОСНОВЕ ПЛАТФОРМЫ MEDIAPIPE: МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ АТТЕСТАЦИЯ И СОПОСТАВЛЕНИЕ С ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМ МАРКЕРНЫМ АНАЛИЗОМ

[1]Батышева Т. Т. ORCID ID 0000-0003-0928-2131,
[1]Тихонов С. В. ORCID ID 0000-0002-5489-3516,
[1]Алексеева М. В. ORCID ID 0000-0001-8448-8493,
[1]Климов Ю. А. ORCID ID 0000-0001-5946-094X,
[2, 3]Пеганский Д. А. ORCID ID 0009-0006-1723-1800,
[2, 4]Куликова О. М. ORCID ID 0000-0001-9082-9848,
[2, 5]Усачева Е. В. ORCID ID 0000-0002-6134-1533

[1]Государственное бюджетное учреждение здравоохранения г. Москвы «Научно-практический центр детской психоневрологии Департамента здравоохранения г. Москвы», Москва, Российская Федерация;
[2]Общество с ограниченной ответственностью «Агентство «АСТ», Омск, Российская Федерация;
[3]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный государственный университет физической культуры, спорта и здоровья имени П. Ф. Лесгафта», Санкт-Петербург, Российская Федерация;
[4]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владивостокский государственный университет», Владивосток, Российская Федерация;
[5]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Омск, Российская Федерация, e-mail: science@ast.agency

Развитие сверточных нейронных сетей оценки положения тела человека инициировало сдвиг в направлении безмаркерного видеоанализа движений, обеспечивающего пространственную точность определения двумерных координат ключевых точек 5–10 мм при дистанции съемки 3–4 м, что приближается к точности маркерных систем для крупных анатомических сегментов. Цель исследования – разработка программного комплекса трехмерного безмаркерного видеоанализа биомеханики ходьбы и его метрологической аттестации в сопоставлении с эталонной системой Qualisys. Разработанный программный комплекс трехмерного безмаркерного видеоанализа биомеханики ходьбы реализует полный технологический цикл от детекции ключевых точек до клинической интерпретации с использованием восьми международно признанных диагностических индексов. Математический аппарат комплекса основан на стереотриангуляции из двух синхронизированных видеопотоков методом сингулярного разложения, многокаскадной цифровой фильтрации траекторий и алгоритмах автоматической верификации измерений посредством инвариантного физического уравнения связи скорости, каденции и длины шага. Метрологическая аттестация выполнена согласно стандартизированному протоколу с применением внутриклассового коэффициента корреляции ICC(2,1) модели Шраута – Флейсса, диаграммы Бленда – Альтмана с расчетом 95-процентных пределов согласия, стандартной ошибки измерения и минимально детектируемого изменения. Валидационное исследование продемонстрировало достижение значения ICC = 0,902 в сагиттальной плоскости (класс А научной точности по предложенной четырехуровневой шкале), программный комплекс аттестован по классу В общему с предельно допускаемой погрешностью ±11,95° для угловых параметров и ± 50 мс для временных интервалов, систематическое смещение Бленда – Альтмана +6,18 ± 2,22° и среднеквадратичную ошибку 6,50°, что соответствует уровню научных биомеханических исследований и обеспечивает возможность клинической диагностики патологий ходьбы.

Ключевые слова: безмаркерный видеоанализ ходьбы, биомеханика ходьбы, метрологическая аттестация, нейросетевой детектор точек, стереотриангуляция, управляемая реабилитация, цифровая фильтрация

ALGORITHMS FOR NON-MARKER VIDEO ANALYSIS OF WALKING BIOMECHANICS BASED ON THE MEDIAPIPE PLATFORM: METROLOGICAL CERTIFICATION AND COMPARISON WITH INSTRUMENTAL MARKER ANALYSIS

[1]Batysheva T. T. ORCID ID 0000-0003-0928-2131,
[1]Tikhonov S. V. ORCID ID 0000-0002-5489-3516,

[1]Alekseeva M. V. ORCID ID 0000-0001-8448-8493,
[1]Klimov Yu. A. ORCID ID 0000-0001-5946-094X,
[2, 3]Peganskiy D. A. ORCID ID 0009-0006-1723-1800,
[2, 4]Kulikova O. M. ORCID ID 0000-0001-9082-9848,
[2, 5]Usacheva E. V. ORCID ID 0000-0002-6134-1533

[1]State Budgetary Institution of Healthcare of the city of Moscow "Scientific and Practical Center for Child Psychoneurology of the Moscow City Healthcare Department", Moscow, Russian Federation;
[2]Limited liability company "Agency "AST", Omsk, Russian Federation;
[3]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National State University of Physical Education, Sports and Health named after P. F. Lesgaft", Saint Petersburg, Russian Federation;
[4]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Vladivostok State University", Vladivostok, Russian Federation;
[5]Federal State Funded Educational Institution for Higher Education "Omsk State Medical University" of the Ministry of Public Health of the Russian Federation, Omsk, Russian Federation, e-mail: science@ast.agency

The development of convolutional neural networks for human body position estimation has initiated a shift towards markerless video analysis of movements, which provides spatial accuracy of 5-10 mm for determining the two-dimensional coordinates of key points at a shooting distance of 3-4 m, which is close to the accuracy of marker systems for large anatomical segments. The purpose of the study: to develop a software package for three-dimensional marker-free video analysis of walking biomechanics and its metrological certification in comparison with the Qualisys reference system. The developed software complex for three-dimensional markerless video analysis of walking biomechanics implements a full technological cycle from key point detection to clinical interpretation using eight internationally recognized diagnostic indices. The complex's mathematical apparatus is based on stereotriangulation from two synchronized video streams using the singular value decomposition method, multi-stage digital trajectory filtering, and algorithms for automatic measurement verification using an invariant physical equation that relates velocity, cadence, and step length. The metrological certification was performed according to a standardized protocol using the intra-class correlation coefficient ICC(2,1) of the Schraut-Fleiss model, the Blend-Altman diagram, and the calculation of 95 % confidence limits, standard error of measurement, and minimum detectable change. The validation study demonstrated the achievement of an ICC value of 0.902 in the sagittal plane (class A of scientific accuracy according to the proposed four-level scale), and the software package is certified for class B general with a maximum permissible error of ± 11.95° for angular parameters and ± 50 ms for time intervals, a systematic bias of Blend-Altman +6.18°±2.22°, and a standard deviation of 6.50°, which corresponds to the level of scientific biomechanical research and provides the possibility of clinical diagnosis of walking pathologies.

Keywords: biomechanics of walking, digital filtering, guided rehabilitation, markerless analysis of walking, metrological certification, neural network detector of key points, stereotriangulation

Введение

Инструментальный анализ ходьбы является признанным эталоном объективизации двигательных нарушений в клинической биомеханике, неврологии и реабилитологии [1–3]. Стационарные оптические системы захвата движения (Vicon, Qualisys, BTS Bioengineering) обеспечивают пространственную точность локализации светоотражающих маркеров порядка 0,5 мм, что соответствует уровню научных исследований, однако высокая стоимость оборудования и трудоемкость процедуры ограничивают распространенность указанных систем в клинической практике [4].

Развитие сверточных нейронных сетей оценки положения тела человека (Human Pose Estimation, HPE), представленных архитектурами OpenPose, MediaPipe BlazePose, MMPose, инициировало сдвиг в направлении безмаркерного видеоанализа движений, обеспечивающего пространственную точность определения двумерных координат ключевых точек 5–10 мм при дистанции съемки 3–4 м, что приближается к точности маркерных систем для крупных анатомических сегментов [5].

Актуальность внедрения алгоритмов безмаркерного видеоанализа в клиническую практику подтверждается растущим числом метаанализов и систематических обзоров. В частности, недавний систематический обзор с метаанализом показал, что безмаркерные системы сопоставимы с маркерными по точности, валидности и надежности при оценке пространственно-временных параметров ходьбы, а для кинематики тазобедренного и коленного суставов во фронтальной плоскости также демонстрируют высокую степень согласия [6]. Важно отметить, что точность работы HPE-алгоритмов, в том числе MediaPipe, критически зависит от таких факторов, как настройки камеры, архитек-

тура бэкбона и состав обучающих выборок [7]. Однако, несмотря на многообещающие результаты, остается ряд открытых вопросов. Текущая доказательная база, касающаяся надежности (ретестовой и межсессионной) РЕА-систем в целом, ограничена [8]. Кроме того, для голеностопного сустава, особенно в трансверсальной и фронтальной плоскостях, до сих пор характерна пониженная валидность и надежность измерений [6]. Многообещающие результаты были получены при применении MediaPipe для выявления аномалий ходьбы: система показала эффективность при детекции нарушений у пациентов с саркопенией (точность 97 %) и болезнью Паркинсона (88 %) [9]. С другой стороны, прямое сравнение с маркерной системой Vicon выявило лишь умеренное согласие (ICC < 0,9) при оценке углов в тазобедренном и коленном суставах у здоровых людей с помощью MediaPipe, что свидетельствует о необходимости дальнейшего совершенствования модели [10–12]. Таким образом, для широкого клинического внедрения MediaPipe и подобных алгоритмов необходимы дальнейшие стандартизированные метрические исследования по валидации и сопоставлению с референсными системами, особенно на различных клинических когортах.

Цель исследования – настоящее исследование посвящено разработке программного комплекса трехмерного безмаркерного видеоанализа биомеханики ходьбы и его метрологической аттестации в сопоставлении с эталонной системой Qualisys.

Материалы и методы исследования

Архитектура программного комплекса

Программный комплекс реализован в среде Python 3.11 в виде модульной системы с разделением функциональной ответственности между подсистемами обработки видео, биомеханического анализа, клинической оценки и экспорта результатов. Концептуальная схема архитектуры представлена на рис. 1 и 2. Технологический конвейер обработки данных содержит 16 последовательных вычислительных этапов. Этап нулевой инициирует процедуру предварительного контроля качества (pre-flight check) видеозаписи по 10 параметрам, включающим длительность фрагмента, частоту кадров, пространственное разрешение, среднюю видимость ключевых точек, видимость дистальных сегментов нижних конечностей и индекс асимметрии обзора. Первый и второй этапы выполняют детекцию 33 ключевых точек скелета модели MediaPipe Pose Landmarker (топология COCO + Hand) в каждом кадре сагиттального и фронтального видеопотоков с последующей стереотриангуляцией. Этапы цифровой фильтрации (этап 2.7) и коррекции анатомических ограничителей реализуют каскадную обработку траекторий, описанную в подразделе 2.2; перечисленные этапы сбора видеоданных и обработки сигналов отражены на рис. 1. Биомеханический анализ (этап 3) формирует 12 кинематических параметров суставов и 10 спатиотемпоральных характеристик. На этапах 4–6 рассчитываются 8 клинических индексов (POMA, GMFCS, FAC, EVGS, GPS, GDI, PCI, GVS) и производится автоматическая классификация походки. Этапы 7–8 обеспечивают визуализацию и экспорт результатов в форматы TXT-отчета, JSON, CSV и индустриального стандарта C3D. Этапы биомеханического анализа, клинической интерпретации и экспорта результатов представлены на рис. 2.

Характеристика валидационной выборки

Метрологическая валидация программного комплекса выполнена на пациенте с диагнозом «детский церебральный паралич, спастическая диплегия», паттерн Crouch gait, для которого имелся синхронный эталонный протокол маркерного анализа Qualisys. Антропометрические данные обследуемого: возраст 12 лет, мужской пол, рост 1,52 м, масса тела 65,5 кг, индекс массы тела 28,3 кг/м^2. Видеосъемка выполнена в режиме overground (ходьба по горизонтальной поверхности) двумя цифровыми видеокамерами с пространственным разрешением 1920×1080 пикселей и частотой кадров 30 Гц с дистанции 3,5 м от траектории движения. Калибровочная дистанция D_cal = 2,40 м обозначалась контрастными маркерами на полу.

Математическая модель и алгоритмы

Стереотриангуляция координат ключевых точек

Пусть пиксельные координаты *i*-й ключевой точки на изображениях двух камер заданы векторами

$$x_i = \left(u_i,\ v_i\right)^T,\ x'_i = \left(u'_i,\ v'_i\right)^T, \qquad (1)$$

где u_i и v_i – пиксельные координаты i-й ключевой точки на изображении первой камеры, u'_i и v'_i – ее координаты на изображении второй камеры, T – операция транспонирования.

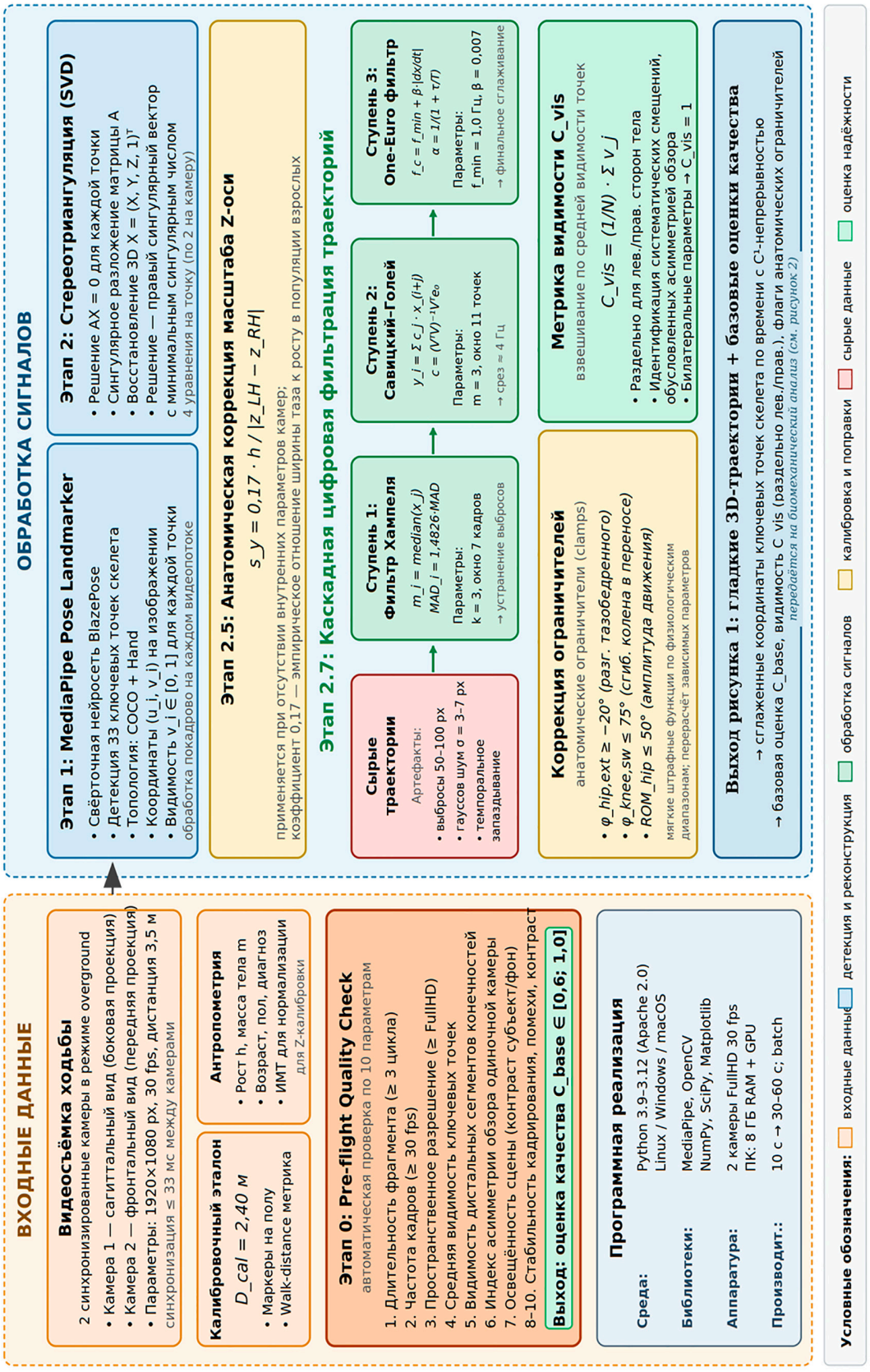


Рис. 1. Сбор видеоданных и обработка сигналов
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

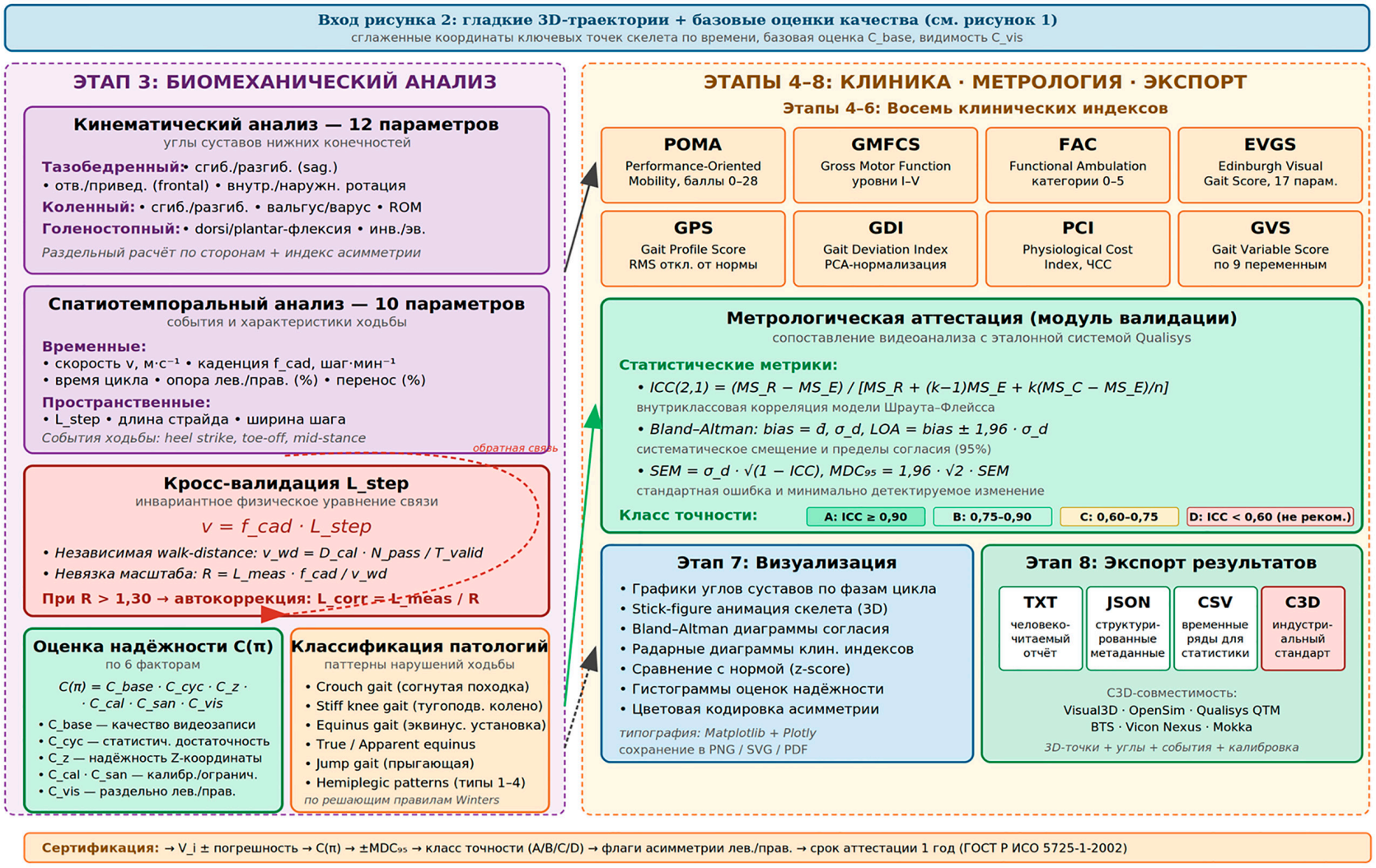


Рис. 2. Биомеханический анализ, клиническая интерпретация и экспорт результатов
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

Трехмерная координата $X = (X, Y, Z, 1)^T$ восстанавливается решением переопределенной системы линейных уравнений в однородных координатах:

$$\begin{aligned} \left(u_i P_i^3 - P_i^1\right) X = 0 \\ \left(v_i P_i^3 - P_i^2\right) X = 0 \\ \left(u_i' P_i'^3 - P_i'^1\right) X = 0 \\ \left(v_i' P'^3_i - P_i'^2\right) X = 0 \end{aligned}, \quad (2)$$

где P_i^j обозначает j-ю строку матрицы проекции i-й камеры размерности 3×4.

Объединение приведенных уравнений формирует матричную задачу $AX = 0$, решаемую методом сингулярного разложения (SVD):

$$A = U\Sigma V^T,\ X = v_{\min}, \quad (3)$$

где A – матрица системы уравнений (2); U и V – ортогональные матрицы левых и правых сингулярных векторов; Σ – диагональная матрица сингулярных чисел в порядке убывания; v_{min} – правый сингулярный вектор, соответствующий минимальному сингулярному числу.

Решением является правый сингулярный вектор матрицы A, соответствующий минимальному сингулярному числу. При отсутствии априорных данных о внутренних параметрах камер (фокусном расстоянии, главной точке) применяется анатомическая коррекция масштаба медиолатеральной оси, основанная на эмпирически установленной антропометрической пропорции:

$$s_y = \frac{0{,}17 \cdot h}{\left|z_{\mathrm{LH}} - z_{\mathrm{RH}}\right|}, \quad (4)$$

где s_y – корректирующий масштабный коэффициент медиолатеральной оси, h – антропометрический рост обследуемого, z_{LH} и z_{RH} – Z-координаты левого и правого тазобедренных суставов, коэффициент 0,17 представляет отношение среднестатистической ширины таза к росту в популяции.

Каскадная схема цифровой фильтрации траекторий

Сырые временные ряды координат ключевых точек, формируемые нейросетевым детектором, содержат три типа артефактов с различающимися статистическими характеристиками: одиночные выбросы амплитудой 50–100 пикселей, обусловленные ошибками детекции в отдельных кадрах; низкочастотный гауссов шум с среднеквадратичным отклонением 3–7 пикселей, связанный с тренировочной неопределенностью нейронной сети; систематическое запаздывание реакции на быстрые движения, обусловленное темпоральным сглаживанием в архитектуре детектора. Подавление каждого из выделенных типов шумов требует применения специализированного алгоритма фильтрации, что обусловливает целесообразность каскадной обработки по схеме: сырые траектории → фильтр Хампеля (устранение выбросов) → фильтр Савицкого – Голея (полиномиальное сглаживание) → One-Euro фильтр (адаптивное подавление шума) → гладкие траектории.

Первая ступень каскада – фильтр Хампеля – устраняет статистические выбросы посредством робастной оценки локальной дисперсии через медианное абсолютное отклонение (MAD) в скользящем окне:

$$m_i = \operatorname{median}\left(x_j : j \in \left[i-k,\ i+k\right]\right),$$

$$\mathrm{MAD}_i = 1{,}4826 \cdot \operatorname{median}\left(\left|x_j - m_i\right|\right), \quad (5)$$

$$\hat{x}_i = \begin{cases} x_i, \left|x_i - m_i\right| \le k \cdot \mathrm{MAD}_i \\ m_i, \left|x_i - m_i\right| > k \cdot \mathrm{MAD}_i \end{cases}, \quad (6)$$

где x_i – исходное значение сигнала в i-м кадре, $\hat{x}_i$ – его отфильтрованное значение, m_i – медиана сигнала в скользящем окне шириной $2k + 1$, MAD_i – медианное абсолютное отклонение в том же окне, 1,4826 – нормировочная константа, приводящая оценку MAD к стандартному отклонению гауссова распределения; $\mathbb{I}(\cdot)$ обозначает индикаторную функцию, $k = 3$ – пороговый коэффициент обнаружения выброса, ширина окна $2k + 1 = 7$ кадров эквивалентна временному интервалу 233 мс при частоте дискретизации 30 Гц.

Вторая ступень каскада – полиномиальная фильтрация Савицкого – Голея – реализует подавление высокочастотного шума посредством локальной аппроксимации скользящим полиномом степени m методом наименьших квадратов:

$$y_i = \sum_{j=-k}^{k} c_j x_{i+j}, \quad (7)$$

где y_i – сглаженное значение в i-м кадре, x_{i+j} – значения сигнала в окрестности ширины $2k + 1$ точек, c_j – весовые коэффициенты полиномиальной аппроксимации, индекс j пробегает значения от $-k$ до $+k$.

Коэффициенты c_j определяются однократной операцией псевдоинверсии матрицы Вандермонда V размерности $(2k+1)\times(m+1)$:

$$c = \left(V^T V\right)^{-1} V^T e_0, \quad (8)$$

Вектор e_0 представляет канонический базис с единичной координатой в центральной позиции. В программной реализации использованы параметры $m = 3$ (кубическая интерполяция, обеспечивающая C^1-непрерывность производной) и $k = 5$ (окно 11 точек, эффективный фильтр низких частот с частотой среза приблизительно 4 Гц).

Третья ступень каскада – адаптивный фильтр One-Euro [13] – реализует финальное сглаживание с динамическим балансом между подавлением остаточного шума и сохранением быстрых физиологических движений посредством экспоненциального фильтра низких частот первого порядка:

$$\hat{y}_i = \alpha\, x_i + (1-\alpha)\,\hat{y}_{i-1}, \qquad (9)$$

где x_i – входное значение сигнала в i-м кадре, $\hat{y}_i$ – выходное (сглаженное) значение, $\hat{y}_{i-1}$ – сглаженное значение в предыдущем кадре, $\alpha \in (0,1)$ – коэффициент сглаживания, определяющий степень влияния текущего измерения относительно предыстории.

Параметр α адаптивно изменяется в зависимости от мгновенной частоты среза, монотонно возрастающей пропорционально модулю производной сигнала:

$$f_c = f_{\min} + \beta \left|\frac{dx}{dt}\right|, \; \alpha = \frac{1}{1 + \dfrac{1}{2\pi f_c T}}, \qquad (10)$$

где f_c – текущая (адаптивная) частота среза фильтра, f_{min} – минимальная частота среза при стационарном сигнале, β – коэффициент адаптации к скорости изменения сигнала, $|dx/dt|$ – модуль производной входного сигнала, T – период дискретизации (обратная величина частоты кадров).

Эмпирически оптимизированные значения параметров: f_{min} = 1,0 Гц (минимальная частота среза при стационарном сигнале), β = 0,007 (коэффициент адаптации к скорости изменения сигнала), что соответствует рекомендациям [13] для биомеханических приложений с типичной шириной полосы локомоторного спектра до 6 Гц.

Алгоритмы коррекции анатомических ограничителей и кросс-валидации

Анатомически невозможные значения биомеханических параметров, формируемые в результате остаточных артефактов детекции и триангуляции, корректируются посредством системы ограничителей (clamps), функционирующих как мягкие штрафные функции относительно физиологических диапазонов. Применяемые правила: разгибание тазобедренного сустава $\varphi_{\text{hip,ext}} \geq -20°$; сгибание коленного сустава в фазе переноса $\varphi_{\text{knee,sw}} \leq 75°$; амплитуда движения в тазобедренном суставе $\text{ROM}_{\text{hip}} \leq 50°$. После активации ограничителя выполняется автоматический перерасчет всех зависимых производных параметров (амплитуд, моментов и индексов отклонения). Калибровка пиксельного масштаба продольной (переднезадней) оси характеризуется повышенной чувствительностью к угловым отклонениям оптических осей камер от плоскости, перпендикулярной направлению движения. Для автоматической верификации согласованности пиксельного масштаба применяется инвариантное физическое уравнение связи спатиотемпоральных параметров ходьбы:

$$v = f_{\text{cad}} \cdot L_{\text{step}}, \qquad (11)$$

где v – средняя скорость ходьбы, f_{cad} – каденция (частота шагов), L_{step} – средняя длина одного шага.

Скорость ходьбы независимо вычисляется методом walk-distance как отношение пройденной калиброванной дистанции к суммарной длительности валидных проходов:

$$v_{\text{wd}} = \frac{D_{\text{cal}} \cdot N_{\text{pass}}}{T_{\text{valid}}}, \qquad (12)$$

где D_{cal} – длина калибровочной дистанции, N_{pass} – количество валидных проходов в режиме overground, T_{valid} – суммарное время ходьбы в валидных интервалах.

Каденция f_{cad} определяется на основе временных интервалов между событиями heel strike (касание пяткой), детектируемыми по локальным экстремумам вертикального ускорения пяточной точки, и принципиально не зависит от пиксельного масштаба. Отношение масштабной невязки определяется выражением

$$R = \frac{L_{\text{measured}}}{L_{\text{expected}}} = \frac{L_{\text{measured}} \cdot f_{\text{cad}}}{v_{\text{wd}}}, \qquad (13)$$

где L_{measured} – измеренная пиксельным методом длина шага, L_{expected} – ожидаемое значение длины шага, вычисленное из инвариантного уравнения (11) через независимо полученные величины v_{wd} и f_{cad}. Отношение R характеризует масштабную невязку продольной оси.

При выполнении условия $R > 1{,}30$ диагностируется ошибка калибровки X-оси и активируется процедура автоматической коррекции масштаба:

$$L_{\text{step,corr}} = \frac{L_{\text{step,meas}}}{R}, \qquad (14)$$

где $L_{\text{step,meas}}$ – исходное (измеренное) значение длины шага, $L_{\text{step,corr}}$ – значение после масштабной коррекции, R – вычисленный по (13) коэффициент масштабной невязки.

Пороговое значение $R = 1{,}30$ эмпирически верифицировано на представительной выборке валидационных записей: значение пропускает допустимое смещение нейросетевого детектора ($R \le 1{,}25$ для здоровых обследуемых и пациентов с нарушениями походки), однако корректно идентифицирует грубые калибровочные ошибки ($R > 1{,}5$), типичные для записей с угловым смещением камеры более 25° от номинального положения.

Взвешенная оценка надежности измерений

Каждому измеренному параметру π автоматически присваивается мультипликативная оценка надежности $C(\pi) \in [0; 1]$, формируемая в виде произведения шести независимых факторов:

$$C(\pi) = C_{\text{base}} \cdot C_{\text{cyc}} \cdot C_z \cdot C_{\text{cal}} \cdot C_{\text{san}} \cdot C_{\text{vis}}, \quad (15)$$

где $C_{\text{base}} \in [0{,}6; 1{,}0]$ – базовая оценка качества видеозаписи, формируемая модулем pre-flight check; C_{cyc} – фактор статистической достаточности, монотонно возрастающий от 0,40 при числе обнаруженных циклов ходьбы менее 3 до 1,0 при числе циклов 10 и более; C_z – оценка надежности восстановления Z-координаты (1,0 для high, 0,5 для low); $C_{\text{cal}} \in \{0{,}7; 1{,}0\}$ – фактор наличия пространственной калибровки; $C_{\text{san}} = 0{,}3$ при срабатывании анатомического ограничителя для соответствующего параметра; C_{vis} – взвешивание по средней видимости ключевых точек анатомической стороны:

$$C_{\text{vis}} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} v_j, \quad (16)$$

где v_j – показатель видимости j-й ключевой точки анатомической стороны пациента (лево/право), N – общее число ключевых точек данной стороны, используемых для вычисления параметра.

Для билатеральных параметров (gait speed, cadence, double support time) принимается $C_{\text{vis}} = 1$. Раздельно вычисляются интегральные индексы надежности контралатеральных сторон тела как арифметическое среднее по всем параметрам соответствующей стороны. При выполнении условия $|C_{\text{left}} - C_{\text{right}}| > 0{,}20$ регистрируется значимая асимметрия надежности, требующая дифференцированной клинической интерпретации.

Методика метрологической аттестации

Метрологическая аттестация программного комплекса выполнена путем попарного сопоставления значений V_i, формируемых видеоанализом, и соответствующих эталонных значений M_i, получаемых маркерной системой Qualisys на одной и той же физической записи ходьбы пациента. Применен стандартизированный набор статистических метрик согласно международному руководству по оценке методов клинических измерений и рекомендациям ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002.

Внутриклассовый коэффициент корреляции (ICC) модели (2,1) – двухсторонняя случайная модель абсолютного согласия для одиночного измерения по классификации Шраута и Флейсса:

$$\text{ICC}(2,1) = \frac{MS_R - MS_E}{MS_R + (k-1)MS_E + \dfrac{k(MS_C - MS_E)}{n}}, \quad (17)$$

где MS_R, MS_C, MS_E – средние квадраты вариаций между объектами (subjects), между методами (raters) и остаточной соответственно; $k = 2$ – число сравниваемых методов, n – число параметров в выборке. Принятая четырехуровневая шкала классификации: $\text{ICC} \ge 0{,}90$ соответствует классу A научной точности; диапазон $0{,}75 \le \text{ICC} < 0{,}90$ – классу B клинической точности; $0{,}60 \le \text{ICC} < 0{,}75$ – классу C приемлемой точности; $\text{ICC} < 0{,}60$ – классу D, не рекомендованному к клиническому применению.

Метод Бленда – Альтмана количественно характеризует систематическое смещение и пределы согласия двух методов измерения посредством анализа распределения попарных разностей:

$$\text{bias} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} d_i, \; d_i = V_i - M_i, \quad (18)$$

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(d_i - \text{bias})^2}, \quad (19)$$

$$\text{LOA} = \text{bias} \pm 1{,}96\,\sigma_d, \quad (20)$$

где $d_i = V_i - M_i$ – попарная разность между значением V_i, полученным видеоанализом, и эталонным значением M_i маркерной системы для i-го параметра, bias – среднее систематическое смещение методов, σ_d – стандартное отклонение попарных разностей, S – выборочное стандартное отклонение всех измерений (совокупная дисперсия значений обеих методик), n – число сопоставляемых параметров, LOA (Limits of Agreement) – 95 %-ные пределы согласия двух методов измерения.

Стандартная ошибка измерения (SEM) характеризует дисперсию повторных из-

мерений одного параметра и определяется через ICC посредством соотношения

$$\mathrm{SEM} = \mathrm{S}\cdot\sqrt{1-\mathrm{ICC}}\,, \qquad (21)$$

где SEM – стандартная ошибка измерения, выраженная в единицах измеряемой величины; *S* – выборочное стандартное отклонение всех измерений (величина, определяемая после формулы (22)); ICC – внутриклассовый коэффициент корреляции, рассчитанный по (17).

Минимально детектируемое изменение параметра определяется как наименьший сдвиг, статистически значимо превышающий шум измерения с доверительной вероятностью 95 %:

$$\mathrm{MDC}_{95} = 1{,}96\cdot\sqrt{2}\cdot\mathrm{SEM}\,, \qquad (22)$$

где MDC_{95} – минимально детектируемое изменение параметра на уровне доверительной вероятности 95 %; SEM – стандартная ошибка измерения, определенная по (21); множитель $1{,}96\cdot\sqrt{2}$ учитывает, что сравниваются два независимых измерения одной величины (каждое – со своей ошибкой SEM), и критерий соответствует двухстороннему 95 %-доверительному интервалу нормального распределения.

Параметр MDC_{95} имеет принципиальное клиническое значение при мониторинге результатов реабилитационного вмешательства: изменения биомеханических показателей, не превышающие установленного значения MDC_{95}, не могут квалифицироваться как достоверный терапевтический эффект.

Результаты исследования и их обсуждение

Сопоставление спатиотемпоральных параметров

Результаты сопоставления спатиотемпоральных характеристик, формируемых разработанным программным комплексом, с эталонными значениями маркерной системы Qualisys представлены в табл. 1.

Все спатиотемпоральные параметры демонстрируют отличное согласие с эталонными значениями (абсолютная относительная погрешность не превышает 2,2 %). Внутриклассовый коэффициент корреляции спатиотемпорального блока составил ICC(2,1) = 1,000, что соответствует классу А научной точности.

Сопоставление кинематических параметров

Результаты сопоставления амплитуд движений (Range of Motion, ROM) в суставах нижних конечностей представлены в табл. 2.

Таблица 1

Сопоставление спатиотемпоральных параметров

Параметр	Видео V	Маркер *M*	Δ = *V* − *M*	Категория
Скорость, м·с$^{-1}$	0,82	0,84	−0,02	Надежно
Каденция, шаг·мин$^{-1}$	108,07	107,76	+0,31	Надежно
Опора лев., %	67,74	67,40	+0,34	Надежно
Опора прав., %	66,83	68,30	−1,47	Надежно
Длина шага лев., м	0,574	0,580	−0,006	Надежно
Длина шага прав., м	0,528	0,535	−0,007	Надежно

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 2

Амплитуды движений в суставах нижних конечностей (градусы)

Сустав	Сторона	Видео *V*	Маркер *M*	Δ
Тазобедренный	Лев.	40,89	37,20	+3,69
Тазобедренный	Прав.	46,53	38,80	+7,73
Коленный	Лев.	45,69	37,20	+8,49
Коленный	Прав.	45,33	38,80	+6,53
Голеностопный	Лев.	13,89	10,70	+3,19
Голеностопный	Прав.	20,32	12,90	+7,42

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Идентифицировано систематическое положительное смещение значений углов суставов в диапазоне +3,2° ÷ +8,5°, характерное для сопоставления безмаркерного видеоанализа с маркерными системами и обусловленное фундаментальным различием анатомической локализации ключевых точек: нейросетевой детектор MediaPipe определяет суставные центры на поверхности кожи, тогда как маркерный протокол Plug-in-Gait использует биомеханические модели Newington-Helen Hayes с поправками на положение анатомических ориентиров под маркерами. Указанное смещение является воспроизводимой характеристикой пары методов и не препятствует клиническому применению.

Метрологические показатели аттестации

Консолидированные метрологические характеристики разработанного программного комплекса представлены в табл. 3, графический анализ согласия методов – на рис. 3.

Согласно полученным метрологическим характеристикам, разработанный программный комплекс аттестован по классу В общему (предельно допускаемая погрешность ±11,95° для угловых параметров и ±50 мс для временных интервалов) с присвоением класса А научной точности для сагиттальной плоскости и спатиотемпорального блока. Срок действия метрологической аттестации составляет один год с обязательной повторной верификацией.

Таблица 3

Метрологические показатели аттестации

Показатель	Значение	Оценка
ICC(2,1) общий	0,902	Класс А
ICC(2,1) сагиттальный	0,902	Класс А
ICC(2,1) спатиотемпоральный	1,000	Класс А
Bland-Altman bias, °	+6,18	Систем. смещение
Bland-Altman σd, °	2,22	Стандарт. отклонение
LOA, °	[+1,82; +10,53]	95 % дов. интервал
SEM, °	4,31	Ошибка измерения
MDC_{95}, °	11,95	Мин. детект. изменение
RMSE сагиттальный, °	6,50	Среднеквадр. ошибка

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

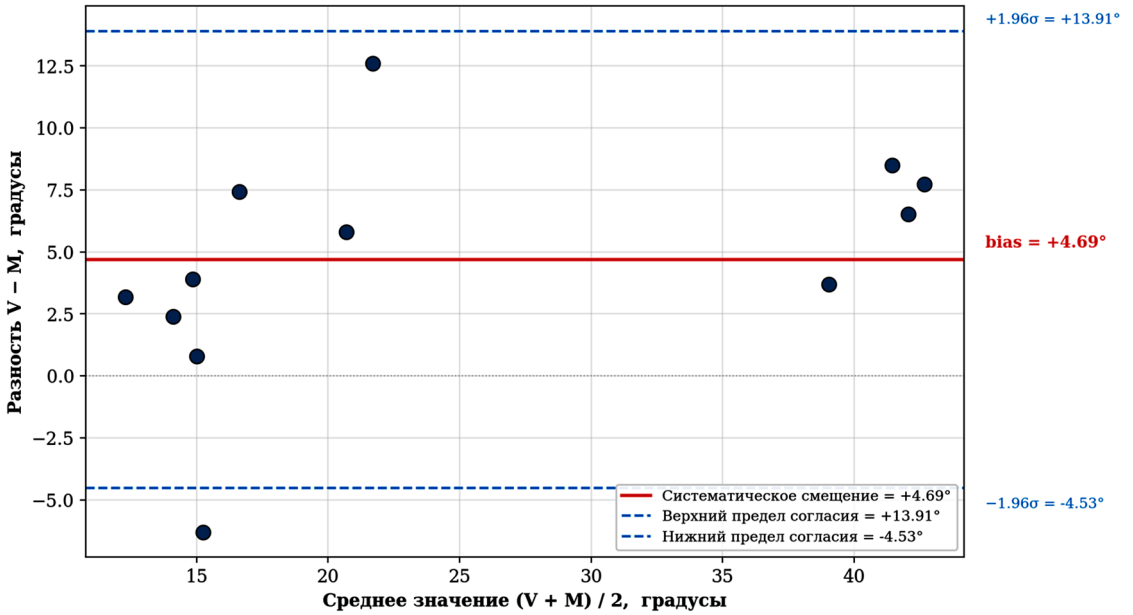


Рис. 3. Диаграмма Бленда – Альтмана для углов суставов
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

Верификация алгоритма кросс-валидации длины шага

Эффективность предложенного алгоритма автоматической самокоррекции, описанного формулами (11)–(14), верифицирована на дополнительной обследуемой – здоровой девочке возрастом 12 лет с ростом 1,50 м. До применения алгоритма результаты обработки демонстрировали нарушение инвариантного физического уравнения (11): измеренное значение $L_{measured}$ = 1,012 м при v_{wd} = 1,095 м·с$^{-1}$ и f_{cad} = 107,3 шаг·мин$^{-1}$ соответствует ожидаемому значению $L_{expected}$ = 0,612 м, что определяет отношение масштабной невязки R = 1,652. Указанное значение существенно превышает установленный пороговый критерий R = 1,30, что инициирует активацию процедуры коррекции.

После применения корректирующего преобразования (14) скорректированные параметры приобрели физиологически правомерные значения: L_{step}, L = 0,612 м, L_{step}, R = 0,613 м, ширина шага скорректирована с 0,178 до 0,108 м, что соответствует возрастно-половым нормативам. Балл диагностической шкалы POMA-Gait возрос с 11/12 до 12/12 за счет нормализации показателя ширины шага. При этом первичные физически инвариантные параметры (gait speed, cadence) сохранили исходные значения, что подтверждает корректность алгоритмической логики.

Достигнутый уровень внутриклассовой корреляции ICC = 0,902 в сагиттальной плоскости соответствует требованиям к научно-исследовательскому уровню точности и согласуется с результатами зарубежных исследований сопоставления безмаркерных и маркерных систем: Wade et al. [5] для коленного сустава ICC = 0,87; Stenum et al. [14] ICC=0,89; Kanko et al. [15] ICC = 0,84–0,93. Идентифицированное систематическое смещение углов +6,18±2,22° представляет воспроизводимую характеристику пары методов и допускает учет калибровочной поправкой при продольных мониторинговых исследованиях.

Преимуществами разработанного программного комплекса являются: открытость исходного кода под лицензией Apache 2.0; использование стандартного видеооборудования без специализированной лаборатории; интегрированные алгоритмы автоматической коррекции артефактов; экспорт в формат C3D для совместимости с Visual3D, OpenSim, Qualisys Track Manager. Ограничения метода обусловлены применением двухкамерной конфигурации: фронтальная плоскость аттестуется по классу C (ICC ≈ 0,65–0,75) вследствие низкой надежности восстановления Z-координаты. Повышение класса фронтальной аттестации до B требует расширения системы до 3–4-камерной конфигурации.

Заключение

Разработан программный комплекс трехмерного безмаркерного видеоанализа биомеханики ходьбы, реализующий полный технологический цикл от детекции ключевых точек нейросетевыми методами до клинической интерпретации с использованием восьми международно признанных диагностических индексов. Предложены три оригинальных алгоритмических решения: каскадная схема многоступенчатой цифровой фильтрации траекторий, объединяющая фильтр Хампеля, сглаживание Савицкого – Голея и адаптивный One-Euro фильтр; алгоритм автоматической кросс-валидации длины шага через инвариантное физическое уравнение связи скорости и каденции с самокоррекцией ошибок калибровки; взвешенная по показателю видимости метрика надежности измерений раздельно для контралатеральных конечностей. Метрологическая аттестация продемонстрировала ICC = 0,902 в сагиттальной плоскости (класс А научной точности). Программный комплекс аттестован по классу В общему с предельно допускаемой погрешностью ±11,95° для угловых параметров и ±50 мс для временных интервалов.

Список литературы

1. Борзиков В. В., Рукина Н. Н., Кузнецов А. Н., Белова А. Н. Объективизация двигательных нарушений у детей с церебральным параличом: состояние вопроса // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2018. Т. 6. № 1. С. 67–77. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32652347 (дата обращения: 22.04.2026). DOI: 10.17816/PTORS6167-77.

2. Королева С. В. Технология объективной оценки двигательных нарушений в динамике реабилитации у больных травматолого-ортопедического профиля // Физическая и реабилитационная медицина. 2022. Т. 4. № 1. С. 47–52. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48319076 (дата обращения: 22.04.2026). DOI: 10.26211/2658-4522-2022-4-1-47-52.

3. Прокопенко С. В., Ондар В. С., Аброськина М. В., Прокопенко В. С., Живаев В. П., Субочева С. А., Исмаилова С. Б. Оценка функции ходьбы в неврологической практике // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. 2019. № 119 (5). С. 120–125. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39130996 (дата обращения: 22.04.2026). DOI: 10.17116/jnevro2019119051120.

4. Агапов А. А., Небаба А. Н. Интеллектуальные системы захвата движений: виды, преимущества, применение // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2019. № 2. С. 5–7. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41116266 (дата обращения: 02.06.2026). eLIBRARY ID: 41116266.

5. Wade L., Needham L., McGuigan P., Bilzon J. Applications and limitations of current markerless motion capture methods for clinical gait biomechanics // PeerJ. 2022 Feb 25.

Vol. 10. e12995. DOI: 10.7717/peerj.12995. PMID: 35237469; PMCID: PMC8884063.

6. Ripic Z., Nienhuis M., Signorile J. F., Best T. M., Jacobs K. A., Eltoukhy M. A comparison of three-dimensional kinematics between markerless and marker-based motion capture in overground gait // J Biomech. 2023 Oct. Vol. 159. P. 111793. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2023.111793. Epub 2023 Sep 7. PMID: 37725886.

7. Huang T., Ruan M., Huang S., Fan L., Wu X. Comparison of kinematics and joint moments calculations for lower limbs during gait using markerless and marker-based motion capture // Front Bioeng Biotechnol. 2024 Mar 12. Vol. 12. P. 1280363. DOI: 10.3389/fbioe.2024.1280363. PMID: 38532880; PMCID: PMC10963629.

8. Park Y. S., Yu Y. W., Cha H., Lee J. S., Yoon C., Kim B. H., Park J. H., Lee K. K. Verification of Markerless Gait Analysis: Multi-Camera and Single-Camera Approaches in Comparison to Marker-Based Gait Analysis // Medicina (Kaunas). 2026 Feb 22. Vol. 62 (2). P. 418. DOI: 10.3390/medicina62020418. PMID: 41752816; PMCID: PMC12942615.

9. De Borba E. F., Storniolo J. L., Cerfoglio S., Capodaglio P., Cimolin V., Peyré-Tartaruga L. A., Tartaruga M. P., Cavallari P. Effect of Walking Speed on the Reliability of a Smartphone-Based Markerless Gait Analysis System // Sensors (Basel). 2025 Oct 20. Vol. 25 (20). P. 6474. DOI: 10.3390/s25206474. PMID: 41157527; PMCID: PMC12568194.

10. Ali M. M., Medhat Hassan M., Zaki M. Human Pose Estimation for Clinical Analysis of Gait Pathologies // Bioinform Biol Insights. 2024 May 15. Vol. 18:11779322241231108. DOI: 10.1177/11779322241231108. PMID: 38757143; PMCID: PMC11097739.

11. Dill S., Ahmadi A., Grimmer M., Haufe D., Rohr M., Zhao Y., Sharbafi M., Hoog Antink C. Accuracy Evaluation of 3D Pose Reconstruction Algorithms Through Stereo Camera Information Fusion for Physical Exercises with MediaPipe Pose // Sensors (Basel). 2024 Dec 4. Vol. 24 (23). P. 7772. DOI: 10.3390/s24237772. PMID: 39686309; PMCID: PMC11644880.

12. Kayış H., Gedizlioğlu Ç. Leveraging point-of-view camera and MediaPipe for objective hyperactivity assessment in preschool ADHD // Front Psychiatry. 2026 Mar 4. Vol. 17:1769322. DOI: 10.3389/fpsyt.2026.1769322. PMID: 41858646; PMCID: PMC12996202.

13. Casiez G., Roussel N., Vogel D. 1€ Filter: A Simple Speed-based Low-pass Filter for Noisy Input in Interactive Systems // CHI'12, the 30th conference on Human Factors in Computing Systems, May 2012, Austin, United States. P. 2527–2530. URL: https://inria.hal.science/hal-00670496/document (дата обращения: 03.05.2026). DOI: 10.1145/2207676.2208639.

14. Stenum J., Rossi C., Roemmich R. T. Two-dimensional video-based analysis of human gait using pose estimation // PLoS Comput Biol. 2021 Apr 23. Vol. 17 (4). P. e1008935. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1008935. PMID: 33891585; PMCID: PMC8099131.

15. Kanko R. M., Laende E. K., Davis E. M., Selbie W. S., Deluzio K. J. Concurrent assessment of gait kinematics using marker-based and markerless motion capture // J Biomech. 2021 Oct 11. Vol. 127. P. 110665. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2021.110665. Epub 2021 Aug 3. PMID: 34380101.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: работа выполнена в рамках договора от 29 апреля 2025 г. № 0608-28_25-2НИР на выполнение научно-исследовательских работ по теме «Система сбора данных на основе метода безмаркерного видеоанализа на базе технологии искусственного интеллекта для оценки выраженности двигательных нарушений ходьбы пациентов в системе комплексной управляемой реабилитации», заключенного между автономной некоммерческой организацией «Московский центр инновационных технологий в здравоохранении» и обществом с ограниченной ответственностью «Агентство «АСТ», на основании Соглашения № 0608-28/25 от 20 марта 2025 г., заключенного между автономной некоммерческой организацией «Московский центр инновационных технологий в здравоохранении» и государственным бюджетным учреждением здравоохранения города Москвы «Научно-практический центр детской психоневрологии Департамента здравоохранения города Москвы» о предоставлении гранта на реализацию научно-практического проекта в сфере медицины: «Система комплексной управляемой реабилитации детей с двигательными нарушениями на примере детей с ДЦП».

Financing: The work was performed within the framework of the contract dated 04/29/2025 No. 0608-28_25-2NIR for research on the topic "A data collection system based on the method of marker-free video analysis based on artificial intelligence technology to assess the severity of motor walking disorders in patients in a comprehensive guided rehabilitation system", concluded between the Autonomous Non-profit Organization Moscow Center for Innovative Technologies in Healthcare and the AST Agency Limited Liability Company, based on Agreement No. 0608-28/25 dated March 20, 2025, the agreement concluded between the Autonomous Non-profit Organization "Moscow Center for Innovative Technologies in Healthcare" and the State Budgetary Healthcare Institution of Moscow "Scientific and Practical Center for Pediatric Neuropsychiatry of the Moscow Department of Health" on the grant for the implementation of a scientific and practical project in the field of medicine: "A system of integrated guided rehabilitation of children with motor disorders using the example of children with cerebral palsy".

УДК 004.912
DOI 10.17513/snt.40815

CC BY 4.0

НЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ СМЫСЛОВОГО ПРОСТРАНСТВА В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕОРИИ СЕМАНТИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Вишняков Ю. М., Вишняков Р. Ю.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный университет", Краснодар, Российская Федерация, e-mail: renat.vishnyakov@mail.ru

На социальное взаимодействие значительное влияние оказывают большие языковые модели и искусственный интеллект. Их эффективность обеспечивается большими вычислительными и финансовыми ресурсами, доступными лишь крупным корпорациям, но при этом модели требуют дообучения и обладают низкой конфиденциальностью. Однако ряд задач обработки естественного языка может решаться менее ресурсозатратным способом без обращения к большим языковым моделям – например, на основе вычислительной теории семантической интерпретации, где семантика моделируется функционалом смысла и вычислительными процедурами над функционалом смысла. Цель исследования – развитие данной теории путем дополнения ее нечеткой моделью семантического значения. В работе рассматриваются ключевые элементы теории: операция контекстного уточнения смысла, функционал смысла в нотации, подобной обратной польской записи. Теория дополняется геометрической интерпретацией в виде круга значимости и функцией значимости, которые полагаются в основу нечеткого множества. Вводится различение универсального и индивидуального множеств смыслов слова, где последнее представляет модель индивидуального смыслового пространства. Формулируется динамика обучения (расширение множества смыслов, изменение значимости с учетом забывания) и числовая мера взаимопонимания между субъектами на основе индекса сходства нечетких множеств. Использование нечеткости позволяет формализовать понятие смысла с учетом его множественности, субъективности и динамики усвоения. Предложенный подход ориентирован на создание формальных методов и алгоритмов обработки естественно-языковой информации, учитывающих субъективную природу смыслов.

Ключевые слова: естественно-языковая обработка, вычислительная теория семантической интерпретации, функционал смысла, нечеткая формальная модель, круг значимости, функция значимости, нечеткое множество, динамика обучения, взаимопонимание

A FUZZY MODEL OF THE SEMANTIC SPACE IN THE COMPUTATIONAL THEORY OF SEMANTIC INTERPRETATION

Vishnyakov Yu. M., Vishnyakov R. Yu.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kuban State University", Krasnodar, Russian Federation, e-mail: renat.vishnyakov@mail.ru

Large language models and artificial intelligence have a significant impact on social interaction. Their effectiveness is ensured by large computational and financial resources available only to large corporations, while the models require fine-tuning and have low confidentiality. However, a number of natural language processing tasks can be solved in a less resource-intensive way without resorting to large language models, for example, on the basis of a computational theory of semantic interpretation, where semantics is modeled by a meaning functional and computational procedures over the meaning functional. The aim of the study is to develop this theory by supplementing it with a fuzzy model of semantic meaning. The paper examines the key elements of the theory: the operation of contextual clarification of meaning, the meaning functional in notation similar to reverse Polish notation. The theory is supplemented by a geometric interpretation in the form of a circle of significance and a significance function, which are taken as the basis of a fuzzy set. A distinction is introduced between the universal and individual sets of word meanings, the latter representing a model of the individual semantic space. The dynamics of learning (expansion of the set of meanings, change in significance taking into account forgetting) and a numerical measure of mutual understanding between subjects based on the similarity index of fuzzy sets are formulated. The use of fuzziness makes it possible to formalize the concept of meaning taking into account its multiplicity, subjectivity, and dynamics of acquisition. The proposed approach is aimed at creating formal methods and algorithms for natural language processing that take into account the subjective nature of meanings.

Keywords: natural language processing, computational theory of semantic interpretation, meaning functional, fuzzy formal model, circle of significance, function of significance, fuzzy set, learning dynamics, mutual understanding

Введение

Сегодня социальное взаимодействие формируют большие языковые модели (LLM) [1–3]. Они сопряжены с искусственным интеллектом (ИИ) [4–6], поддерживаются вычислительными и финансовыми ресурсами, посильными крупным корпорациям. Пользователь общается с ИИ на естественном языке (ЕЯ) через интеллектуальные чат-боты типа ChatGPT [7], DeepSeek [8], LLaMA, Gemini и др., но дружественность общения не гарантирует конфиден-

циальность. Информация накапливается в дата-центрах, формируя цифровой портрет пользователя, и такой процесс является неотъемлемой частью глубокого машинного обучения (Deep Learning) [9]. Он явно проявляется в маркетплейсах и чат-ботах [9; 11]. LLM имеют корни в модели BERT [12], и на сегодня создано много инструментов и технологий по естественно-языковой обработке (NLP), называемых совместно Бертологией.

И тем не менее в ряде задач использование LLM избыточно и затратно, что формирует предпосылки к поиску иных подходов. Так, в работах Ю. М. Вишнякова и Р. Ю. Вишнякова [13] развивается вычислительная теория семантической интерпретации, где семантика текстовых фрагментов моделируется вычислительными процедурами. В их же работах [14; 15] представлены формальная модель семантического объекта и алгоритмы поиска текстов заданной семантической направленности, а в [16] описан программный комплекс поиска семантических следов объектов. Решения восходят к формально-грамматическому подходу работы авторов А. Ахо, Дж. Ульман [17, с. 103–241], допускают математическую оценку результатов и не требуют значительных вычислительных ресурсов.

Цель исследования – дополнить вычислительную теорию семантической интерпретации нечеткой моделью индивидуального семантического пространства, отражающей субъективный смысл слова.

Материал и методы исследования

Обсудим ключевые элементы вычислительной теории семантической интерпретации. Пусть задана цепочка q слов a_i, представляющая целостный по смыслу текстовый фрагмент (предложение или его часть):

$$q = a_1 a_2 \ldots a_n . \quad (1)$$

Целостность означает, что все слова входят в словосочетания и образуют отношение непосредственного подчинения на множестве слов фрагмента.

Обозначим через $S(a_i)$ множество смысловых значений слова a_i, тогда множество $S(q)$ смысловых значений q (1) в общем виде представляется функционалом Ф вида

$$S(q) = \Phi\left(S(a_1), S(a_2), \ldots, S(a_n)\right), \quad (2)$$

который назовем функционалом смысла.

Выделим в q какое-либо словосочетание ab (a – главное, b – зависимое слова) и представим смысловую зависимость (стрелка показывает направление) записью вида

$$\overrightarrow{a:b}, \quad (3)$$

Смысловое значение словосочетания есть подмножество смысловых значений его главного слова, формируемое смыслом зависимого слова (контекстом). Оно по форме напоминает условную вероятность и может быть представлено в подобной нотации:

$$S\left(\overrightarrow{a:b}\right) = S(a)|_{S(b)} . \quad (4)$$

$$S\left(\overrightarrow{a:b}\right) \subset S(a),\ S\left(\overrightarrow{a:b}\right) \neq S\left(\overrightarrow{b:a}\right),\ S\left(\overrightarrow{a:a}\right) = S(a). \quad (5)$$

Введем для словосочетания операцию контекстного уточнения смысла вида

$$S\left(\overrightarrow{a:b}\right) = S(a)\overrightarrow{\cap}S(b), \quad (6)$$

где $\overrightarrow{\cap}$ – операция контекстного уточнения смысла (стрелка задает направление выполнения операции) и второе тождество (5) указывает на ее несимметричность.

Если слово a – главное слово в нескольких словосочетаниях и $b_1, b_2, \ldots, b_p$ – зависимые слова, то контекстной связкой слова а называется запись:

$$\overrightarrow{a:\{b_1, b_2 \ldots b_p\}}, \quad (7)$$

Распространив (6) на контекстную связку (7), получим пересечение множеств вида

$$S\left(\overrightarrow{a:\{b_1, b_2 \ldots b_p\}}\right) = S\left(\overrightarrow{a:b_1}\right) \cap S\left(\overrightarrow{a:b_2}\right) \cap \ldots \cap S\left(\overrightarrow{a:b_p}\right), \quad (8)$$

$$S\left(\overrightarrow{a:(b_1, \ldots, b_p)}\right) = \cap_1^p S\left(\overrightarrow{a:b_i}\right), \quad (9)$$

Если слово a_i главное слово в q (1), то из (6) и (9) следует

$$S(q) \subset S(a_i), \quad (10)$$

Раскрывая выражение *S(q)* (6) с учетом (6), (8) и (9), получим формульное представление функционала смысла фрагмента *q* в виде

$$q = «\underbrace{международное}_{a}\ \underbrace{признание}_{b}\ \underbrace{образовательных}_{c}\ \underbrace{программ}_{d}\ \underbrace{российских}_{e}\ \underbrace{вузов}_{f}» \qquad (11)$$

Закодируем слова латинскими буквами, тогда смысловое значение S(*q*) принимает вид

$$S(q) = \left(S(b)\overleftarrow{\cap}S(a)\right) \cap S(b)\overrightarrow{\cap}\left(\left(S(d)\overleftarrow{\cap}S(c)\right) \cap \left(\left(S(d)\overrightarrow{\cap}\left(S(f)\overleftarrow{\cap}S(e)\right)\right)\right)\right). \qquad (12)$$

В построенных по правилам [17, с. 55–67] синтаксических деревьях (рис. 1) для (6), (9) и (12) из-за несимметричности операций контекстного уточнения смысла в их узлах стрелка поменяла направление на обратное, а ветвь главного слова в кусте стала последней.

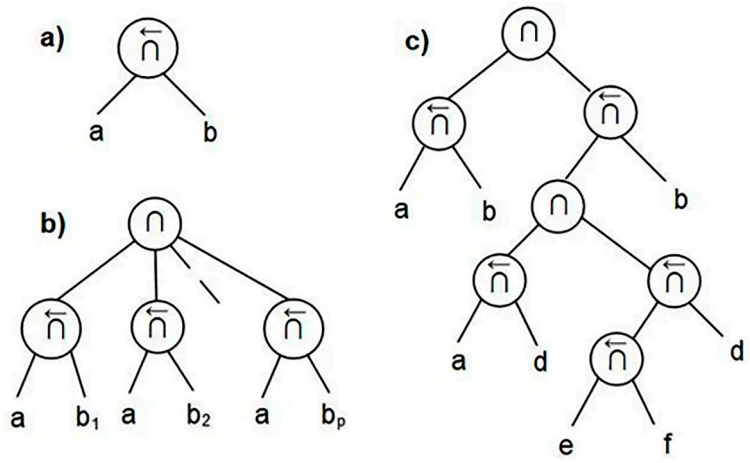


Рис. 1. Синтаксические деревья: a)операции контекстного уточнения смысла, b) контекстной связки и c) функционала смысла
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

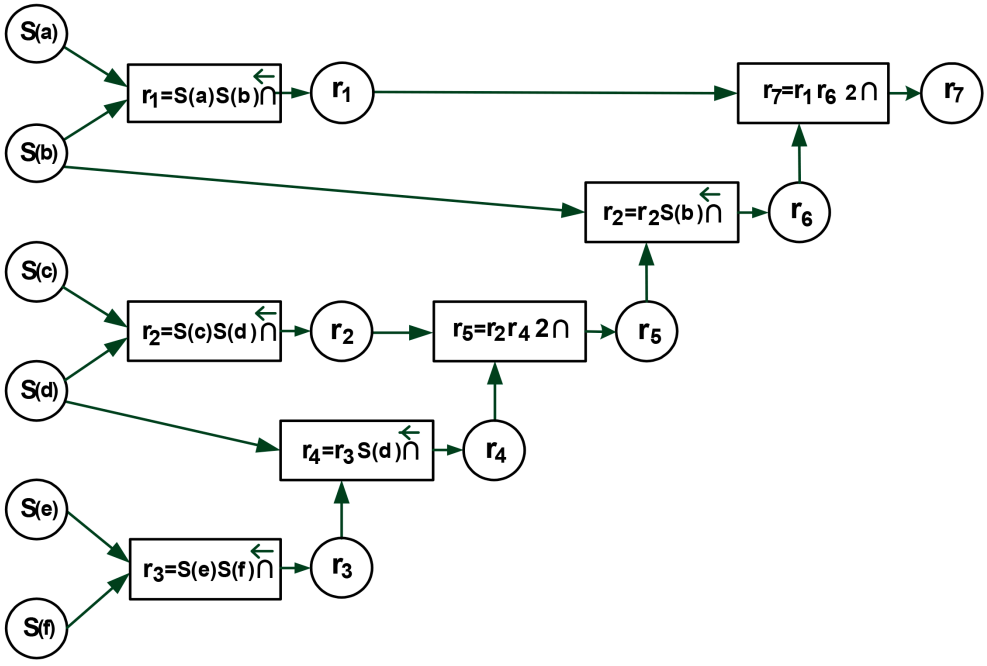


Рис. 2. Семантическая схема функционала смысла q
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Результаты обходов деревьев (рис. 1) представляют ОПЗ-подобные нотации вида

$$S(\overrightarrow{a:b}) = S(b)S(a)\curvearrowright \tag{13}$$

$$S\left(\overrightarrow{a:(b_1,...,b_p)}\right) = \underbrace{S(b_1)S(a)}_{1}\curvearrowright \underbrace{S(b_2)S(a)}_{2}\curvearrowright ... \underbrace{S(b_p)S(a)}_{p}\curvearrowright \underbrace{p\curvearrowright}. \tag{14}$$

$$S(q) = S(a)S(b)\curvearrowright S(c)S(d)\curvearrowright S(e)S(f)\curvearrowright S(d)\curvearrowright \curvearrowright S(b)\curvearrowright \curvearrowright . \tag{15}$$

При вычислении (15) выполняется самая левая операция, результат сохраняется в переменной *r,* замещая в строке операцию с операндами, далее процесс повторяется. Графическое представление вычислительной процедуры (рис. 2) называется семантической схемой.

В семантической схеме прямоугольные элементы (элементы смысла) представляют операции, круглые – их входы и выходы. Если текстовый фрагмент *q* представлен *n* элементами смысла, *m* из которых содержатся в схеме фрагмента *t*, то критерий семантической близости (*q, t*) равен *m*/*n*. Таким образом сравнение фрагментов сводится к сравнению вычислительных процедур, в которых слова представляют переменные.

В естественном языке слово и смысл образуют неразрывную пару (*x,S*(*x*)), слово как знак объективно (написано, произнесено), смыслом владеет субъект. В речевых актах (чтение, письмо, разговор) субъект интерпретирует слова и придает им определенные смысловые значения, возможно и новые. Например, во фрагменте (11) слово *x = "признание"* относится к образовательным программам вуза, отвечающим международным требованиям, это смысловое значение раскрывается функционалом смысла (12), (15) или семантической схемой (рис. 2). В иных случаях слову «признание» можно придать другие смыслы (признание заслуг, признание в любви и пр.), актуализируемые другими контекстными окружениями.

Например, для слова «яблоко» множество *S*(*яблоко*) можно представить в виде

$$S(\text{яблоко}) = \{S(\text{яблоко},y)y \in Y\},$$

где Y = {кислое, кисло-сладкое, сладкое, терпкое,…} – вкусовая гамма.

При дополнении вкусовых качеств размерами элементы *S*(*яблоко,Y*) могут быть сами множествами, например,

{*S*(*яблоко сладкое маленькое*), *S*(*яблоко сладкое среднее*), …}.

Подобным образом вводятся цвет, форма и пр., включая стилизованный логотип Apple. Но и тогда многообразие смыслов слова «яблоко» не исчерпывается. В пределе множество смыслов «человека собирательного», включающее существовавшие, существующие и будущие смыслы слова x, определим как потенциально бесконечный универсум $S_{\text{univ}}(x)$. Ограниченное множество смыслов (смысловое пространство) $S^{p}_{ind}(x)$ конкретного человека *p* формируется жизненным опытом, поэтому оно ограничено. Также смысловые пространства людей одной культурной-профессиональной группы схожи, что подметил профессор В. В. Налимов в работе [18, с. 65–109]. В дальнейшем бесконечность универсума $S_{\text{univ}}(x)$ и конечность $S^{p}_{ind}(x)$ считаем модельным допущением.

Поставим в соответствие множеству $S_{\text{univ}}(x)$ круг с центром в слове *x*. Элементы $S_{\text{univ}}(x)$ упорядочим по концентрическим окружностям: на меньшем радиусе – наиболее привычные смысловые значения с равными значимостями, далее – менее привычные и т. д. Данный круг назовем кругом значимости смысловых значений слова.

Определим для радиусов окружностей круга значимости меру длины, для чего представим множество радиусов $R(x)$ упорядоченным множеством в виде

$$R(x) = \{r_i i = 1,2,\ldots,n; \text{где } r_i < r_{i+1} \text{ и } n \to \infty\}. \tag{16}$$

Введем функцию значимости смыслового значения, ставящую в соответствие каждому *i*-му частному смыслу слова *x* некоторую величину μ_i, вида

$$\mu : S_{\text{univ}}(x) \to [0,1], \tag{17}$$

$$0 \le \mu_i \le 1. \tag{18}$$

При $\mu_i \to 1$ значимость смысла повышается (окружность сдвигается к центру круга), при $\mu_i \to 0$ – понижается (окружность удаляется от центра). График $\mu(R)$ представлен на рис. 3.

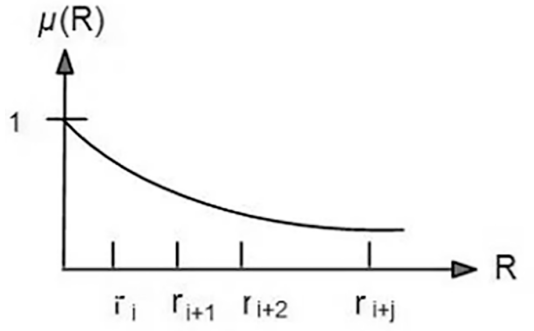


Рис. 3. Функция значимости смыслового значения
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Для $\mu_i = f(S_{univ}(x))$ можно выбрать разные формульные представления, например:

$$\mu = e^{-kR}, k > 0. \quad (19)$$

Но более привычна и понятна функция, обратная радиусу окружности круга значимости:

$$\mu = \frac{1}{1+R}. \quad (20)$$

Если для слова «яблоко» привычен смысл «сладкое яблоко», менее привычен – «кислое яблоко» и совсем не привычен «яблоко – логотип Apple» и если расположить их на концентрических окружностях $r_1 = 0{,}5$, $r_2 = 1{,}0$, $r_3 = 2{,}0$, то из формулы (20) получим их смысловые значения $\mu_1 = 0{,}67$, $\mu_2 = 0{,}5$, $\mu_3 = 0{,}33$, убывающие с удалением от центра. Круг значимости и монотонность убывания функции значимости считаются модельными допущениями.

Пусть в паре $(s_i(x), \mu_i)$ $s_i(x)$ – смысловое значение слова x и μ_i – мера его значимости. Интерпретируем μ_i смысл как степень принадлежности нечеткой логики Лютфи Заде [19]. Тогда совокупность пар образует нечеткое множество $\tilde{S}_{univ}(x)$ универсума $S_{univ}(x)$:

$$\tilde{S}_{univ}(x) = \left\{ \left(s_j(x), \mu_i \right) i, j = 1,2,\ldots,n,\ n \to \infty \right\}. \quad (21)$$

По аналогии с (21) индивидуальный круг значимости смысловых значений слова x конкретного человека p представим также нечетким множеством $\tilde{S}^{(p)}_{ind}(x)$ вида

$$\tilde{S}^{(p)}_{ind}(x) = \left\{ \left(s_j(x), \mu_i \right) i, j = 1,2,\ldots,m \right\},\ m < \infty. \quad (22)$$

Пространства $\tilde{S}_{univ}(x)$ и $\tilde{S}^{(p)}_{ind}(x)$ различаются, поскольку субъект p не может вместить всего многообразия смыслов универсума, но, обучаясь, модифицирует $\tilde{S}^{(p)}_{ind}(x)$ добавлением новых смыслов или изменением значимости существующих. При этом источником обучения является контекстное окружение слова в речевом акте. Обсудим теперь модели обучения.

Если слово x употребляется в ранее неизвестном субъекту значении S_{new}, то оно включается в $\tilde{S}^{(p)}_{ind}(x)$:

$$\tilde{S}^{(p)}_{ind}(x) \leftarrow \tilde{S}^{(p)}_{ind}(x) \cup \left\{ \left(s_{new}, \mu_{new} \right) \right\}. \quad (23)$$

Так, речевой акт (11) вводит в смысловое пространство $\tilde{S}^{(p)}_{ind}$ (*признание*) новое значение

S_{new} = *"международное признание образовательных программ российских вузов"*.

На значимость смыслов слова влияют многие факторы: частота употребления, авторитетность источника, эмоциональная окраска и пр. Если $\mu_{new}(s)$ значимость нового понимания, то простая модель обучения с обновлением имеет вид

$$\mu_{t+1}(s) = \max\left(\mu_t(s), \mu_{new}(s) \right). \quad (24)$$

Такая усложненная модель, учитывающая частоту, представляется в виде

$$\mu_{t+1}(s) = \frac{n_t(s) \cdot \mu_t(s) + \mu_{new}(s)}{n_t(s) + 1}, \quad (25)$$

где $n_t(s)$ – количество предшествующих актов, в которых данный смысл актуализировался.

В моделях с накоплением отсутствует забывание неактуализируемых смыслов, но его можно ввести коэффициентом забывания $\lambda \in (0,1)$, после чего получим модель с забыванием:

$$\mu_{t+1}(s) = \max\left(\lambda \mu_t(s), \mu_{new}(s) \right). \quad (26)$$

При $\lambda = 1$ забывания нет. Если $\lambda < 1$, отсутствие актуализации смысла $\mu_{new}(s) = 0$ снижает значимость $\mu_{t+1}(s) = \lambda \mu_t(s)$, а актуализация $\mu_{new}(s) > \lambda \mu_t(s)$ ее восстанавливает.

Пусть текущая значимость смысла «*международное признание программ*» $\mu_t = 0{,}5$ и в новом контексте она актуализируется $\mu_{new} = 0{,}9$. Тогда в модели с накоплением (24) $\mu_{t+1} = \max(0{,}5; 0{,}9) = 0{,}9$, а в модели с забыванием (26) при $\lambda = 0{,}8$ $\mu_{t+1} = \max(0{,}8 \times 0{,}5; 0{,}9) = \max(0{,}4; 0{,}9) = 0{,}9$ и перекрывает забывание. Когда смысл не актуализируется ($\mu_{new} = 0$), в модели с накоплением $\mu_{t+1} = 0{,}5$, а с забыванием $\mu_{t+1} = 0{,}8 \times 0{,}5 = 0{,}4$ (снижается).

Таким образом, в динамическом обучении индивидуальное смысловое пространство $\tilde{S}^{(p)}_{ind}(x)$ обновляясь, стремится к универсуму $\tilde{S}_{univ}(x)$, но никогда его не достигает.

Для оценивания взаимопонимания слова x субъектами p *и* q введем меру *сходства* $\mathrm{Sim}(p,q,x)\in[0,1]$ (sim – сокращение от англ. similarity – сходство). Если Sim = 1, то смысловые пространства субъектов $\tilde{S}_p(x)$ и $\tilde{S}_q(x)$ полностью совпадают (идеальное взаимопонимание), при Sim = 0 общих смыслов нет (полное непонимание). Другие значения Sim соответствуют частичному взаимопониманию. Поскольку индивидуальные смысловые пространства заданы нечеткими множествами, то степень их сходства Sim(p,q,x) можно выразить мерой близости нечетких множеств коэффициентом Жаккара:

$$\mathrm{Sim}(p,q,x)=\frac{\left|\tilde{S}_p(x)\cap\tilde{S}_q(x)\right|}{\left|\tilde{S}_p(x)\cup\tilde{S}_q(x)\right|}. \tag{27}$$

В (27) нечеткие операции пересечения и объединения определяются выражениями

$$\mu_{\tilde{S}_p\cap\tilde{S}_q}(s)=\min\left(\mu_p(s),\mu_q(s)\right), \tag{28}$$

$$\mu_{\tilde{S}_p\cup\tilde{S}_q}(s)=\max\left(\mu_p(s),\mu_q(s)\right), \tag{29}$$

а мощность нечеткого множества представляется сумма значимостей:

$$\left|\tilde{S}\right|=\sum_{s\in\mathrm{supp}(\tilde{S})}\mu(s). \tag{30}$$

Пусть слово «признание» для субъектов A и B представлено нечеткими множествами:

$$\tilde{S}_A=\left\{(\text{«международное признание программ»},0,9),(\text{«признание заслуг»},0,2)\right\};$$

$$\tilde{S}_B=\left\{(\text{«международное признание программ»},0,7),(\text{«признание в любви»},0,5)\right\},$$

Нечеткое пересечение

$$\tilde{S}_A\cap\tilde{S}_B=\left\{\text{«международное признание программ»},\mu=\min(0,9,\ 0,7)=0,7\right\}$$

имеет мощность $\left|\tilde{S}_A\cap\tilde{S}_B\right|=0,7$.

Объединение включает три смысла со значимостями 0,9*;* 0,2*;* 0,5*;* и его мощность

$$\left|\tilde{S}_A\cup\tilde{S}_B\right|=0,9+0,2+0,5=1,6.$$

Степень взаимопонимания

$$\mathrm{Sim}(A,\ B,\ \text{«}признание\text{»})=0,7\ /\ 1,6=0,4375.$$

Сконструируем и проиллюстрируем на моделях динамического обучения общий алгоритм отбора претендентов в команду, который применим к большому классу задач.

Пусть некий вуз планирует выход на международный уровень через процедуру международной профессиональной аккредитации [20]. Вуз стремится пройти аккредитацию с минимальными издержками, поскольку его ресурсы ограничены. Сотрудники вуза имеют поверхностное представление о процедурах аккредитации, и в этой связи один из них (далее – «Учитель») направляется на обучения в признанный аккредитационный центр. По возвращению Учитель должен сформировать компетентную команду для решения поставленной задачи. Учитель разрабатывает общий план – обучение, оценка компетентности, отбор и реализует следующий алгоритм.

Алгоритм

Шаг 1. Выделение ключевых понятий для обучения. Выделены ключевые понятия для понимания аккредитации: «признание образовательных программ», «компетентностный подход», «внутренняя система качества» (использован функционал смысла (2), контент-анализ в сфере профессиональной аккредитации). Для каждого понятия x сконструировано универсальное смысловое пространство $S_{\mathrm{univ}}(x)$. Например, круг значимости понятия «признание»: на ближайшей окружности (r = 0,5) размещены наиболее привычные для аккредитологов смыслы: «оценка соответствия стандартам», «международная валидация». На средней окружности (r = 1,0) – «подготовка самоотчета», «выездная экспертиза». На дальней окружности (r = 2,0) – «логотип агентства» (менее

значимый). По формуле (20) $\mu = 1 / (1 + R)$ вычислены значимости: $\mu_{\text{привычный}} = 0{,}67$, $\mu_{\text{средний}} = 0{,}5$, $\mu_{\text{периферийный}} = 0{,}33$.

Результат шага: множество смыслов S_{univ}(признание), S_{univ}(компетентностный подход), S_{univ}(внутренняя система качества) и их функции значимости μ.

Шаг 2. Начальное тестирование кандидатов. Проводится путем опроса и интервью с кандидатом p по каждому ключевому понятию x

Результат шага: начальные индивидуальные смысловые пространства в виде нечетких множеств $\tilde{S}_p(x)$ кандидатов.

Анна:

$$\tilde{S}_{\text{Анна}}(\text{«признание»}) = \{(\text{«оценка соответствия стандартам»}, 0{,}9), (\text{«выездная экспертиза»}, 0{,}2)\}.$$

Борис:

$$\tilde{S}_{\text{Борис}}(\text{«признание»}) = \begin{Bmatrix} (\text{«\textit{оценка соответствия стандартам}»}, 0{,}7), \\ (\text{«подготовка самоотчета»}, 0{,}4), \\ (\text{«международная валидация»}, 0{,}3) \end{Bmatrix}.$$

Максим:

$$\tilde{S}_{\text{Максим}}(\text{«признание»}) = \{(\text{«оценка соответствия стандартам»}, 0{,}6)\}.$$

Шаг 3. Динамическое обучение. В течение четырех циклов обучения Учитель актуализирует ключевые смыслы, используя контексты, сформированные по функционалу смысла. Экспертные оценки забывания: для Анны и Бориса $\lambda = 0{,}8$; для Максима – $\lambda = 0{,}6$ (ускоренное забывание).

Шаг 4. Итоговое тестирование и оценка взаимопонимания. По завершению обучения для каждой пары вычисляется индекс сходства $\text{Sim}(p, q, x)$ (27)–(30). Порог включения в команду устанавливается равным 0,7.

Шаг 5. Принятие решения. Кандидаты, достигшие порога с хотя бы одним коллегой, рекомендуются в команду.

Результат работы алгоритма представлен табл. 1–3.

Итак, Анна и Борис прошли отбор, а Максим, несмотря на начальное присутствие ключевого смысла, был отсеян из-за быстрого забывания ($\lambda = 0{,}6$).

Таблица 1

Итоговые смысловые пространства кандидатов

Кандидат	«Оценка соответствия»	«Подготовка отчета»	«Выездная экспертиза»	«Международная валидация»	Примечание
Анна	0,90	0,80	0,90	0,80	$\lambda = 0{,}8$
Борис	0,90	–	0,80	0,70	$\lambda = 0{,}8$
Максим	0,14	0,25	0,54	0,42	$\lambda = 0{,}6$

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 2

Попарные индексы сходства Sim

Пара	Сумма пересечения	Сумма объединения	Sim	Достижение порога 0,7
Анна – Борис	2,40	3,40	0,706	Да
Анна – Максим	1,35	3,40	0,397	Нет
Борис – Максим	1,10	2,65	0,415	Нет

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 3

Решение о включении в команду

Кандидат	Лучший Sim (с кем)	Решение	Обоснование
Анна	0,706 (с Борисом)	Включена	Достигает порога с Борисом
Борис	0,706 (с Анной)	Включен	Достигает порога с Анной
Максим	0,415 (с Борисом)	Не включен	Ниже порога со всеми

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Таким образом модель динамического обучения с забыванием способна выявлять пробелы в знаниях и способность субъекта к долгосрочному удержанию понятийного аппарата предметной области и позволяет:

1. Формализовать начальные индивидуальные смысловые пространства кандидатов.
2. Смоделировать динамику обучения с учетом забывания.
3. Количественно оценить взаимопонимание с помощью индекса сходства Sim.
4. Принять объективное решение о формировании команды на основе заданного порога.

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные результаты дополняют вычислительную теорию семантической интерпретации субъективной природой смысла слова x и позволяют конструировать модели субъективного понимания и взаимопонимания введением универсального $S_{\text{univ}}(x)$ и индивидуального $S_{\text{ind}}^{(p)}(x)$ смысловых пространств. Первое представляет потенциально бесконечный универсум всевозможных смыслов слова, второе – смысловое пространство субъекта, конечное и динамически изменяемое жизненным опытом.

Геометрическая интерпретация кругом значимости с монотонно убывающей функцией μ позволяет представить смысловые пространства нечеткими множествами и воспользоваться аппаратом нечеткой логики.

Для моделирования динамики индивидуального смыслового пространства $\tilde{S}_p(x)$ предложены модели обучения с накоплением и забыванием. Обновление происходит включением ранее неизвестных смыслов или изменением значимостей известных. В моделях с забыванием значимости неактуализируемых смыслов понижаются вплоть до полного исключения. Модель можно уточнять, учитывая частоту актуализаций, время между ними, конкуренцию между смыслами и пр.

Предложена мера взаимопонимания между субъектами p и q в виде степени сходства $\text{Sim}(p,q,x) \in [0,1]$ и способ ее вычисления. Здесь 1 соответствует идеальному взаимопониманию (пространства совпадают), 0 – полному непониманию (совпадения нет).

Сконструирован алгоритм создания компетентной команды, формализующий построение начальных смысловых пространств субъектов, моделирующий динамику обучения с забыванием и оценивающий взаимопонимание кандидатов. Применимость продемонстрирована примером профессиональной аккредитации образовательных программ.

Эмпирическая верификация модели путем проведения психолингвистических экспериментов, анализа корпусов текстов с экспертной разметкой, сравнения с векторным представлением слов (word embeddings) и LLM-моделями предполагает отдельное исследование ближайшей перспективы.

Заключение

В работе предложена нечеткая модель смыслового пространства, дополняющая вычислительную теорию семантической интерпретации субъективной природой смысла слова. Она включает геометрическую интерпретацию пространства (круг значимости с функцией значимости), представление пространств нечеткими множествами, динамику обучения с накоплением и забыванием, а также количественную меру взаимопонимания. На основе модели построен общий алгоритм формирования компетентных команд для широкого круга задач.

Подход допускает точную математическую оценку, не требует сравнимых с LLM-моделями вычислительных ресурсов и создает основу для построения эффективных алгоритмов и программных систем для обработки естественно-языковой информации.

Список литературы

1. Che Ting Chien, Chao Heng Chien Hybrid AI-Driven Computer-Aided Engineering Optimization: Large Language Models Versus Regression-Based Models Validated Through Finite-Element Analysis // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. Is. 18. P. 10123. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/15/18/10123 (дата обращения: 28.05.2026). DOI: 10.3390/app151810123.

2. Kang R. N., Tanaka Y., Sato T., Maeda S., Shimada H. The Development of a Japanese Version of the State Cognitive Fusion Questionnaire // Japanese Psychological Research. 2025. Vol. 67. Is. 3. P. 311–324. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jpr.12453 (дата обращения: 28.05.2026). DOI: 10.1111/jpr.12453.

3. Guo F., Li T., Cunningham C. J. L. One year in the classroom with ChatGPT: empirical insights and transformative impacts // Frontiers in Education. 2025. Vol. 10. P. 1–17. URL: https://www.frontiersin.org/journals/education/articles/10.3389/feduc.2025.1574477/full (дата обращения: 28.05.2026). DOI: 10.3389/feduc.2025.1574477.

4. Ju B., Stewart J. B. Empowering Users with ChatGPT and Similar Large Language Models (LLMs): Everyday Information Needs, Uses, and Gratification // Proceedings of the Association for Information Science and Technology. 2024. Vol. 61. Is. 1. P. 172–182. URL: https://asistdl.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pra2.1018 (дата обращения: 28.05.2026). DOI: 10.1002/pra2.1018.

5. Rakovics Z., Rakovics M. Exploring the potential and limitations of large language models as virtual respondents for social science research // Intersections: East European Journal of Society and Politics. 2025. Vol. 10. Is. 4. P. 126–147. URL: https://intersections.tk.hu/index.php/intersections/article/view/1326 (дата обращения: 28.05.2026). DOI: 10.17356/ieejsp.v10i4.1326.

6. Kumar H., Yoo S., Bernuy A., Shi J., Luo H., Williams J. J., Kuzminykh A., Anderson A., Kornfield R. Large Language Model Agents for Improving Engagement with Behavior Change Interventions: Application to Digital Mindfulness // Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction (CSCW). 2025. Vol. 9. Is. 7. P. 1–44. URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12945337/ (дата обращения: 28.05.2026). DOI: 10.1145/3757619.

7. Lund B. D., Wang T., Mannuru N. R., Nie B., Shimray S., Wang Z. ChatGPT and a new academic reality: artificial Intelligence-written research papers and the ethics of the large language models in scholarly publishing // Journal of the Association for Information Science and Technology. 2023. Vol. 74. Is. 5. P. 570–581. URL: https://asistdl.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/asi.24750 (дата обращения: 28.05.2026). DOI: 10.1002/asi.24750.

8. Liu S., Chen L., Yan J., Jiang Y., Wang X., Li X., Yang Q. When DeepSeek-R1 meets financial applications: benchmarking, opportunities, and limitations // Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering. 2025. Vol. 26. Is. 10. P. 1862–1870. URL: https://link.springer.com/article/10.1631/FITEE.2500227 (дата обращения: 28.05.2026). DOI: 10.1631/FITEE.2500227.

9. Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding // Proceedings – of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. June 2019. Vol. 1. P. 4171–4186. URL: https://aclanthology.org/N19-1423/ (дата обращения: 28.05.2026). DOI: 10.18653/v1/N19-1423.

10. Зиновьева Е. С., Трапезников В. П. Международно-политическая предвзятость больших языковых моделей: критический дискурс-анализ нарративов ChatGPT, LLaMA, Gemini и DeepSeek // Полис. Политические исследования. 2026. № 1. С. 157–177. URL: https://www.politstudies.ru/en/article/6368 (дата обращения: 28.05.2026). DOI: 10.17976/jpps/2026.01.11.

11. King J., Klyman K., Capstick E., Saade T., Hsieh V. User Privacy and Large Language Models: An Analysis of Frontier Developers' Privacy Policies // Proceedings of the AAAI/ACM Conference on AI, Ethics, and Society. 2025. Vol. 8. Is. 2. P. 1465–1477. URL: https://ojs.aaai.org/index.php/AIES/article/view/36646 (дата обращения: 28.05.2026). DOI: 10.1609/aies.v8i2.36646.

12. Rogers A., Kovaleva O., Rumshisky A. A Primer in BERTology: What We Know About How BERT Works // Transactions of the Association for Computational Linguistics. 2020. Vol. 8. P. 842–866. URL: https://direct.mit.edu/tacl/article/doi/10.1162/tacl_a_00349/96482/A-Primer-in-BERTology-What-We-Know-About-How-BERT (дата обращения: 28.05.2026). DOI: 10.1162/tacl_a_00349.

13. Вишняков Ю. М., Вишняков Р. Ю. Вычислительная семантическая интерпретация текстов научно-технического стиля // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 12–2. С. 236–242. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36428&ysclid=m77urlmrjv786427462 (дата обращения: 28.05.2026).

14. Вишняков Ю. М., Вишняков Р. Ю. Формализация распознавания и идентификации семантических объектов в естественно-языковых текстовых потоках // Известия ЮФУ. Технические науки. 2024. № 4. С. 110–122. URL: https://izv-tn.tti.sfedu.ru/index.php/izv_tn/en/article/download/985/1172/3098 (дата обращения: 28.05.2026). DOI: 10.18522/2311-3103-2024-4-110-122.

15. Вишняков Ю. М., Вишняков Р. Ю. Поиск и идентификация текстов определенной семантической направленности в естественно-языковых потоках // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 5. С. 32–40. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40387 (дата обращения: 28.05.2026). DOI: 10.17513/snt.40387.

16. Вишняков Ю. М., Вишняков Р. Ю. Программный комплекс идентификации текстов определенной семантической направленности в естественно-языковых потоках // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 9. С. 29–38. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40482 (дата обращения: 28.05.2026). DOI: 10.17513/snt.40482.

17. Ахо А., Ульман Дж. Теория синтаксического анализа, перевода и компиляции / Пер. с англ. В. Н. Агафонова; Под ред. В. М. Курочкина. М.: Мир, 1978. Т. 1. 612 с. [Электронный ресурс]. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_007597729/ (дата обращения: 28.05.2026).

18. Налимов В. В. Вероятностная модель языка. О соотношении естественных и искусственных языков. М.: Наука, 1979, 303 с. URL: https://books.google.ru/books?id=Oob-AgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false (дата обращения: 28.05.2026).

19. Zadeh L. A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8. Is. 3. P. 338–353. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001999586590241X?via%3Dihub. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X (дата обращения: 28.05.2026).

20. Похолков Ю. П. Развитие системы независимой профессионально-общественной аккредитации инженерных образовательных программ в России в период с 2000 по 2013 год // Инженерное образование. 2013. № 12. С. 50–57. URL: https://ojs.aeer.ru/public/archive/12/art_6.pdf. (дата обращения: 28.05.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научно-инновационного проекта «НИП-20.1.4».

Financing: The study was carried out with the financial support of the Kuban Science Foundation within the framework of the scientific and innovative project "NIP-20.1.4".

УДК 621.315.611:621.317.6
DOI 10.17513/snt.40816

CC BY 4.0

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ УСЛОВНОГО ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТВЁРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Гатауллин А. М. ORCID ID 0000-0002-3456-7890,
Минкин А. С. ORCID ID 0009-0008-4990-1463

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», Казань, Российская Федерация, e-mail: cntnur_mn@mail.ru

Оценка остаточного ресурса твёрдой изоляции является критически важной для предотвращения аварийных отказов электрооборудования. Традиционные наиболее распространенные применяемые на практике для оперативного контроля методы диагностики, такие как измерения сопротивления мегаомметром или испытания повышенным напряжением, требуют отключения приложенного напряжения, дают лишь бинарные заключения «годен/не годен» и не позволяют количественно прогнозировать остаточный ресурс в режиме мониторинга. Цель работы заключается в разработке и экспериментальной верификации модели, которая по относительному параметру $K_{отн}$ частичных разрядов, извлекаемому из амплитудно-фазовых диаграмм, позволяет оценивать сопротивление, пробивное напряжение и условный остаточный ресурс фарфоровых изоляторов в процентах. Эксперименты выполнены на подвесных фарфоровых изоляторах и их гирляндах, состоящих из двух изоляторов, включая дефектные, при приложенном напряжении промышленной частоты 50 Гц в диапазоне от 6÷25 кВ. Регистрация частичных разрядов осуществлялась анализатором частичных разрядов, снабженным стандартными высокочастотными измерительными трансформаторами с полосой частот 1÷15 МГц. По амплитудно-фазовым диаграммам выделены частичные разряды положительной полярности диапазона 35÷430 пКл, по относительному значению которых оценены сопротивление, пробивное напряжение и условный остаточный ресурс изоляторов. $K_{отн}$ – доля таких частичных разрядов ко всем частичным разрядам положительной полярности. Модель верифицирована на исправных и дефектных образцах. Научная новизна работы заключается в том, что для фарфоровых изоляторов по характеристикам частичных разрядов, выделяемых по амплитудно-фазовым диаграммам, осуществлялась и была верифицирована в лабораторных условиях количественная оценка их состояния, что является развитием метода оценки остаточного ресурса по так называемым измеряемым параметрам. В отличие от нормативных методов, предлагаемый метод позволяет бесконтактно оценивать сопротивление, пробивное напряжение и условный остаточный ресурс изоляторов и их гирлянд без отключения приложенного напряжения, что важно с практической точки зрения.

Ключевые слова: частичные разряды, амплитудно-фазовая диаграмма, условный остаточный ресурс (относительная электрическая прочность), сопротивление изоляции, пробивное напряжение, диагностика

A MODEL FOR ESTIMATING THE CONDITIONAL RESIDUAL LIFE OF SOLID INSULATION BASED ON AMPLITUDE-PHASE DIAGRAMS OF PARTIAL DISCHARGES

Gataullin A. M. ORCID 0000-0002-3456-7890,
Minkin A. S. ORCID 0009-0008-4990-1463

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Power Engineering University», Kazan, Russian Federation, e-mail: cntnur_mn@mail.ru

Assessing the remaining life of solid insulation is critical for preventing failures of electrical equipment. Traditional diagnostic methods (e.g., megohmmeter measurements or high-voltage testing) require disconnecting the applied voltage, provide only a binary “pass/fail” conclusion, and do not allow quantitative prediction of residual life in monitoring mode. This study develops and experimentally verifies a model that estimates the relative residual life of solid insulation using porcelain insulators as an example. The model employs the relative partial discharge parameter K_{rel} extracted from amplitude-phase diagrams. K_{rel} is the proportion of positive-polarity partial discharges in the range 35÷430 pC to all positive-polarity partial discharges. Experiments were performed on suspended porcelain insulators (type PF-6V) and two-insulator strings, including defective samples, under 50 Hz applied voltage of 6÷25 kV. Partial discharges were recorded with a standard analyzer (1÷15 MHz bandwidth). Using K_{rel}, the model estimates insulation resistance, breakdown voltage, and relative conditional residual life (in percent). For a defective insulator, the calculated breakdown voltage (14.6 kV) agreed well with the experimental value (15 kV), deviation 2.7%. The scientific novelty is that this study presents and experimentally verifies a quantitative assessment of their condition based on partial-discharge characteristics from amplitude-phase diagrams has been developed and verified in laboratory conditions. Unlike standard methods, the proposed approach enables contactless evaluation of resistance, breakdown voltage, and relative residual life of insulators and their strings without disconnecting the applied voltage, which is essential for practical monitoring.

Keywords: partial discharges, amplitude-phase diagram, relative residual dielectric strength, insulation resistance, breakdown voltage, diagnostics

Введение

Твёрдая изоляция – ключевой элемент высоковольтного электрооборудования, и её внезапный пробой приводит к серьёзным авариям. Для фарфоровых подвесных изоляторов традиционные методы контроля (измерение сопротивления мегаомметром, испытания повышенным напряжением) дают лишь бинарную оценку «годен/не годен» согласно нормативной документации [1] и не предусматривают количественной оценки сопротивления и пробивного напряжения, хотя эти характеристики на практике являются самыми главными и оцениваются, как правило, при отключенном приложенном напряжении. Изоляторы для оценки пробивного напряжения всегда демонтируются, что ограничивает возможности оперативного персонала, учитывая огромное число изоляторов. После воздействия повышенным, или, если это возможно, пробивным напряжением вновь определяют сопротивление изоляторов, оценивая, на какую величину оно уменьшается после разрушающего воздействия. Сопротивление изоляторов чаще всего оценивается при отключенном приложенном напряжении, хотя до 10 кВ разработаны мегаомметры, способные функционировать без отключения приложенного напряжения. Такая ситуация приводит к экспоненциальному росту числа изоляторов, требующих диагностики, и делает актуальной задачу мониторинга изоляторов под рабочим напряжением. Поэтому метод частичных разрядов (ЧР) считается самым перспективным неразрушающим методом контроля состояния изоляции, но ограничен с точки зрения количественной оценки сопротивления, пробивного напряжения и остаточного ресурса под рабочим напряжением. Задача оценки сопротивления, пробивного напряжения и остаточного ресурса по измеряемым параметрам ЧР остается актуальной [2; 3], несмотря на то, что Г. С. Кучинским была предложена фундаментальная энергетическая модель старения изоляции, связывающая остаточный ресурс с мощностью ЧР и температурой [4]. Предложенные уточнённые математические модели Кучинского не дают прямой оценки остаточного ресурса по параметрам ЧР [5; 6]. Изучены и систематизированы типы повреждений изоляторов: трекинг, эрозия [7]. Изучены фундаментальные аспекты физики ЧР [8]. Типы дефектов распознавались в автоматическом режиме по характеристикам ЧР с использованием методов машинного обучения [9]. На качественном уровне изучена взаимосвязь остаточного ресурса, характеристик ЧР с концентрацией примесей и микроструктурой фарфоровой изоляции [10]. Разработана методика, позволяющая по динамике характеристик ЧР на качественном уровне отслеживать развитие дефекта во времени [11]. Известны алгоритмы сопоставления АФД дефектных и образцовых изоляторов с применением методов машинного обучения, не предполагающие количественного определения остаточного ресурса [12-14]. Изучены механизмы возникновения ЧР в кавернах и их влияние на деградацию диэлектриков без инженерных формул оценки остаточного ресурса [15]. В последних работах 2026 года [16; 17] также рассматриваются вопросы диагностики изоляции высоковольтного оборудования, однако предложенные подходы не дают прямой количественной связи характеристик ЧР с пробивным напряжением и остаточным ресурсом.

Можно сделать вывод о том, что до сих в доступной литературе отсутствовала единая математическая модель, одновременно связывающая сопротивление изоляции, измеряемое мегаомметром, характеристики ЧР с условным остаточным ресурсом по пробивному напряжению (условным остаточным ресурсом). Практическая реализация метода ЧР для оценки состояния изоляторов возможна благодаря промышленным интеллектуальным датчикам серии ISPD (производства ООО «Димрус»). В этих устройствах используется экспертный анализ АФД, позволяющий идентифицировать тип дефекта по паттерну ЧР. Однако встроенная экспертная система не выдаёт простой количественной формулы, связывающей измеряемые параметры с условным остаточным ресурсом.

Цель исследования – разработать и экспериментально верифицировать такую модель для твёрдой изоляции (на примере фарфоровых изоляторов ПФ-6В), которая позволяет по параметрам ЧР количественно оценивать текущее сопротивление и пробивное напряжение, а также условный остаточный ресурс в процентах ($K_{отн}$ (рус.) / K_{rel} (англ.)). Под условным остаточным ресурсом в настоящей работе понимается отношение текущего пробивного напряжения изолятора к пробивному напряжению нового (эталонного) изолятора, выраженное в процентах. Этот показатель не является временем до отказа, а служит количественной мерой остаточной электрической прочности и используется для классификации состояния изоляции.

Материалы и методы исследования

Объектами исследований служили подвесные фарфоровые изоляторы ПФ-6В и гирлянды из двух таких изоляторов.

Испытания проводились при атмосферном давлении, температуре 300 К и относительной влажности 65%. Программное обеспечение R-400 автоматически строило АФД, определяло мощность ЧР, суммарный кажущийся заряд за 60 с. С помощью скрипта, созданного в *Python*, определяли из АФД относительное число ЧР положительной полярности в диапазоне 35÷430 пКл (по Кучинскому опасные внутренние ЧР) по отношению к общему числу ЧР положительной полярности.

Характеристика объектов исследования и эксперимента

Испытано 10 подвесных фарфоровых изоляторов ПФ-6В, извлечённых из эксплуатации. Из них по внешнему осмотру и предварительным измерениям частичных разрядов при пониженном напряжении (6 кВ) выделено: 2 заведомо исправных, 6 с признаками старения (повышенный уровень ЧР, но без внешних дефектов) и 2 дефектных. Один из дефектных образцов имел одновременно измеренные сопротивление ≈50 МОм и пробивное напряжение ≈15 кВ; именно этот образец использован для верификации модели. Остальные образцы служили для качественного сопоставления АФД. Ввиду ограниченного объёма выборки работа носит апробационный характер; окончательная верификация модели требует дополнительных испытаний на большем количестве образцов. Измерения сопротивления мегаомметром МС-05 проводились только для двух образцов: исправного (≈3500 МОм) и реперного (нулевого) с сопротивлением ≈50 МОм. Для остальных изоляторов сопротивление не измерялось. Измерения пробивного напряжения проводились только для одного дефектного изолятора (≈15 кВ). Для остальных образцов пробивное напряжение определялось расчётным путём по предложенной модели. Дефектность изоляторов определялась по АФД (повышенное значение $K_{отн}$). Внешних видимых повреждений (трещин, сколов) у дефектных образцов не наблюдалось.

Обоснование диапазона ЧР 35÷430 пКл

Согласно фундаментальной работе Г. С. Кучинского [4, с. 112–115], ЧР с кажущимся зарядом в интервале 30÷500 пКл в фарфоровой изоляции соответствуют внутренним разрядам в газовых включениях, наиболее опасным для деградации. Выбранный нами диапазон 35÷430 пКл полностью покрывает эту область. Проверка чувствительности показала: изменение нижней и верхней границ на ±20% изменяет $K_{отн}$ не более чем на 7%, что не влияет на категорирование состояния. Параметр $K_{отн}$ вычисляется по АФД прибора R-400 для эталонных, поврежденных изоляторов и их гирлянд.

Алгоритм расчета параметра $K_{отн}$

1. Построение АФД при переменном приложенном напряжении 50 Гц.
2. Подсчет N (число ЧР положительных по знаку).
3. Подсчёт $N_{слаб}$ (число положительных по знаку ЧР в диапазоне 35÷430 пКл).
4. Подсчет $K = N_{слаб} / N$.

Для количественной оценки степени деградации введён относительный параметр $K_{отн}$ вычисляемый по АФД:

$$K_{отн} = K(U_{раб}) / K_{эт}(U_{раб}). \quad (1)$$

Эталонная зависимость для исправного изолятора получена аппроксимацией точек (6 кВ, 0) и (10 кВ, 0,11), $U \geq 6$ кВ:

$$K_{эт}(U_{раб}) = 0{,}0275(U - 6). \quad (2)$$

Таким образом, из (1) и (2) следует, что для исправного изолятора $K_{отн} = 1$. Рост $K_{отн}$ указывает на накопление дефектов. Ключевая идея предлагаемой модели – предположение, что как сопротивление изоляции, так и пробивное напряжение функционально связаны с $K_{отн}$, который может быть получен по характеристикам ЧР неразрушающим способом из стандартных АФД. Условный остаточный ресурс в процентах определим как отношение текущего пробивного напряжения к пробивному для эталонного изолятора при одних и тех же условиях:

$$\alpha = (U_{пр} / U_{пр.эт}) \times 100\%. \quad (3)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Экспериментальные данные и вычисление $K_{отн}$

Измеренные значения напряжения, тока утечки и характеристик ЧР для всех испытуемых объектов сведены в таблице 1. Для каждого образца из АФД рассчитывался параметр $K_{отн}$, а затем α, согласно (6). Это же значение можно получить из (3) с учетом (5) При напряжениях, использованных для верификации, получены следующие значения $K_{отн}$: исправный одиночный изолятор (10 кВ) – 1,00; дефектный одиночный изолятор (12,5 кВ) – 3,94; гирлянда с одним дефектным элементом (25 кВ) – приблизительно 1,12.

Для исправного изолятора при повышении напряжения до 30 кВ максимальные ЧР возрастают до 40 нКл (табл. 1), а суммарный заряд остаётся высоким.

Таблица 1

Сравнение расчётных и экспериментальных параметров

Объект	U, кВ	$K_{отн}$	$R_{расч}$, МОм	$I_а$, мА	$I_{ут.эксп}$, мА	$U_{пр.расч}$, кВ	$U_{пр.эксп}$, кВ
Исправный одиночный	10	1,00	3500	0,00286	0,3	100	-
Дефектный одиночный	12,5	3,94	57,2	0,219	0,5	14,6	15
Гирлянда с дефектом	25	1,12	3557	0,00703	0,4	97	-

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования. Погрешности не превышают 15%, что подтверждает адекватность модели.

Таблица 2

Оценка условного остаточного ресурса изолятора ПФ-6В

$K_{отн}$	$U_{пр}$, кВ	α, %	R, МОм	Состояние
1,00	100	100	3500	Новый
1,50	93	93	1037	Норма
2,00	80	80	438	Норма
2,50	63	63	224	Требует контроля
3,00	44	44	130	Преддефектное
3,94	15	15	57	Дефектное
5,00	2	2	28	Критическое

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

При наличии внутреннего дефекта (табл. 2) максимальные ЧР резко снижаются (до 5,4 нКл при 12 кВ), а параметр $K_{отн}$ растёт до 0,705. Параметр $K_{отн}$ извлекался из АФД.

Связь сопротивления и пробивного напряжения с $K_{отн}$

Экспериментальные значения (исправный:

$$K_{отн.эт.} = 1,\ R=3500\ \text{МОм};$$

дефектный:

$$K_{отн.нул.} = 3{,}94,\ R=50\ \text{МОм})$$

описываются степенной зависимостью с показателем $n = 3$:

$$R = 3500 / K^3_{отн}\ \text{МОм}. \quad (4)$$

Для дефектного изолятора при $K_{отн.нул.} = 3{,}94$, формула даёт

$$R = 3500 / 61{,}2 \approx 57{,}2\text{МОм},$$

что близко к экспериментальному 50 МОм (погрешность 14%).

Учёт поверхностных ёмкостных токов позволил снизить оценку пробивного напряжения гирлянды с 600 до 100 кВ. Связь между $K_{отн}$ и пробивным напряжением:

$$U_{пр} = 103\exp(-0{,}03186\ K^3_{отн})\ \text{кВ}. \quad (5)$$

Пример: для исправного изолятора

$$U_{пр} = 103\exp(-0{,}03186) = 100\ \text{кВ};$$

для дефектного

$$U_{пр} = 103\exp(-1{,}95) = 14{,}6\ \text{кВ}$$
(эксперимент 15 кВ).

Из (5) получаем простую формулу для условного остаточного ресурса:

$$\alpha = \exp(-0{,}03186(K^3_{отн} - 1))\times 100\%\ , \quad (6)$$

В таблице 2 представлены расчётные значения $U_{пр}$ и α для нескольких значений $K_{отн}$, охватывающих наблюдаемый в эксперименте диапазон.

Прямое сравнение расчётного и экспериментального пробивного напряжения выполнено для дефектного образца: расчёт дал 14,6 кВ, эксперимент – 15 кВ, расхождение 2,7%. Для исправного изолятора и гирлянды экспериментальное определение пробивного напряжения не проводилось, приведены расчётные значения по модели. Порог 300 МОм по ПУЭ достигается при $K_{отн} = 2$ и 2,5, поэтому для $K_{отн} = 2{,}5$ состояние уже «Требует контроля», несмотря на α = 63% . Это корректно отражает нормативные требования.

Применение к гирляндам

Если один изолятор дефектный (его расчетное сопротивление 57 МОм), то условный остаточный ресурс гирлянды определяется по самому слабому изолятору. Таким образом, алгоритм оценки аналогичен слу-

чаю одиночного изолятора, но использует $K_{отн}$ гирлянды.

Если один изолятор исправен ($K_{отн,1} = 1$), а другой дефектный ($K_{отн,1} = 3{,}94$) то по (4) сопротивление гирлянды

$$R_{гирл} = 3500(1 + (1/61{,}2)) = 3557 \text{ МОм}.$$

Вклад дефектного изолятора мал (около 1,6%). Для практических расчётов допустимо приближение

$$R_{гирл} = 3500 / K^3_{отн.эт.},$$

где $K_{отн.эт.}$ – параметр бездефектного (эталонного) изолятора.

На основе полученных зависимостей предложен следующий алгоритм неразрушающей диагностики:

1) измерить АФД ЧР при рабочем напряжении (рекомендуется 10 кВ для одиночного изолятора, 25 кВ для гирлянды);

2) вычислить $K_{отн}$ по (1);

3) оценить сопротивление R (4) и пробивное напряжение $U_{пр}$ (5);

4) определить условный остаточный ресурс по формуле (3) или (6);

5) принять решение. Для лабораторных условий и изоляторов ПФ-6В предварительно могут быть рекомендованы следующие ориентировочные пороги условного остаточного ресурса: > 70% – норма, 40÷70% – требует дополнительной диагностики спустя 6 месяцев, менее 40% – требует замены. Окончательные пороги требуют уточнения по результатам эксплуатационных испытаний на большей выборке

Статистическая обработка

Ввиду малого объёма прямых измерений сопротивления (2 образца) и пробивного напряжения (1 образец) полноценный регрессионный анализ не проводился. Проверка модели выполнена сравнением расчётного (14,6 кВ) и экспериментального (15 кВ) значений пробивного напряжения для единственного дефектного образца. Расхождение составило 2,7%, что признаётся приемлемым для инженерных диагностических целей.

Ограничения исследования

- модель проверена только на изоляторах ПФ-6В;
- испытания проведены в лабораторных условиях (температура 300±5 К, влажность 65±10%);
- малый объём прямых измерений сопротивления и пробивного напряжения;
- результаты не могут быть без дополнительной верификации распространены на другие типы изоляции и реальные объекты.

Развивая энергетическую модель старения изоляции Кучинского [4] и подход к прогнозированию по измеряемым параметрам Коржова и др. [5], настоящая работа предлагает инженерную методику, которая позволяет определять сопротивление, пробивное напряжение и условный остаточный ресурс фарфоровых изоляторов их гирлянд по относительному параметру ЧР, в котором, по терминологии Кучинского, учитываются опасные внутренние ЧР. В отличие от работ [6; 11; 12], где диагностика сводится к качественному анализу, наша модель даёт количественную оценку в процентах. Предложенная модель для данного класса изоляторов объединяет измеряемое на практике сопротивление фарфоровых изоляторов ПФ-6В и характеристики ЧР в единый количественный инструмент для оценки условного остаточного ресурса. В отличие от предыдущих работ, где диагностика сводится к качественному анализу или статистическим моделям, предложенная модель даёт замкнутую аналитическую модель. Так, например, в [11; 12] определяли динамику развития дефектов, но не было выработано критериев выбраковки изоляторов. В [13] изучали состояние изоляции по характеристикам ЧР под воздействием постоянного приложенного напряжения, но не было разработано теории пробоя по данным ЧР.

Модель может рассматриваться как аналитическое ядро для систем мониторинга на основе стандартных анализаторов характеристик ЧР. В отличие от проприетарного программного обеспечения этих приборов, в работе предложена прозрачная и легко верифицируемая методика, которая позволяет обслуживающему персоналу самостоятельно вычислять условный остаточный ресурс по стандартным АФД без обращения к заранее определенным алгоритмам экспертной системы. С другой стороны, предложенная модель органически развивает экспертные системы разработчиков оборудования. Это особенно ценно для учебных целей и для быстрой инженерной оценки состояния изоляции непосредственно на объекте. Сравнение с единственным определенным в ПУЭ пороговым критерием выбраковки изоляторов – сопротивлением (не менее 300 МОм) – показывает, что полученное значение 3500 МОм для исправного изолятора с большим запасом ему удовлетворяет, причем оно получено как непосредственно с помощью мегаомметра, так и по характеристикам ЧР. Прямое сопоставление с литературными данными по пробивному напряжению для ПФ-6В также соответствует оценкам электрических характеристик изоляторов по данным ЧР предложенной авторами теории. Это демонстрирует работо-

способность предлагаемого подхода. Физический механизм модели – лавинообразный рост коротких встречных ЧР, шунтирующих объёмное сопротивление, вызывающих резкое падение R и $U_{пр}$ – согласуется с современными представлениями о стримерном характере ЧР перед пробоем и не противоречит работам Кучинского. Для разделения различных типов ЧР и коронных разрядов применяется АФД [14]. Предположение о встречных коротких ЧР перед пробоем и их стримерном характере объясняет степенной характер зависимостей (5) и (6). Эта оценка в перспективе может быть распространена на изоляционные материалы различного типа, для определения состояния которых можно применять стандартные анализаторы характеристик ЧР.

Заключение

В продолжение фундаментальных работ Г. С. Кучинского и развития подхода к диагностике по измеряемым параметрам, в настоящей статье предложена и экспериментально верифицирована эмпирическая модель, связывающая сопротивление изоляции, пробивное напряжение и условный остаточный ресурс с относительным параметром частичных разрядов $K_{отн}$, вычисляемым по АФД. Модель верифицирована на примере фарфоровых изоляторов ПФ-6В; погрешность оценки пробивного напряжения не превышает 3%. Показано, что в гирлянде дефектный элемент маскируется по сопротивлению, но может быть выявлен по возрастанию $K_{отн}$ гирлянды на 10÷15%. Разработан практический алгоритм неразрушающей оценки условного остаточного ресурса по однократному измерению ЧР, который может служить открытой альтернативой закрытым алгоритмам промышленных датчиков.

Список литературы

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. М.: НЦ ЭНАС, 2003. 260 с. URL: https://www.elec.ru/viewer?url=library/direction/pue_7.pdf (дата обращения: 24.04.2026).

2. Florkowski M., Kuniewski M. Partial Discharge-Originated Deterioration of Insulating Material Investigated by Surface-Resistance and Potential Mapping // Energies. 2023. Vol. 16. № 16. P. 5973. DOI: 10.3390/en16165973.

3. Maresch K., Freitas-Gutierres L. F., Oliveira A. L. et al. Advanced Diagnostic Approach for High-Voltage Insulators: Analyzing Partial Discharges through Zero-Crossing Rate and Fundamental Frequency Estimation of Acoustic Raw Data // Energies. 2023. Vol. 16. № 16. P. 6033. DOI: 10.3390/en16166033 (дата обращения: 24.04.2026).

4. Кучинский Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия, 1979. 224 с. URL: https://ru.djvu.online/file/oJsNWY2zpjarN (дата обращения 11.05.2026).

5. Коржов А. В., Сафонов В. И., Дзюба М. А., Бабаев Р. М.о., Коростелев Я. Е. Математическая модель прогнозирования остаточного ресурса изоляции по режимным параметрам // Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика. 2023. Т. 23. № 1. С. 56–64. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50467321 (дата обращения: 24.04.2026). DOI: 10.14529/power230106.

6. Голенищев-Кутузов В. А., Голенищев-Кутузов А. В., Семенников А. В., Калимуллин Р. И., Иванов Д. А. Контроль текущего рабочего состояния и прогнозирование остаточного ресурса высоковольтных изоляторов // Известия РАН. Серия физическая. 2023. Т. 87. № 12. С. 1823–1827. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54804666 (дата обращения: 24.04.2026). DOI: 10.31857/S0367676523703143.

7. Georgiev G., Ivanova M., Dimitrova R., Rangelov Y. Polymeric Composite Insulators for Overhead Power Lines. A Review of In-Service Damages and Diagnostic Approaches // 2021 17th Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA). 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/ELMA52514.2021.9503054.

8. Pan C., Wu K., Meng Y., Cheng Y., Tang J. The effect of discharge area variation on stochastic characters of PD magnitude // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2017. Vol. 24. № 1. P. 217–226. DOI: 10.1109/TDEI.2016.005904.

9. Montanari G. C., Shafiq M., Myneni S. B. Insulation Defect Modelling and Partial Discharge Typology Identification: A Robust and Automatic Approach // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. № 15. P. 6715. DOI: 10.3390/app14156715.

10. Sanyal S., Kim T., Yi J. et al. Failure Trends of High-Voltage Porcelain Insulators Depending on the Constituents of the Porcelain // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. № 2. P. 694. DOI: 10.3390/app10020694.

11. Gao X., Li Z., Xu Z. et al. Dynamic Severity Assessment of Partial Discharge in HV Bushings Based on the Evolution Characteristics of Dense Clusters in PRPD Patterns // Sensors. 2025. Vol. 25. № 24. P. 7537. DOI: 10.3390/s25247537.

12. Abubakar A., Zachariades C. Phase-Resolved Partial Discharge (PRPD) Pattern Recognition Using Image Processing Template Matching // Sensors. 2024. Vol. 24. № 11. P. 3565. DOI: 10.3390/s24113565.

13. Гатауллин А. М. Регистрация и обработка сигналов частичных разрядов // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 4. С. 55–60. URL: https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=33969451 (дата обращения: 24.04.2026).

14. Гатауллин А. М., Гавриленко А. Н., Писковацкий Ю. В., Минкин А. С. Диагностика фарфоровых изоляторов по характеристикам частичных разрядов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26. № 5. С. 19–30. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=74034948 (дата обращения: 24.04.2026). DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-5-19-30.

15. Morshuis P. H. F. Partial discharge mechanisms in voids related to dielectric degradation // IEE Proc.-Sci. Meas. Technol. 1995. Vol. 142. № 1. P. 62–68. URL: https://digital-library.theiet.org/doi/10.1049/ip-smt%3A19951562 (дата обращения 16.06.2026). DOI: 10.1049/ip-smt:19951562.

16. Исмагилов Ф. Р., Демин А. Ю., Янгиров И. Ф., Кудрявцев Н. С. Импульсный резонансный генератор для испытания изоляции высоковольтного электрооборудования // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2026. Т. 22. № 1. С. 42–50. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=89213528 (дата обращения 11.05.2026). DOI: 10.17122/1999-5458-2026-22-1-42-50.

17. Гуляев И. В., Васенин А. Б., Степанов С. Е., Крюков О. В., Зюзев А. М. Экспериментальные исследования по мониторингу параметров изоляции трансформаторов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2026. № 2 (257). С. 29–38. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=89088773 (дата обращения 11.05.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 004.415.53
DOI 10.17513/snt.40817

CC BY 4.0

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕСТИРОВАНИЯ ГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА ANDROID-ПРИЛОЖЕНИЙ БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ ИСХОДНОГО КОДА С ВНЕДРЕНИЕМ ТЕСТОВОГО АГЕНТА

Голдышев Д. М. ORCID ID 0009-0001-4773-5616,
Фетисов М. В. ORCID ID 0000-0002-4363-7920

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Российская Федерация, e-mail: goldyshev.work@mail.ru

Автоматизация тестирования графического интерфейса Android-приложений затрудняется, если тестируемый продукт поставляется в виде готового пакета, а изменение его исходного кода недопустимо. Внешние средства автоматизации работают только с видимым представлением и не дают доступа к внутренним объектам интерфейса приложения. Целью работы является расширение приёма динамической инъекции кода на платформу Android при сохранении неинвазивности: внедрение тестового агента в процесс приложения, организация канала связи с внешней системой тестирования и передача параметров сеанса без изменения исходного кода и манифеста приложения. Методологическую основу составили анализ механизмов динамической загрузки разделяемых библиотек, изучение средств проброса соединений, проектирование архитектуры метода и его прикладная апробация на эмуляторе Android для приложений на основе фреймворка Qt. В результате определены действия по формированию тестового экземпляра приложения, способ загрузки агента вместе с приложением и схема обмена данными с внешней системой тестирования без изменения состава компонентов и разрешений приложения. Сформулированы условия неинвазивности через сохранение публичного контракта приложения и семантики его наблюдаемого поведения, определены границы применимости метода. Полученные результаты подтверждают возможность тестирования графического интерфейса Android-приложений на основе фреймворка Qt с доступом к объектной модели интерфейса без изменения исходного кода тестируемого продукта.

Ключевые слова: динамическая инъекция кода, автоматизированное тестирование, объектная модель интерфейса, графический пользовательский интерфейс, фреймворк Qt, неинвазивное тестирование, Android

METHOD FOR AUTOMATED GRAPHICAL INTERFACE TESTING OF ANDROID APPLICATIONS WITHOUT SOURCE CODE MODIFICATION THROUGH TEST AGENT INJECTION

Goldyshev D. M. ORCID ID 0009-0001-4773-5616,
Fetisov M. V. ORCID ID 0000-0002-4363-7920

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University», Moscow, Russian Federation, e-mail: goldyshev.work@mail.ru

Automating graphical interface testing of Android applications is hindered when the application under test is shipped as a prebuilt package and modifying its source code is not permitted. External automation tools operate only on the visible representation and do not provide access to the internal objects of the application interface. The aim of the work is to extend dynamic code injection to the Android platform while preserving non-invasiveness: injecting the test agent into the application process, organizing a communication channel with the external testing system, and passing session parameters without modifying the source code or the application manifest. The methodological basis comprised analysis of dynamic loading mechanisms for shared libraries, study of connection-forwarding facilities, design of the method architecture, and its applied evaluation on an Android emulator for applications based on the Qt framework. As a result, the steps for preparing a test instance, loading the agent together with the application, and the data exchange scheme with the external testing system have been defined without changing the components or permissions of the application. The conditions of non-invasiveness, based on preserving the public contract of the application and the semantics of its observable behavior, were formulated, and the applicability boundaries of the method were defined. The obtained results confirm the feasibility of testing the graphical interface of Android applications based on the Qt framework with access to the interface object model without modification of the source code of the application under test.

Keywords: dynamic code injection, automated testing, graphical user interface, interface object model, Qt framework, non-invasive testing, Android

Введение

Автоматизированное регрессионное тестирование графического интерфейса мобильных приложений приобретает особую значимость по мере роста сложности пользовательских сценариев и частоты выпуска обновлений на платформе Android [1-3]. Ошибки взаимодействия и отображения нередко обусловлены динамическим состоянием приложения и проявляются исключительно на уровне пользовательского интерфейса [4; 5], что повышает требования к точности и устойчивости средств автоматизации. Поставка приложений в виде упакованных артефактов формата APK дополнительно усложняет задачу: исходный код тестируемого продукта зачастую недоступен либо его модификация недопустима по организационным или юридическим причинам, а формат APK, в отличие от настольных бинарных артефактов, дополнительно регламентирован требованиями подписи и метаданных уровня операционной системы.

Существующие подходы к автоматизации тестирования Android-приложений включают визуальное распознавание элементов интерфейса, средства уровня операционной системы и решения, опирающиеся на интерфейсы доступности или скриншоты [6-8]. Внешние подходы зависят от внешнего представления интерфейса и характеризуются недостаточной точностью идентификации элементов в условиях эволюции графического интерфейса [9-11]. Решения, требующие интеграции в проект тестируемого приложения, противоречат сценарию работы с готовым APK без доступа к исходному коду [12-14].

В ранее опубликованной работе авторами был сформулирован метод неинвазивного автоматизированного тестирования графического интерфейса настольных Qt-приложений [15]. Данный метод был рассмотрен применительно к настольным операционным системам, где внедрение тестового агента может выполняться с использованием штатных механизмов предзагрузки или принудительной загрузки разделяемых библиотек. На платформе Android такие механизмы не имеют прямого аналога, поскольку приложение поставляется в виде APK-пакета, а его компоненты, разрешения и параметры запуска фиксируются в манифесте AndroidManifest.xml – декларативном описании приложения. Поэтому перенос подхода на Android требует решения трёх связанных задач: внедрения тестового агента в адресное пространство процесса приложения без модификации исходного кода и декларативного описания приложения; организации канала связи между агентом и внешней системой тестирования без добавления новых Android-разрешений; передачи параметров сеанса агенту в условиях отсутствия привычной для настольных приложений командной строки и управляемого набора переменных окружения процесса.

Под неинвазивностью в настоящей работе понимается сохранение публичного контракта приложения (имени пакета, набора компонентов, заявленных разрешений) и семантики его поведения. Соответствие этому требованию принципиально для применимости метода к Android-приложениям рассматриваемого класса, поставляемым в виде готового APK, поскольку нарушение хотя бы одного из элементов публичного контракта может привести к расхождению наблюдаемого поведения с поведением исходного приложения.

Цель исследования – расширение приёма динамической инъекции кода на платформу Android при сохранении неинвазивности: внедрение тестового агента в процесс приложения, организация канала связи с внешней системой тестирования и передача параметров сеанса без правки исходного кода и манифеста.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являются Android-приложения с графическим интерфейсом, реализованным на основе фреймворка Qt (Qt Widgets либо Qt Quick/QML), поставляемые в виде упакованных артефактов формата APK. Выбор Qt обусловлен распространённостью этого фреймворка для создания кроссплатформенных приложений и развитой объектной моделью интерфейса [15].

Методологическая основа исследования включала анализ документации Android NDK и инструментов сборки в части механизмов динамической загрузки разделяемых библиотек и формата APK, изучение механизма проброса соединений средствами ADB, проектирование архитектуры метода и его прикладную апробацию. Апробация метода проводилась на наборе тестовых Android-приложений, разработанных с использованием Qt 5.15, 6.5 и 6.8. В состав набора входили приложения, реализующие графический интерфейс с применением Qt Widgets и Qt Quick/QML. Экспериментальная проверка была направлена на подтверждение применимости метода к различным версиям Qt и двум основным технологиям построения интерфейса в рамках единой схемы внедрения тестового агента. Проверка выполнялась на эмуляторе Android.

Результаты исследования и их обсуждение

На платформе Android подготовка к динамической инъекции кода выполняется на этапе формирования тестового экземпляра APK и заключается в дополнении его файловой структуры тестовым агентом без изменения логики самого приложения, а непосредственная загрузка агента происходит с помощью штатного механизма динамической компоновки Android. По аналогии с механизмами предзагрузки разделяемых библиотек в Linux и macOS [15] предлагаемый подход использует штатный механизм разрешения зависимостей при загрузке нативных библиотек.

Подготовительный этап включает анализ исходного APK как контейнера приложения: определяется целевая архитектура процессора, состав размещённых в пакете нативных разделяемых библиотек и версия фреймворка Qt, с которой было собрано тестируемое приложение. Получение мажорной и минорной версий Qt необходимо для выбора сборки тестового агента, совместимой с приложением на уровне бинарного интерфейса: несовпадение версии может привести к ошибкам загрузки библиотеки агента либо к некорректной работе при обращении к объектной модели интерфейса. Мажорная версия определяется по именам базовых библиотек Qt, а минорная – по метаданным, содержащимся в нативной библиотеке ядра Qt.

После выбора совместимого агента формируется временный тестовый экземпляр APK: архив приложения распаковывается, в область нативных библиотек выбранной архитектуры копируется библиотека агента и только отсутствующие зависимости, необходимые для её загрузки, а в динамическую секцию основной нативной библиотеки приложения с помощью patchelf[1] добавляется запись DT_NEEDED с именем библиотеки агента. Затем тестовый экземпляр APK заново упаковывается без служебных данных исходной подписи, выравнивается утилитой zipalign[2] в соответствии с требованиями Android и подписывается тестовым ключом с помощью apksigner[3]. Принципиальной особенностью является то, что файл AndroidManifest.xml на этой цепочке не модифицируется: имя пакета, набор компонентов приложения, объявленные разрешения и иные элементы публичного контракта остаются неизменными. В обобщённом виде алгоритм формирования тестового экземпляра APK представлен в листинге 1.

Из перечисленных операций единственная содержательная модификация бинарных артефактов – добавление одной записи DT_NEEDED в динамическую секцию основной разделяемой библиотеки приложения. Машинный код основной нативной библиотеки не изменяется: преобразование затрагивает только её служебную динамическую секцию, в которую добавляется запись о зависимости от агента. Остальные прикладные компоненты исходного APK не модифицируются; из тестовой копии исключаются только служебные данные исходной подписи, поскольку после переупаковки они становятся недействительными. Механизм добавления записи DT_NEEDED по назначению сопоставим с предзагрузкой через LD_PRELOAD в Linux: в обоих случаях обеспечивается загрузка дополнительной разделяемой библиотеки в адресное пространство процесса при запуске приложения. В результате агент загружается на раннем этапе инициализации нативной части приложения, до начала основной работы Qt-приложения, что создаёт условия для регистрации хуков объектной модели интерфейса.

Установление связи между агентом, работающим внутри процесса Android-приложения, и внешней системой тестирования осложняется тем, что использование сетевых TCP-сокетов на стороне приложения требует объявления разрешения android.permission.INTERNET в манифесте приложения. Добавление такого разрешения изменяло бы публичный контракт приложения и нарушало бы требование неинвазивности. Поэтому в качестве транспортного механизма на стороне устройства используется Unix domain socket в abstract namespace[4], то есть локальный сокет семейства AF_UNIX, адресуемый не файловым путём, а именем в пространстве имён ядра. Такой сокет не создаёт объекта в файловой системе и не относится к сетевому семейству AF_INET, вследствие чего его использование не требует ни дополнительных прав доступа к файлам, ни объявления сетевого разрешения Android.

Связь с внешней системой тестирования устанавливается с использованием штатного механизма проброса соединений Android Debug Bridge[5].

[1] patchelf – A small utility to modify the dynamic linker and RPATH of ELF executables. URL: https://github.com/NixOS/patchelf (дата обращения: 02.04.2026).

[2] Android Developers. zipalign. URL: https://developer.android.com/tools/zipalign (дата обращения: 02.04.2026).

[3] Android Developers. apksigner. URL: https://developer.android.com/tools/apksigner (дата обращения: 02.04.2026).

[4] Linux Programmer's Manual: unix(7) – sockets for local interprocess communication. URL: https://man7.org/linux/man-pages/man7/unix.7.html (дата обращения: 11.04.2026).

[5] Android Developers. Android Debug Bridge (adb) reference: forward command. URL: https://developer.android.com/tools/adb#forwardports (дата обращения: 16.04.2026).

Входные данные:
A – исходный APK;
B – целевая ABI;
L_agent – разделяемая библиотека тестового агента;
L_main – основная нативная библиотека приложения;
D_agent – множество зависимостей, необходимых для загрузки агента;
D_app – множество нативных библиотек, присутствующих в исходном APK;
K – тестовый ключ подписи.
Выходные данные:
A_test – подписанный тестовый APK.
1. Создать временный рабочий каталог W.
2. Распаковать A в W.
3. Удалить из W служебные данные исходной подписи.
4. Поместить L_agent в каталог нативных библиотек для ABI B.
5. Для каждой зависимости d ∈ D_agent: если d ∉ D_app, то скопировать d из комплекта Qt for Android, использованного при сборке исходного приложения.
6. Добавить в динамическую секцию L_main запись DT_NEEDED с именем L_agent:
   patchelf --add-needed name(L_agent) L_main.
7. Упаковать содержимое W в неподписанный APK A_unsigned.
8. Выполнить выравнивание A_unsigned:
   zipalign -f 4 A_unsigned A_aligned.
9. Подписать A_aligned тестовым ключом K:
   apksigner sign --ks K --out A_test A_aligned.
10. Вернуть A_test.

Листинг 1. Алгоритм формирования APK с внедрённым тестовым агентом
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

```
# Создание локального TCP-порта на управляющей машине
# и перенаправление подключений к abstract socket на Android-устройстве.
adb forward tcp:<host_port> localabstract:<abstract_socket_name>
# Запуск Activity тестируемого приложения.
# Имя abstract socket передаётся через Intent extras, чтобы агент создал и прослушивал точку,
# соответствующую пробросу, заранее настроенному управляющим процессом.
adb shell am start -n <package_name>/<activity_name> \
   --es <ipc_name_key> <abstract_socket_name>
```

Листинг 2. Обобщённая схема проброса соединения
и запуска Android-приложения с передачей имени канала связи
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования.

```
// Создание локального Unix domain socket внутри процесса Android-приложения.
sockaddr_un address;
int socketFd = socket(AF_UNIX, SOCK_STREAM, 0);
std::memset(&address, 0, sizeof(address));
address.sun_family = AF_UNIX;
// Первый байт sun_path равен '\0', поэтому имя сокета
// интерпретируется как имя в abstract namespace, а не как путь в ФС.
std::memcpy(address.sun_path + 1, socketName, socketNameLength);
socklen_t addressLength = offsetof(sockaddr_un, sun_path) + 1 + socketNameLength;
// Агент создаёт конечную точку, к которой ADB перенаправит соединение.
bind(socketFd, reinterpret_cast<sockaddr*>(&address), addressLength);
// После listen агент может принять подключение управляющего процесса.
listen(socketFd, backlog);
```

Листинг 3. Ключевые операции создания Unix domain socket
в abstract namespace на стороне агента
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования.

На управляющей машине создаётся локальный TCP-порт, а удалённой конечной точкой проброса указывается Unix domain socket в abstract namespace на Android-устройстве. Поскольку механизм adb forward не создаёт такой сокет самостоятельно, он должен быть предварительно создан процессом, работающим в Android-среде. В предлагаемом методе эту функцию выполняет тестовый агент, находящийся внутри процесса приложения: он создаёт и прослушивает именованный abstract socket, после чего управляющий процесс подключается к локальному TCP-порту на хост-машине, перенаправленному средствами ADB к этому сокету. После принятия соединения агентом формируется двусторонний IPC-канал, в рамках которого дальнейшее взаимодействие агента и управляющего процесса не зависит от исходного разделения на слушающую и подключающуюся стороны. Такая организация связи не требует повышения привилегий приложения на устройстве и не изменяет набор его Android-разрешений. Обобщённая последовательность настройки канала связи и запуска приложения приведена в листинге 2, а ключевые операции создания abstract socket на стороне агента – в листинге 3.

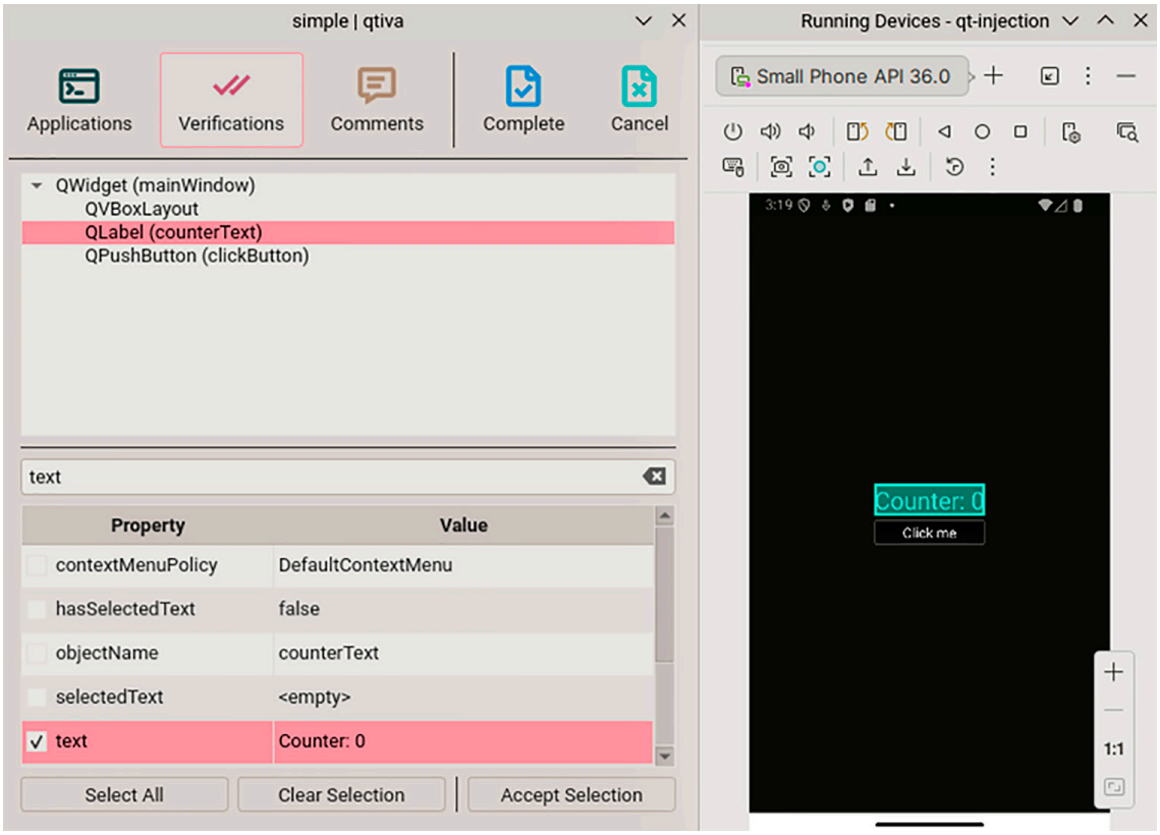
Передача служебных параметров тестового сеанса осуществляется через механизм Intent extras, то есть через дополнительные пары «ключ – значение», включаемые в объект Intent при запуске Android Activity. В предлагаемой схеме таким образом передаётся, в частности, имя Unix domain socket в abstract namespace, необходимое агенту для создания конечной точки связи с управляющим процессом. Команда adb shell am start поддерживает передачу строковых параметров с помощью аргумента --es, что позволяет задать эти данные на этапе запуска приложения без изменения манифеста и без использования переменных окружения процесса. После загрузки агент считывает переданные значения через интерфейс Java Native Interface, обращаясь к методам объекта Intent, связанного с текущей Activity.

Особенность данного способа состоит в том, что агент может быть загружен раньше, чем Qt-слой Android-приложения завершит привязку текущей Activity к нативному окружению. Поэтому чтение параметров сеанса выполняется не однократно, а с использованием ограниченного числа отложенных попыток с небольшой задержкой между ними. Такая схема учитывает жизненный цикл Qt for Android и не требует синхронизации с пользовательским кодом приложения, что важно для сохранения неинвазивности метода и его применимости к приложениям с различной структурой инициализации.

Поддержание актуального представления объектной модели интерфейса внутри процесса осуществляется тем же способом, что и для настольных приложений [15]: тестовый агент устанавливает обработчики хуков Startup, AddQObject и RemoveQObject через интерфейс qtHookData, сохраняя адреса исходных обработчиков и делегируя им выполнение после собственной обработки. Это сохраняет семантику работы приложения и совместимость с возможным пользовательским кодом, использующим тот же механизм. Адресация элементов интерфейса осуществляется по иерархическому пути в объектной модели, формируемому по приоритету признаков элемента: заданное имя объекта, иные семантические атрибуты, тип объекта и позиция среди однотипных элементов на текущем уровне иерархии.

Для прикладной апробации предложенный метод был реализован в экспериментальном прототипе системы автоматизированного тестирования Qt-приложений qtiva. В рамках настоящей работы qtiva рассматривается не как предмет самостоятельного анализа, а как экспериментальная реализация предложенного метода, позволяющая проверить его применимость в полном тестовом сеансе. Для каждой конфигурации из описанного выше набора проверялись подготовка тестового APK, запуск приложения на эмуляторе Android, загрузка агента в адресное пространство приложения, передача параметров сеанса, установление IPC-канала и получение сведений об объектной модели графического интерфейса.

На рисунке приведён репрезентативный пример одного из тестовых сеансов для приложения на Qt 5.15 с интерфейсом Qt Widgets: в эмуляторе Android выполняется тестируемое приложение, а в отдельном окне управляющего процесса отображается дерево объектов его интерфейса, полученное агентом изнутри процесса приложения. Наличие такого дерева демонстрирует достижение основного результата апробации: внешний процесс получает сведения о внутренней объектной модели Android-приложения без модификации исходного кода и манифеста. При этом рисунок иллюстрирует один экспериментальный прогон, тогда как проверка работоспособности метода выполнялась для всего набора тестовых приложений.



Отображение дерева объектов интерфейса Android-приложения в управляющей панели при записи тестового сценария
Примечание: получено авторами в ходе экспериментальной апробации метода

К ограничениям метода относится необходимость согласования мажорной и минорной версий Qt, использованных при сборке тестируемого приложения и тестового агента. Отдельным ограничением является формирование производного APK, подписанного тестовым ключом: в условиях контролируемого тестового стенда это допустимо, однако для приложений, поведение которых зависит от исходной подписи, требуется дополнительный режим проверки либо отдельное обоснование применимости метода.

Заключение

В результате исследования разработан метод неинвазивного автоматизированного тестирования графического интерфейса Android-приложений на основе динамической инъекции кода. Метод обеспечивает внедрение тестового агента в процесс приложения без модификации исходного кода и манифеста, передачу параметров сеанса через механизм Intent extras и установление связи между агентом и внешней системой тестирования с использованием Unix domain socket в abstract namespace и штатных средств проброса соединений ADB.

Систематизированы операции цепочки переупаковки APK, обеспечивающие добавление тестового агента в адресное пространство процесса приложения через механизм динамического связывания операционной системы. Сформулированы условия неинвазивности, заключающиеся в сохранении публичного контракта приложения и семантики его поведения. Применимость метода подтверждена апробацией на эмуляторе Android для тестовых приложений на Qt Widgets и Qt Quick/QML.

Список литературы

1. Mahmud T., Che M., Ngu A., Yang G. Why Android app testing falls short: empirical insights from open-source projects and a practitioner survey // Empirical Software Engineering. 2025. Vol. 30. No. 6. Art. 163. DOI: 10.1007/s10664-025-10726-x.

2. Linares-Vásquez M., Moran K., Poshyvanyk D. Continuous, Evolutionary and Large-Scale: A New Perspective for Automated Mobile App Testing // IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution (ICSME '17). 2017. P. 399–410. DOI: 10.1109/ICSME.2017.27.

3. Kong P., Li L., Gao J., Liu K., Bissyandé T.F., Klein J. Automated Testing of Android Apps: A Systematic Literature

Review // IEEE Transactions on Reliability. 2019. Vol. 68. No. 1. P. 45–66. DOI: 10.1109/TR.2018.2865733.

4. Kousar A., Khan S. U. R., Mashkoor A., Iqbal J. A Systematic Literature Review on Graphical User Interface Testing Through Software Patterns // IET Software. 2025. Vol. 2025. No. 1. Art. 9140693. DOI: 10.1049/sfw2/9140693.

5. Deshmukh P. S., Date S. S., Mahalle P. N., Barot J. Automated GUI Testing for Enhancing User Experience (UX): A Survey of the State of the Art // ICT Systems and Sustainability. Springer, Singapore. 2023. P. 619–628. DOI: 10.1007/978-981-99-5652-4_55.

6. Nie L., Said K.S., Ma L., Zheng Y., Zhao Y. A systematic mapping study for graphical user interface testing on mobile apps // IET Software. 2023. Vol. 17. No. 3. P. 249–267. DOI: 10.1049/sfw2.12123.

7. Hu C., Neamtiu I. Automating GUI testing for Android applications // Proceedings of the 6th International Workshop on Automation of Software Test (AST '11). ACM, New York. 2011. P. 77–83. DOI: 10.1145/1982595.1982612.

8. Choudhary S. R., Gorla A., Orso A. Automated Test Input Generation for Android: Are We There Yet? // Proceedings of the 30th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE '15). IEEE. 2015. P. 429–440. DOI: 10.1109/ASE.2015.89.

9. Yu S., Fang C., Li X., Ling Y., Chen Z., Su Z. Effective, Platform-Independent GUI Testing via Image Embedding and Reinforcement Learning // ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. 2024. Vol. 33. No. 7. P. 175:1–175:27. DOI: 10.1145/3674728.

10. Vos T. E. J., Aho P., Ricós F. P., Valdes O.R., Mulders A. Testar: Scriptless Testing Through Graphical User Interface // Software Testing, Verification and Reliability. 2021. Vol. 31. No. 3. Art. e1771. DOI: 10.1002/stvr.1771.

11. Spinak J. Model-based GUI automation // Software and Systems Modeling. 2025. DOI: 10.1007/s10270-025-01319-9.

12. Gu T., Sun C., Ma X., Cao C., Xu C., Yao Y., Zhang Q., Lu J., Su Z. Practical GUI Testing of Android Applications via Model Abstraction and Refinement // Proceedings of the 41st IEEE/ACM International Conference on Software Engineering (ICSE '19). IEEE. 2019. P. 269–280. DOI: 10.1109/ICSE.2019.00042.

13. Su T., Meng G., Chen Y., Wu K., Yang W., Yao Y., Pu G., Liu Y., Su Z. Guided, stochastic model-based GUI testing of Android apps // Proceedings of the 11th Joint Meeting on Foundations of Software Engineering (ESEC/FSE 2017). ACM. 2017. P. 245–256. DOI: 10.1145/3106237.3106298.

14. Moran K., Linares-Vásquez M., Bernal-Cárdenas C., Vendome C., Poshyvanyk D. CrashScope: A Practical Tool for Automated Testing of Android Applications // Proceedings of the IEEE/ACM 39th International Conference on Software Engineering Companion (ICSE-C '17). IEEE. 2017. P. 15–18. DOI: 10.1109/ICSE-C.2017.16.

15. Голдышев Д. М., Фетисов М. В. Метод неинвазивного автоматизированного тестирования графического интерфейса настольных приложений на основе динамической инъекции кода // Современные наукоёмкие технологии. 2026. № 3. С. 14–20. DOI: 10.17513/snt.40700.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 681.5:66.074.51
DOI 10.17513/snt.40818

CC BY 4.0

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕННОГО АБСОРБЕРА

[1]Голодков Ю. Э. ORCID ID 0000-0002-5536-6814,
[1]Голодкова А. В., [2]Китаев А. В.

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск, Российская Федерация, e-mail: yrg27@mail.ru
[2]Иркутский авиационный завод – филиал ПАО «Яковлев», Иркутск, Российская Федерация

Настоящее исследование посвящено разработке программно-аппаратного комплекса для автоматизированного управления и контроля работы пенного абсорбера. Целью работы является минимизация производственных и экологических рисков, связанных с эксплуатацией оборудования, включая предотвращение аварийных выбросов и поломок. Основой разработанного комплекса является система на базе контроллера Arduino Nano, оснащённая модулями для измерения и управления ключевых технологических параметров: pH, проводимости и уровня жидкости. Для оповещения персонала реализована система уведомлений через GSM-канал (SMS и голосовые вызовы). Ключевой особенностью предложенного решения является алгоритм, учитывающий инерционность объекта управления. Для исключения ложных срабатываний и подтверждения критических ситуаций в систему интегрированы таймеры задержки. Предложена многоуровневая логика реагирования: при превышении допустимого времени регулирования система переходит в режимы «Тревога» и «Авария» с последующим автоматическим отключением установки и адресным оповещением персонала. Результатом исследования является программно-аппаратный комплекс, предназначенный для оперативного регулирования параметров технологического процесса, предупреждения аварийных ситуаций и минимизации неблагоприятных экологических последствий. Разработанные алгоритмы позволяют эффективно распознавать и устранять инциденты, обеспечивая высокий уровень промышленной и экологической безопасности.

Ключевые слова: автоматизированное управление, пенный абсорбер, программно-аппаратный комплекс, промышленная и экологическая безопасность

A HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEM FOR AUTOMATED CONTROL AND MONITORING OF INDUSTRIAL AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF A FOAM ABSORBER

[1]Golodkov Yu. E. ORCID ID 0000-0002-5536-6814,
[1]Golodkova A. V., [2]Kitaev A. V.

[1] Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Irkutsk National Research Technical University", Irkutsk, Russian Federation, e-mail: yrg27@mail.ru;
[2]Irkutsk Aviation Plant, a branch of PJSC "Yakovlev", Irkutsk, Russian Federation

This study focuses on the development of a hardware and software system for the automated control and monitoring of a foam absorber. The objective is to minimize production and environmental risks associated with equipment operation, including preventing accidental emissions and breakdowns. The developed system is based on an Arduino Nano controller, equipped with modules for measuring and controlling key process parameters: pH, conductivity, and liquid level. A GSM notification system (SMS and voice calls) is implemented to alert personnel. A key feature of the proposed solution is an algorithm that takes into account the inertia of the controlled object. Delay timers are integrated into the system to eliminate false alarms and confirm critical situations. Multi-level response logic is proposed: if the permissible control time is exceeded, the system switches to "Alarm" and "Emergency" modes, followed by automatic shutdown of the unit and targeted notification of personnel. The result of the research is a hardware and software system designed for the rapid regulation of process parameters, the prevention of emergencies, and the minimization of adverse environmental impacts. The developed algorithms enable the effective recognition and resolution of incidents, ensuring a high level of industrial and environmental safety.

Keywords: automated control, foam absorber, hardware and software system, industrial and environmental safety

Введение

В современных условиях функционирования нефтегазохимических, машиностроительных и смежных производств очистка газовых выбросов является критически важным звеном [1], определяющим не только технологическую эффективность, но и экологический статус предприятия [2; 3, с. 15]. Пенные абсорберы, благодаря высокой интенсивности массообмена и развитой поверхности контакта фаз, остаются одними из наиболее востребованных аппаратов для очистки отходящих газов [4; 5]. Процесс поглощения в пенном абсорбере зависит от плотности, вязкости и размера пузырьков, газовая смесь очищается по пенной технологии, посредством промывания водой [6]. Абсорберы успешно удаляют химически активные газы, пыль, мелкодисперсные взвеси, занимая важное место в современных системах очистки отходящих газов [7]. Однако высокая эффективность данных аппаратов неразрывно связана с гидродинамической нестабильностью пенного режима [8], узкий диапазон устойчивой работы создает постоянные риски «захлебывания» или, напротив, «провала» жидкости, что ведет к аварийным выбросам и поломкам оборудования.

В связи с обновленными правилами эксплуатации установок очистки газа [9; 10] усиливаются требования к контролю и управлению параметрами очистных установок, и традиционные системы автоматизации, основанные на жёстких пороговых значениях [11], часто не справляются с динамическими изменениями пенного слоя. Это приводит к возникновению большого числа ложных тревог или недостаточному обнаружению критических ситуаций.

Цель исследования состояла в создании интеллектуального программно-аппаратного комплекса (ПАК) на базе современных промышленных контроллеров, реализующего функции автоматизированного регулирования параметров пенного абсорбера и эффективного оповещения персонала.

Использование данного комплекса позволит снизить производственные и экологические риски, возникающие при эксплуатации абсорбера вследствие внезапных выбросов газовых смесей и повреждения оборудования.

В ходе исследования были определены ключевые задачи:

• разработка алгоритма интеллектуального оповещения на основе анализа динамики технологических параметров;

• обеспечение надежного контроля и управления процессом очистки преимущественно в автоматическом режиме;

• создание систем раннего обнаружения аномалий и предупреждение аварийных ситуаций.

Материалы и методы исследования

Для достижения поставленной цели исследования был применён комплексный подход, включающий следующие методы.

• Теоретические методы: анализ научно-технической литературы и существующих патентов в области автоматизации газоочистного оборудования, а также системный анализ гидродинамических процессов в пенном абсорбере как объекте управления.

• Проектно-конструкторские методы: схемотехническое проектирование аппаратной части комплекса, выбор элементной базы, а также разработка алгоритмов логического управления и алгоритмов интеллектуального оповещения.

• Экспериментальные методы: сборка и отладка макета системы, проведение испытаний для определения оптимальной конфигурации контроллера и настройки временных задержек (таймеров) с учётом инерционности процесса.

Результаты исследования и их обсуждение

Абсорберы представляют собой сложные объекты управления, характеризующиеся значительной инерционностью и длительным временем запаздывания практически по всем каналам передачи сигналов [12]. Кроме этого, для них характерна существенная распределенность параметров, что требует применения распределённого контроля и, в ряде случаев, распределённых регулирующих воздействий [13].

Абсорбер для очистки воздуха выполнен в виде колонны, установленной над баком с абсорбентом, и состоит из следующих основных частей:

- корпус абсорбера;
- циркуляционный бак с абсорбентом;
- циркуляционный контур с насосом.

Работа абсорбера начинается с подачи абсорбента, который поступает на решётки корпуса. При поступлении воздушной смеси происходит контакт двух потоков, которые идут в разных направлениях. При этом происходит очищение от вредных компонентов в составе и задержка сторонних примесей [14]. После этого газовая смесь проходит через специальный каплеотбойник, а абсорбирующее вещество поступает обратно в ёмкость циркуляционного корпуса. Жидкость, в которой больше нет необходимости, выходит из бака циркуляции через насос, расположенный в нижней части корпуса.

В качестве абсорбента используется вода. Величину pH абсорбента необходимо поддерживать в диапазоне 5-10, а проводимость – максимально до 8000 мкСм/см. Эти показатели достигаются путем соответствующего добавления раствора гидроксида натрия (5%) или раствора соляной кислоты (5%) в абсорбер. Поэтому основными контролируемыми параметрами являются величина pH и показатель проводимости. Относительная несложность технологического процесса [15; 16] приводит зачастую к использованию ручного способа контроля технологических параметров и построению циклической системы управления. Анализ примеров эксплуатации пенных абсорберов на предприятиях химической, нефтехимической, нефтегазоперерабатывающей, энергетической, машиностроительной и в смежных отраслях [2; 17] показал, что отсутствие непрерывного измерения контролируемых параметров и автоматического управления исполнительными механизмами функции долива (в зависимости от состояния абсорбирующего вещества) приводит к нестабильной работе установки очистки в целом, увеличению выброса вредных веществ в атмосферу с превышением ПДК, повышенному расходу абсорбирующего вещества, более частой утилизации отработанного абсорбента, который представляет собой опасный отход производства.

Предлагаемый программно-аппаратный комплекс позволяет решить следующие проблемы управления производственного и экологического характера:

- необходимость учёта нестабильности и инерционности изменения контролируемых параметров (pH, проводимость):

- обеспечение соответствующих временных задержек работы исполнительных механизмов, возможности селективного выбора способа регулировки путём добавления абсорбирующего вещества (воды) либо реагентов (кислота, щелочь);

- обеспечение оперативного и избирательного оповещения обслуживающего персонала в случае превентивной необходимости и при возникновении аварийных ситуаций с помощью GSM-связи, голосовыми и SMS-сообщениями.

Аппаратная реализация блока управления и измерения программно-аппаратного комплекса системы контроля и управления пенным абсорбером была выполнена на основе структурной схемы (рис. 1).

Управляющим устройством разработанного ПАК служит плата Arduino Nano на базе 8-битного микроконтроллера Atmega328P (Microchip) с тактовой частотой 16 МГц. Память контроллера включает 32 КБ флеш-памяти, 2 КБ оперативной памяти и 1 КБ энергонезависимой памяти для хранения данных. На плате Arduino Nano доступно 14 цифровых входов/выходов (6 из них могут использоваться в качестве ШИМ-выходов), 6 аналоговых входов. Каждый из этих контактов может быть настроен как на вход, так и на выход.

Работа сигнализатора ПЛК АТ-200 как самостоятельного устройства в составе программно-аппаратного комплекса системы контроля и управления пенным очистным абсорбером предусматривает управление исполнительными устройствами (насосы, клапаны и др.) и устройствами оповещения (лампы, голосовые извещатели и др.), подключаемыми к выходам прибора в зависимости от управляющих сигналов, которые поступают от внешних источников (pH-метр, датчик проводимости, датчик уровня, кнопки и выключатели) в соответствии с алгоритмом работы (рис. 2).

После включения комплекса сигнализатор АТ-200 активирует реле питания системы (реле аварийного отключения), запускает внутренний таймер (необходим для стабилизации процессов в абсорбере после включения) и по истечении таймера переходит в режим ожидания. В этом режиме контролируется состояние входов от pH-метра, датчика проводимости и датчика уровня. Нормальное состояние: «высокий» уровень на входе pH-метра, «низкий» на входе датчика уровня (уровень абсорбирующей жидкости в норме).

При увеличении величины pH и проводимости в баке абсорбера до установленного максимального значения pH-метр изменяет сигнал на «низкий», после этого запускается внутренний таймер, так как с учётом особенностей работы абсорбера, связанной с инерционностью химических процессов и запаздыванием, для обеспечения стабильности работы необходимо исключить колебания переходных процессов и быть уверенным в достоверности достижения фактического химического равновесия в баке абсорбера.

Если за время работы таймера произошло изменение состояния на входе pH-метра и кондуктометра на нормальное (уровень сигнала высокий), то таймер сбрасывается и АТ-200 продолжает находиться в режиме ожидания.

Если по истечении времени работы таймера состояние на входе pH-метра и кондуктометра не изменилось, запускается процесс регулирования значения pH и проводимости в баке абсорбера путём включения реле насоса промывки. Включение происходит на заданные интервалы времени для того, чтобы жидкость успела перемешаться циркуляционным насосом и химический состав стабилизировался.

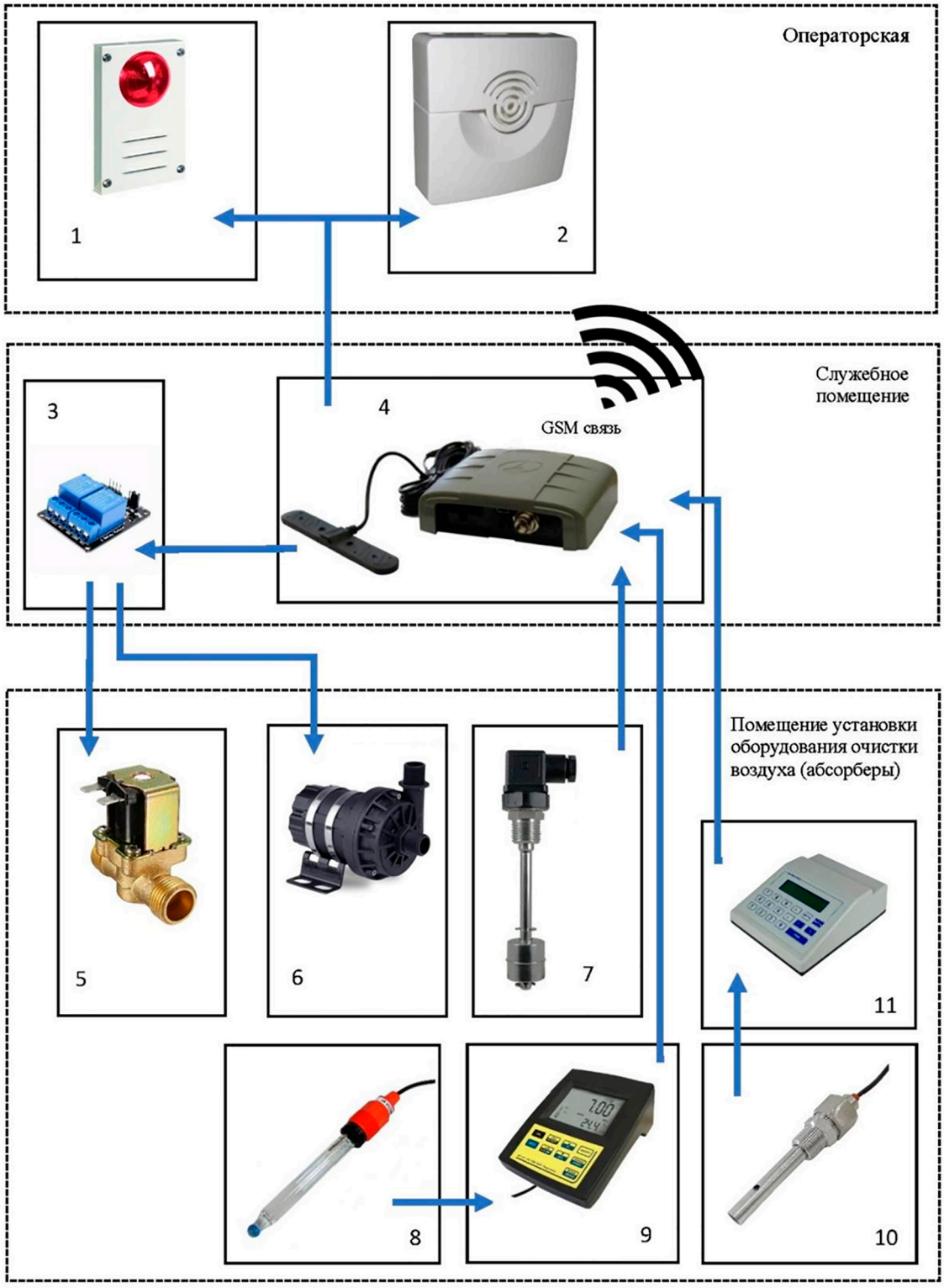


Рис. 1. Структурная схема ПАК:
1 – световой оповещатель; 2 – речевой оповещатель; 3 – релейный модуль;
4 – ПЛК АТ-200; 5 – клапан подачи реагента; 6 – насос промывки; 7 – датчик уровня;
8 – pH-электрод; 9 – pH-метр; 10 – датчик проводимости; 11 – кондуктометр.
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

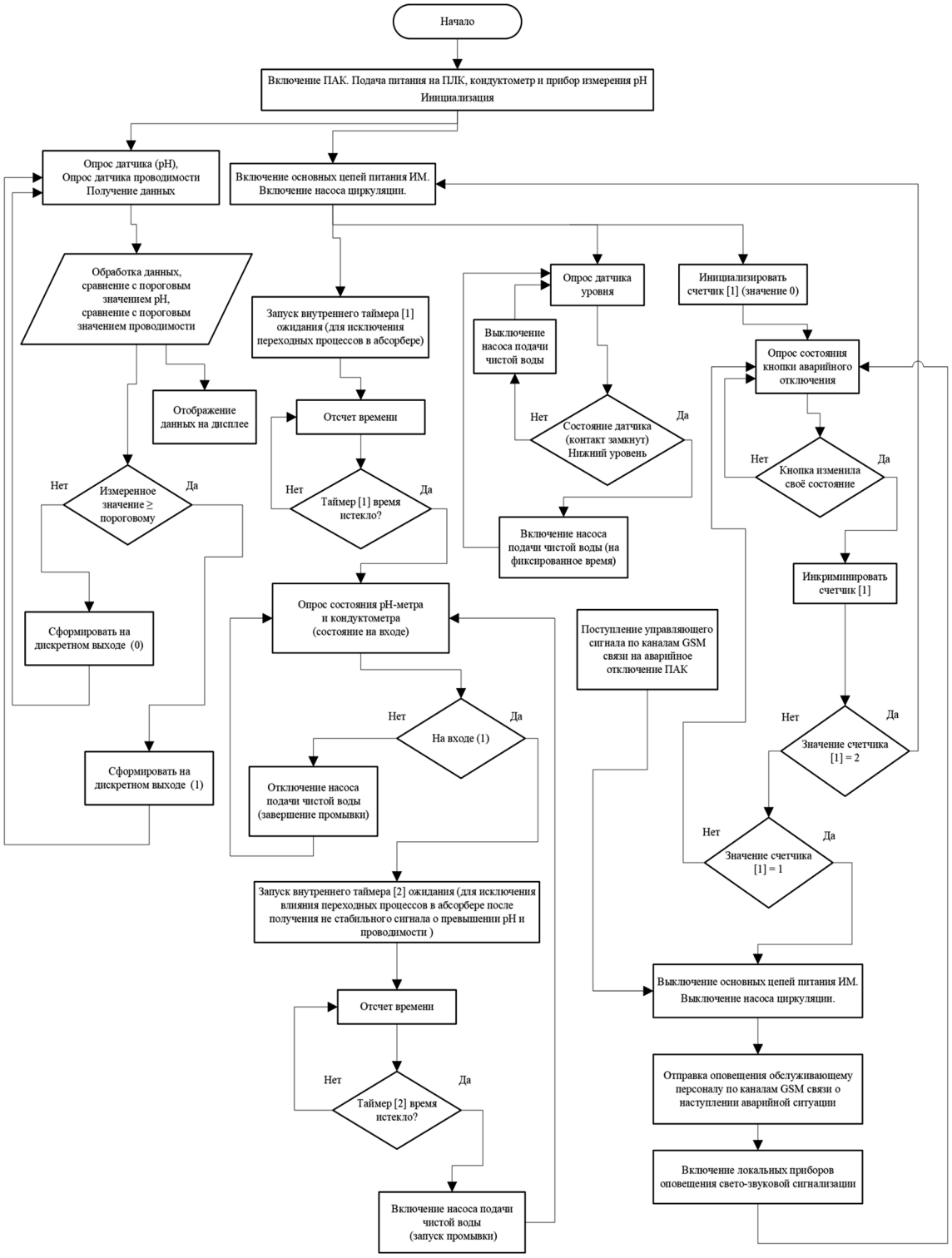


Рис. 2. Алгоритм работы программно-аппаратного комплекса
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

Одновременно с включением насоса запускается внутренний таймер, служащий для активации оповещения об аварийном событии. Другими словами, на процесс регулирования pH и проводимости в баке абсорбера отведено определённое время, по истечении которого система воспринимает это как аварийное состояние,

переходит в состояние тревоги и пытается привлечь внимание обслуживающего персонала путём включения реле сигнальных устройств, дозвона оператору по номеру телефона и отправкой SMS-сообщений.

Причём этот процесс обратимый (система «сомневается»), и при нормализации значения pH и проводимости в баке абсорбера реле оповещения отключается, дозвон прекращается, все таймеры сбрасываются, реле насоса выключается и устройство вновь переходит в режим ожидания.

Одновременно с оповещением (состояние «Тревога») запускается внутренний таймер, отвечающий за переход устройства в режим «Авария», по истечении которого (система «не сомневается») происходит аварийное отключение всей установки очистки. Включается реле системы оповещения, активируется дозвон оператору по номеру телефона с отправкой SMS-сообщений. К списку дозвона можно подключить руководителей и ответственных лиц, так как аварийное отключение установки очистки воздуха может сопровождаться рядом негативных ситуаций, для компетентного принятия решения которых действий одного оператора недостаточно.

Выход из режима «Авария» возможен вручную, командой с кнопки с ограниченным доступом (кнопка с ключевой блокировкой), после чего АТ-200 программно переинициализируется, и алгоритм работы восстановится сначала.

Процесс работы насоса подачи жидкости отключается командой pH-метра и проходит по времени в соответствии с настройками таймера без опасности переполнения бака, так как сброс абсорбирующей жидкости осуществляется переливом.

По факту стабилизации уровня pH и проводимости абсорбирующего раствора (уровень входа pH-метра высокий, реле насоса подачи жидкости отключено) происходит включение реле насоса откачки абсорбирующего раствора с целью нормализации рабочего уровня в баке абсорбера. Работа насоса прекращается по сигналу датчика уровня, на заданное время, чтобы исключить опустошение бака абсорбера в случае поломки или некорректной работы датчика уровня. Контроль осуществляется по нижнему уровню.

Регулирование уровня pH и проводимости абсорбирующего раствора реализовано двумя способами. Во-первых, это подача в бак абсорбера чистого абсорбирующего вещества (воды) и подача концентрированных реагентов из внешнего хранилища (бака, ёмкости) включением клапана подачи реагента в бак абсорбера. При этом алгоритм работы АТ-200 остаётся неизменным. Во-вторых, переключение исполнительных механизмов (насос, клапан) осуществляется переключением питающей цепи питания устройств механическим переключателем, размещенным на панели управления оператора.

Возможность применения концентрированных реагентов позволит сократить расходы на утилизацию отработанного, химически опасного абсорбирующего вещества и носит исключительно экономический фактор.

Функция оперативного и избирательного оповещения обслуживающего персонала в составе задач программно-аппаратного комплекса была решена следующим образом.

Для оповещения и информирования обслуживающего персонала выбрано решение по применению компактных, встроенных GSM/GPRS-модулей с возможностью адресного дозвона и SMS-информирования.

В случае, когда помещение оператора расположено недалеко от места установки прибора, для простоты и удобства оповещения можно применять оповещатели различных конструкций, подключенных по проводной схеме. Функция голосового (речевого) уведомления также актуальна, особенно в схемах с множественным подключением оборудования, это позволит конкретизировать место для привлечения обслуживающего персонала. В этом случае допускается использование активных речевых оповещателей с возможностью записи собственного речевого сообщения типа С-МД, имеющих возможность записи пользовательских сообщений через встроенный микрофон длительностью до 30 сек. Также допускается параллельная установка световых оповещателей любой удобной конструкции, предусматривающей установку в соответствии с классом пожароопасности помещения.

Сигнализатор АТ-200 представляет собой устройство, обладающее гибкой конфигурацией. Порядок работы сигнализатора АТ-200 при различных режимах определяется при его программировании. Сигнализатор АТ-200 принимает команды от пользователя, сигналы с входных контактов, внутренние сигналы и, в зависимости от запрограммированного алгоритма работы, выполняет определенный порядок действий.

В памяти сигнализатора АТ-200 формируется телефонная книга. Абоненты, включенные в нее, имеют доступ для взаимодействия с сигнализатором АТ-200. Попытки

абонентов, не включенных в телефонную книгу, установить соединение с сигнализатором АТ-200 будут проигнорированы. Из номеров, включенных в телефонную книгу, можно сформировать список дозвона, по которому сигнализатор АТ-200 будет совершать циклическое оповещение (в режиме голосового соединения), информируя абонентов о наступлении какого-либо события. Оповещение по списку дозвона рекомендуется использовать в случае наступления тревоги или других экстренных событий. Время, в течение которого сигнализатор АТ-200 будет пытаться установить соединение с абонентами из списка дозвона, составляет 10 минут. Если по истечении 10 минут сигнализатор АТ-200 не получит от абонента сигнал подтверждения, то он прекратит попытку установить соединение с абонентом.

Сигнализатор АТ-200 оснащен четырьмя цифровыми входами, тремя цифроаналоговыми входами, шестью выходами (четыре на 0,5 А и два на 1 А), отдельным выходом для светового индикатора и двумя входами для подключения питания 12 В. Сигнализатор обладает гибкой конфигурацией, что позволяет пользователю запрограммировать его под свои требования. Программирование выполняется с помощью комплекта программного обеспечения.

В процессе программирования определяются:

1) список команд пользователя для управления исполнительными устройствами;

2) список событий, под событием понимается:

- появление (отсутствие) одного из внешних сигналов: сигналы с датчиков, электропитание;

- изменение внутренних установок (срабатывание внутреннего таймера);

3) источники инициирования события;

4) набор действий, выполняемых при появлении события, передача сигналов исполнительным устройствам (включение звуковой, световой сигнализации);

5) список абонентов, к которым должен обращаться сигнализатор АТ-200 в случае тревоги.

Одно событие может быть инициировано разными источниками. Таким образом, выполняется гибкая настройка логики работы сигнализатора АТ-200.

Заключение

В рамках проведённого исследования разработан программно-аппаратный комплекс (ПАК) для автоматизированного управления и контроля пенного очистного абсорбера. В основу функционирования комплекса положен анализ ключевых технологических параметров: уровня pH, проводимости абсорбирующего раствора и уровня жидкости в баке.

Управление исполнительными механизмами (насосами подачи и отбора жидкости, клапаном подачи реагентов) осуществляется на основе алгоритмов ПЛК АТ-200, что обеспечивает непрерывную корректировку химического состава и поддержание стабильного режима работы. Система реализует многоуровневую логику реагирования: при превышении допустимого времени работы механизмов алгоритм переводит систему в режимы «Тревога» и «Авария» с последующим автоматическим отключением и адресным оповещением персонала (SMS, голосовые вызовы).

Результатом работы является готовый к внедрению программно-аппаратный комплекс, который обеспечивает оперативный контроль, предупреждение аварийных ситуаций и минимизацию экологических рисков. Практическая значимость решения заключается в возможности его применения на предприятиях нефтегазохимического и смежных комплексов для повышения промышленной безопасности и эффективности очистки газовых выбросов.

Список литературы

1. Толстых А. С., Пундик М. А. Обезвреживание диоксида серы в пенных фильтрах // Безопасность и ресурсосбережение в техносфере: сборник материалов IV Международной научно-практической конференции (г. Краснодар, 29 апреля 2024 г.). Краснодар: Издательство Кубанского государственного технологического университета, 2024. С. 257-260. EDN RJEEBV.

2. Носырев М. А., Комляшев Р. Б., Ильина С. И., Кабанов О. В. Очистка газовых выбросов от диоксида серы на промышленных предприятиях // Экология и промышленность России. 2018. № 22 (8). С. 24-27. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-8-24-27. EDN: UVPLIK.

3. Меренцов Н. А., Головančиков А. Б., Персидский А. В., Топилин М. В. Моделирование процессов управления в нефтегазоперерабатывающем массообменном оборудовании: монография. Волгоград: Издательство ВолгГТУ, 2021. 212 с. ISBN: 978-5-9948-4171-6.

4. Чиженьков Б. А. Современные способы очистки газа // Совершенствование методов гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений. 2022. Т. 1. № 1 (47). С. 108-113. EDN: GGSVDH.

5. Юлдашев Т. Р. Основа оборудования, используемого в процессе очистки газоабсорбционной технологии // Universum: технические науки. 2023. № 5 (110). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/15461 (дата обращения: 23.04.2026).

6. Мирошниченко С. Т., Пухлий В. А., Ильчевский Р. А., Марунич В. А., Пантель В. О. Применение метода абсорбции для очистки газовоздушных выбросов // Энергетические установки и технологии. 2020. Т. 6. № 1. С. 105-117. EDN: OCHLOG.

7. Чиженьков Б. А., Кузнецов С. С. Очистка газа в современных газоочистных установках // Ресурсоэнергоэф-

фективные технологии в строительном комплексе региона. 2022. № 1 (14). С. 289-293. EDN: OZTVYQ.

8. Берденников А. А., Богданов Д. С. Регулирование уровня воды в абсорберах водной очистки газа // Судостроение. 2015. № 1. (818). С. 54-56. EDN: UJKZJV.

9. Ситдикова А. В., Мамаев А. В., Кузнецов Д. А., Селиваненко О. И., Новиков Д. В., Корыстов С. М., Васильева Е. О. Экспериментальный комплекс по исследованию процесса абсорбционной очистки: научный подход к разработке и испытаниям абсорбентов очистки газа от кислых компонентов // Газовая промышленность. 2025. № S3 (886). С. 80-85. EDN: NUJFFE.

10. Приказ Минприроды России от 21.03.2025 № 124. Об утверждении Правил эксплуатации установок очистки газа. Зарегистрировано в Минюсте России 30 апреля 2025 г. № 82023 // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_504542/ (дата обращения: 23.04.2026).

11. Патент № 2693785 Российская Федерация, МПК B01D 53/14 (2006.01), G05D 27/00 (2006.01). Способ автоматического управления процессом абсорбции: № 2018147818: заявл. 29.12.2018: опубл. 04.07.2019 / Силаев А. А., Силаева Е. Ю., Шевчук В. П.; заявитель ВолгГТУ, 8 с. URL: https://patents.google.com/patent/RU2693785C1/ru (дата обращения: 23.04.2026).

12. Меренцов Н. А., Персидский А. В., Голованчиков А. Б. Управление массообменными процессами при сорбционной очистке газовых выбросов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2022. Т. 10. № 2 (37). Порядковый номер: 11. URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1179 (дата обращения: 23.04.2026). DOI: 10.26102/2310-6018/2022.37.2.023. EDN: IABRCV.

13. Паршуков А. Н. Математическая модель технологического процесса абсорбции природного газа // Вестник СибГУТИ. 2022. № 1 (57). С. 68-76. DOI: 10.55648/1998-6920-2022-16-1-68-76. EDN: EGKNKP.

14. Биргер Е. В., Лебедев В. В., Зизюк А. П., Иванова Е. В. Проектирование абсорберов для очистки воздуха от газо- и парообразных примесей // Науковедение. 2016. Т. 8. № 2 (33). С. 99. URL: http://naukovedenie.ru/PDF/04TVN216.pdf (дата обращения: 23.04.2026). DOI: 10.15862/04TVN216.

15. Шкуропатов А. В., Громов О. Б., Волоснев А. В. Жидкостные способы очистки выбросных газов, содержащих фтороводород // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2025. № 2 (128). С. 63-72. EDN: JJLQCL.

16. Островский Ю. В., Заборцев Г. М., Кожанов А. Л., Литвяк М. А., Бацунов К. А. Анализ работы газоочистной установки обжигового участка получения технического селена // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2014. № 4. С. 65-69. EDN: SQJAAL.

17. Носырев М. А., Комляшев Р. Б., Ильина С. И. Расчет гидравлического сопротивления и удерживающей способности в абсорберах с псевдоожиженной насадкой // Экология и промышленность России. 2013. № 7. С. 37-41. EDN: QDFELP.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 519.873
DOI 10.17513/snt.40819

CC BY 4.0

ПРИМЕНЕНИЕ СКРЫТЫХ МАРКОВСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЙ ТРЕХЭЛЕМЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

Даева С. Г. ORCID ID 0000-0001-9660-7365

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Российская Федерация, e-mail: daeva.sg@yandex.ru

Статья посвящена разработке модели технической системы с элементами, состояния которых являются скрытыми. Для примера бралась система из трех элементов: два элемента системы работают параллельно, а третий соединен с ними последовательно. Работа системы определяется последовательностью выходных сигналов. Целью исследования является построение математической модели технической системы из трех элементов, обучение модели с целью максимально увеличить вероятность получения последовательности выходных сигналов. В работе такая система описывается как скрытая марковская модель. Для системы определен набор состояний, в которой она может находиться, и всевозможные переходы между состояниями с вероятностями переходов. Для полученного набора состояний задается матрица вероятностей появления сигналов и распределение вероятностей первоначального состояния. Для разных выходных последовательностей сигналов был проведен расчет вероятности появления и определен набор состояний, который мог привести к такой последовательности. Также было проведено обучение модели для выходных последовательностей до достижения вероятности появления равной единице с небольшой погрешностью. Исследование показало, что в среднем требуется менее 25 итераций обучения, что позволяет достаточно быстро обучать модель. Обученная модель может быть использована для предварительного анализа при последующей инженерной валидации.

Ключевые слова: скрытая марковская модель, матрица переходных вероятностей, обучение модели

APPLICATION OF HIDDEN MARKOV MODELS TO STATE ANALYSIS OF A THREE-ELEMENT SYSTEM

Daeva S. G. ORCID ID 0000-0001-9660-7365

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "MIREA – Russian Technological University", Moscow, Russian Federation, e-mail: daeva.sg@yandex.ru

The article is devoted to the development of a model of a technical system with elements whose states are hidden. For example, a system of three elements was taken: two elements of the system work in parallel, and the third is connected to them in series. The system's operation is determined by the sequence of output signals. The aim of the study is to construct a mathematical model of a technical system consisting of three elements, and to train the model in order to maximize the probability of obtaining a sequence of output signals. In this paper, such a system is described as a hidden Markov model. A set of states is defined for the system, in which it can be located, and all possible transitions between states with transition probabilities. For the resulting set of states, a matrix of signal probabilities and a probability distribution of the initial state is set. For different output sequences of signals, the probability of occurrence was calculated and a set of states was determined that could lead to such a sequence. The model was also trained for the output sequences until the probability of occurrence was one with a small error. The study showed that, on average, less than 25 training iterations are required, which allows you to train the model quickly enough. The trained model can be used for preliminary analysis during subsequent engineering validation.

Keywords: hidden Markov model, transition probability matrix, model training

Введение

Работа современных систем обеспечивается достаточно большим множеством внутренних элементов [1–3]. Зачастую эти элементы скрыты, и можно увидеть только результат их работы, представленный выходными сигналами системы. Отсюда возникает задача определения состояний, в которых находятся внутренние элементы системы, и определение влияния наборов этих состояний на выходные сигналы системы [4–6]. Такие задачи хорошо описываются скрытыми марковскими моделями (СММ).

СММ позволяют получать информацию о скрытых процессах, протекающих в системе, по имеющимся данным о выходных сигналах системы и о распределении возможности нахождения элементов системы в определенном наборе состояний [7; 8]. Такие задачи зачастую возникают при моделировании работы технических систем, например систем электроэнергетики [9], радиоэлектронной аппаратуры, датчиков расхода теплоносителя реактора АЭС [10] и т. п. СММ позволяют находить для системы вероятность получения последовательности выходных сигналов, наиболее вероятный

набор состояний элементов, который привел к такой выходной последовательности.

Цель исследования – построить математическую модель технической системы из трех элементов, обучить модель с целью максимально увеличить вероятность получения последовательности выходных сигналов.

Материал и методы исследования

Рассмотрим следующую систему из трех элементов: два элемента системы работают параллельно, а третий соединен с ними последовательно (рис. 1). Система находится в рабочем состоянии, если работает элемент 3 и если работает хотя бы один из элементов 1 или 2. После поломки элементы переходят в состояние восстановления. Если элемент 3 находится в режиме восстановления, то элементы 1 и 2 отключаются. Если элементы 1 и 2 оба находятся в режиме восстановления, то элемент 3 отключается.

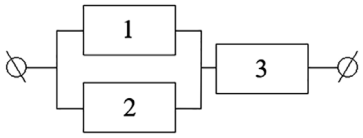


Рис. 1. Система из трех элементов
Примечание: составлен автором по результатам исследования

Будем считать, что время работы каждого элемента задается показательным распределением:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}.$$

Для каждого элемента зададим ожидаемое время работы без сбоев α_i, i = 1,2,3, оно будет являться математическим ожиданием [11]:

$$M\alpha_i = 1 / \lambda_i .$$

После того, как элемент выработает свое время α_i, он переходит в режим восстановления. Режим восстановления также описывается показательным распределением. Для режима восстановления обозначим показательную функцию как $g(x)$:

$$g(x) = \mu e^{-\mu x}.$$

Для каждого элемента зададим ожидаемое время восстановления β_i, i = 1,2,3, оно будет являться математическим ожиданием:

$$M\beta_i = 1 / \mu_i .$$

Положим, что система в начальный момент времени всегда находится в состоянии, когда работают все три элемента. Обозначим через S_1 первоначальное состояние системы. Также будем считать, что в первоначальное состояние невозможно попасть из других состояний системы. По мере работы системы она начинает переходить из первоначального состояния в другие состояния. Обозначим состояния, в которых может находиться система S_{klmn}, где k – номер элемента, в котором произошло изменение для перехода в это состояние, l. m, n – состояния, в котором находятся элементы 1, 2, 3 соответственно после изменения (в текущий момент). Элементы могут находиться в одном из трех состояний: 1 – элемент работает, 0 – элемент находится на восстановлении, 2 – элемент отключен.

Рассмотрим переходы системы из одного состояния в другое. Из состояния S_1 система может перейти в состояния S_{1011}, S_{2101} и S_{3220}. Состояние S_{1011} означает, что изменение произошло в элементе 1, и после изменения элемент 1 находится на восстановлении, а элементы 2 и 3 работают (рис. 2, а). Состояние S_{2101} – изменение в элементе 2, и после изменения элемент 2 находится на восстановлении, а элементы 1 и 3 работают (рис. 2, б). Состояние S_{3220} – изменение произошло в элементе 3, и после изменения элемент 3 находится на восстановлении, а элементы 1 и 2 отключены (рис. 2, в).

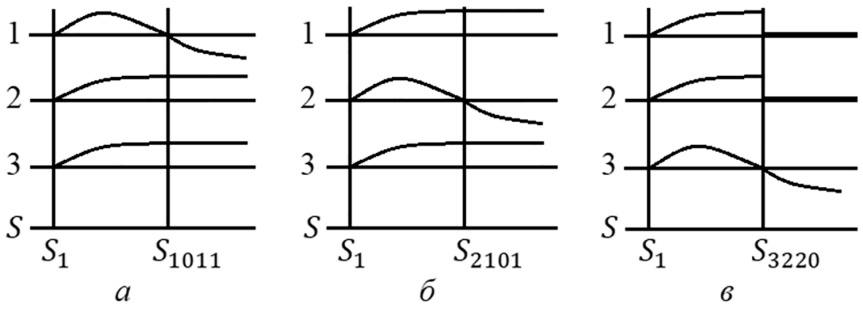


Рис. 2. Переходы из состояния S_1
Примечание: составлен автором по результатам исследования

Таблица 1

Таблица состояний системы S_i и вероятностей P_i^j возможных переходов

Состояние системы S_i	Состояния системы S_j, в которые можно перейти из S_i	Вероятности перехода P_i^j
S_1	S_{1011}	$\lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$
	S_{2101}	$\lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$
	S_{3220}	$\lambda_3 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$
S_{1111}	S_{1011}	$\lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$
	S_{2101}	$\lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$
	S_{3220}	$\lambda_3 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$
S_{1011}	S_{1111}	$\mu_1 / (\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$
	S_{2002}	$\lambda_2 / (\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$
	S_{3020}	$\lambda_3 / (\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$
S_{1101}	S_{1002}	$\lambda_1 / (\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_3)$
	S_{2111}	$\mu_2 / (\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_3)$
	S_{3200}	$\lambda_3 / (\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_3)$
S_{1002}	S_{1101}	$\mu_1 / (\mu_1 + \mu_2)$
	S_{2011}	$\mu_2 / (\mu_1 + \mu_2)$
S_{1220}	S_{3111}	1
S_{2111}	S_{1011}	$\lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$
	S_{2101}	$\lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$
	S_{3220}	$\lambda_3 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$
S_{2011}	S_{1111}	$\mu_1 / (\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$
	S_{2002}	$\lambda_2 / (\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$
	S_{3020}	$\lambda_3 / (\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$
S_{2101}	S_{1002}	$\lambda_1 / (\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_3)$
	S_{2111}	$\mu_2 / (\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_3)$
	S_{3200}	$\lambda_3 / (\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_3)$
S_{2002}	S_{1101}	$\mu_1 / (\mu_1 + \mu_2)$
	S_{2011}	$\mu_2 / (\mu_1 + \mu_2)$
S_{2220}	S_{3111}	1
S_{3111}	S_{1011}	$\lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$
	S_{2101}	$\lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$
	S_{3220}	$\lambda_3 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$
S_{3011}	S_{1111}	$\mu_1 / (\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$
	S_{2002}	$\lambda_2 / (\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$
	S_{3020}	$\lambda_3 / (\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$
S_{3101}	S_{1002}	$\lambda_1 / (\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_3)$
	S_{2111}	$\mu_2 / (\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_3)$
	S_{3200}	$\lambda_3 / (\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_3)$
S_{3200}	S_{2220}	$\mu_2 / (\mu_2 + \mu_3)$
	S_{3101}	$\mu_3 / (\mu_2 + \mu_3)$
S_{3020}	S_{1220}	$\mu_1 / (\mu_1 + \mu_3)$
	S_{3011}	$\mu_3 / (\mu_1 + \mu_3)$
S_{3220}	S_{3111}	1

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Аналогично можно рассмотреть переходы из всех возможных состояний системы. Обозначим P_i^j – вероятность перехода из состояния S_i в состояние S_j. Тогда можно посчитать вероятности перехода из состояния S_1 по формулам [12]:

$$P_1^{1011} = \min_{X=\min(\alpha_2,\alpha_3)} P(\alpha_1 < X) = \int_0^\infty f_1(x)\bar{F}_2(x)\bar{F}_3(x)dx = \frac{\lambda_1}{\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3},$$

$$P_1^{2101} = \min_{X=\min(\alpha_1,\alpha_3)} P(\alpha_2 < X) = \int_0^\infty f_2(x)\bar{F}_1(x)\bar{F}_3(x)dx = \frac{\lambda_2}{\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3},$$

$$P_1^{3220} = \min_{X=\min(\alpha_1,\alpha_2)} P(\alpha_3 < X) = \int_0^\infty f_3(x)\bar{F}_1(x)\bar{F}_3(x)dx = \frac{\lambda_3}{\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3},$$

$$\bar{F}_k(x) = 1 - F_k(x), F_k(x) = 1 - e^{-\lambda_k x}, k = 1,2,3.$$

Аналогично считаются все остальные вероятности перехода P_i^j. В табл. 1 приведены все возможные состояния системы и состояния, в которые из них можно перейти с вероятностями P_i^j. Если из состояния S_i нельзя перейти в состояние S_j, то $P_i^j = 0$. Заметим, что сумма вероятностей перехода из одного состояния S_i равна 1.

На основе полученных вероятностей строится матрица вероятностей переходов из состояния S_i в состояние S_j:

$$A = \{a_{ij}\} = \{P_{ij}\},$$

$$\sum_{j=1}^{N} a_{ij} = 1, i = 1,\ldots,N.$$

Далее рассмотрим решение трех основных задач СММ для описанной системы [13–15].

Задача 1. Пусть $S = S_1,S_2,\ldots,S_i$, $i = 1,\ldots,N$ – возможные состояния системы, $O = O_1,O_2,\ldots,O_t$, $t = 1,\ldots,T$ – последовательность, которую можно наблюдать при работе системы, O_t – выходные символы из известного алфавита V_k. Также считается известным матрица вероятностей переходов $A = \{P_{ij}\}$, матрица вероятностей появления символов $B = \{b_j(k)\}$, $b_j(k)$ – вероятность того, что в момент времени t система, которая находится в состоянии S_j, будет выдавать k-й символ из алфавита V_k, и распределение вероятностей первоначального состояния π_i, $i = 1,\ldots,N$ $\sum_{i=1}^{N} \pi_i = 1$.

Необходимо найти вероятность $P(O)$ того, что последовательность O была получена при работе заданной системы.

Задача 2. Для заданной системы найти последовательность состояний

$$Q = \{q_1, q_2, \ldots, q_t\}, q_i \in S, t = 1,\ldots,T,$$

которая наиболее соответствует наблюдаемой выходной последовательности O.

Задача 3. Обучить построенную модель таким образом, чтобы максимизировать вероятность $P(O)$ для выходной последовательности O, подобрав параметры системы A, B и π.

Алгоритмы для решения этих задач подробно описаны в источнике [13] и реализованы автором в программе, написанной на языке Python.

Результаты исследования и их обсуждение

Для расчетов положим алфавит

V_k = {″*не* работает″, ″работает″}.

Для упрощения представления положим

V_0 = ″*не* работает″=0, V_1=″работает″=1.

Тогда для каждого состояния S_i можно задать вероятности появления символов $b_j(V_k)$. Зададим их следующим образом:

$$b_i(0) = 0,98; b_i(1) = 0,02,$$

если хотя бы один из индексов *l, m, n* в номере состояния равен 2 (то есть система находится в состоянии V_0), иначе

$$b_i(0) = 0,02; b_i(1) = 0,98, i = 1,\ldots,N.$$

Поскольку предполагаем, что изначально система находится в состоянии S_1, то распределение вероятностей первоначального состояния $\pi_1 = 1$ и $\pi_i = 0$, $i = 2,\ldots,N$.

Положим время работы $\alpha_1 = \alpha_2 = 100$ ч, $\alpha_3 = 120$ ч, время восстановления β зададим так, чтобы β_3 было меньше β_1 и β_2.

Выходная последовательность O, которую можно наблюдать при работе системы, тогда будет представлять собой набор символов из алфавита V_k. Будем считать, что последовательность O всегда начина-

ется с символа "работает". Значения выходной последовательности фиксируются в момент смены состояния, следовательно, не может быть подряд более двух символов "*не* работает" (по табл. 1 возможны всего два таких случая: когда происходит переход из состояния S_{3200} в S_{2220}, и из состояния S_{3020} в S_{1220}).

Пусть O = {1,0,1,1,1,0,1,0,1,1}.

В табл. 2 представлены вероятности $P(O)$ того, что последовательность O получена при работе заданной системы при различных значениях β_i.

Таблица 2

Вероятность $P(O)$ в зависимости от времени восстановления β_i

β_1	β_2	β_3	$P(O)$
15 ч	12 ч	5 ч	0,0095
12 ч	15 ч	5 ч	0,0095
10 ч	8 ч	1 ч	0,0103
5 ч	4 ч	1 ч	0,0111

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 3

Последовательность состояний Q в зависимости от времени восстановления β

β_1	β_2	β_3	Q
15 ч	12 ч	5 ч	1, 3220, 3111, 1011, 2111, 3220, 3111, 3220, 3111, 1011
12 ч	15 ч	5 ч	1, 3220, 3111, 1011, 1111, 3220, 3111, 3220, 3111, 1011
10 ч	8 ч	1 ч	1, 3220, 3111, 1011, 2111, 3220, 3111, 3220, 3111, 1011
5 ч	4 ч	1 ч	1, 3220, 3111, 1011, 2111, 3220, 3111, 3220, 3111, 1011

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 4

Значения матрицы B после обучения

B	0,02	0,02	0,02	0,98	0,02	0,98	0,02	0,98	0,02	0,02	0,98	0,98	0,98	0,98	0,02	0,02	0,02	
	0,98	0,98	0,98	0,02	0,98	0,02	0,98	0,02	0,98	0,98	0,02	0,02	0,02	0,02	0,98	0,98	0,98	
B_1	0,00	0,05	0,00	0,00	0,34	0,99	0,06	0,00	0,00	0,34	0,99	0,99	0,00	0,00	0,00	0,34	0,34	
	1,00	0,95	1,00	1,00	0,66	0,01	0,94	1,00	1,00	0,66	0,01	0,01	1,00	1,00	1,00	0,66	0,66	
B_5	0,00	0,01	0,00	0,00	1,00	1,00	0,01	0,00	0,00	1,00	1,00	0,99	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	
	1,00	0,99	1,00	1,00	0,00	0,00	0,99	1,00	1,00	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	
B_{10}	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,99	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	
	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

В табл. 3 представлены последовательности состояний Q, которые наиболее соответствуют наблюдаемой последовательности O, для различных значений β.

Далее проведем обучение модели.

Положим β_1 = 15 ч, β_1 = 12 ч, β_1 = 5 ч, O = {1,0,1,1,1,0,1,0,1,1}. После обучения получим новые матрицы A, B, π и вероятность $P(O)$. В табл. 4 приведены исходная матрица B и матрица B после одного цикла обучения (B_1), после пяти циклов обучения (B_5) и после десяти циклов обучения (B_{10}).

Из табл. 5 видно, что модель стремится исключить ошибки, которые изначально были допущены в вероятностях выборов символов. Аналогично изменяется матрица вероятностей переходов A.

Таблица 5

Значения вероятностей $P(O)$ после обучения

$P(O)$	0,0095
$P_1(O)$	0,1167
$P_5(O)$	0,1525
$P_{10}(O)$	0,8551
$P_{14}(O)$	1,0

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 6

Количество итераций для наблюдаемых выходных последовательностей O

Наблюдаемая последовательность O	Количество итераций
$\{1,0,1,1,1,0,1,0,1,1\}$	13
$\{1,1,0,1,1,0,0\}$	6
$\{1,1,1,1,1,0,1\}$	25
$\{1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1\}$	47
$\{1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1\}$	36
$\{1,1,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0\}$	5
$\{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0

4. Викторова В. С., Степанянц А. С. Модели и методы расчета надежности технических систем. 2-е изд., испр. М.: Издательская группа URSS, ООО «ЛЕНАНД», 2016. 256 с. ISBN 978-5-9710-3368-4.

5. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности: Основные характеристики надежности и их статистический анализ. М.: Эдиториал УРСС. 2024. 584 с. ISBN 978-5-9519-4305-7.

6. Сидоров С. М. Скрытая марковская модель дублированной системы с горячим резервом и одним восстанавливающим устройством // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 12. С. 195–204. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40621 (дата обращения: 11.05.2026). DOI: 10.17513/snt.40621.

7. Ushakov I. A. Probabilistic Reliability Models. John Wiley & Sons Limited. 2012. 248 p. ISBN 9781118370742.

8. Mor B., Garhwal S., Kumar A. A Systematic Review of Hidden Markov Models and Their Applications // Archives of Computational Methods in Engineering. 2021. Vol. 28 P. 1429–1448 URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-020-09422-4 (дата обращения: 11.05.2026). DOI: 10.1007/s11831-020-09422-4. EDN: AHDTFV.

9. Сидоров С. М., Обжерин Ю. Е. Скрытая марковская модель системы массового обслуживания GI/G/2/0 с потерями // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2022. Т. 10 (4). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=50049086 (дата обращения: 11.05.2026). DOI: 10.26102/2310-6018/2022.39.4.012.

10. Перегуда А. И., Белозеров В. И. Прогнозирование надежности датчиков расхода теплоносителя ШАДР-32М // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2017. № 1. С. 51–62. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=29008986 (дата обращения: 11.05.2026). DOI: 10.26583/npe.2017.1.05.

11. Пакулин Н. В., Лаврищева Е. М., Рыжов А. Г., Зеленов С. В. Анализ методов оценки надежности оборудования и систем. Практика применения методов // Труды Института системного программирования РАН. 2018. № 30 (3). С. 99–120 URL: https://ispranproceedings.elpub.ru/jour/article/view/524 (дата обращения: 11.05.2026). DOI: 10.15514/ISPRAS-2018-30(3)-8.

12. Майструк А. В. Прогнозирование надежности и безопасности сложных технических систем при композиции законов распределения параметров структурных элементов // Научные труды КУБГТУ. 2019. № 3. С. 643–656. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=38099036 (дата обращения: 11.05.2026). EDN: XLSWHA.

13. Jurafskiy D., Martin J. H. Speech and Language Processing. Prentice Hall. 2008. 1024p. ISBN 0131873210.

14. Rabiner L. R. A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition // Proceedings of the IEEE. 1989. Vol. 77. Is. 2. P. 257–286. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/18626. (дата обращения: 11.05.2026). DOI: 10.1109/5.18626.

15. Christopher M. Bishop. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer. 2006. 778p. ISBN: 978-0387-31073-2.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 004.942
DOI 10.17513/snt.40820

CC BY 4.0

МЕТОД БЫСТРЫХ РАЗЛОЖЕНИЙ В КОНТЕКСТЕ КЛАССИЧЕСКОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ В ПАРАДИГМЕ НЕЛОКАЛЬНОСТИ

Дубровин А. С. ORCID ID 0000-0002-6338-5572, Сумин В. И., Кравченко А. С.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», Воронеж, Российская Федерация, e-mail: asd_kiziltash@mail.ru

Известные способы использования с применением современных компьютерных технологий эффективного вычислительного метода быстрых разложений в контексте классической математической физики относятся к парадигме локальности. В парадигме нелокальности возможности данного метода рассматривались в контексте классического гармонического системного анализа. Цель исследования – разработка способа использования эффективного вычислительного метода быстрых разложений в контексте классической математической физики в парадигме нелокальности с применением современных компьютерных технологий (посредством применения систем компьютерной алгебры и систем компьютерной математики для численных расчетов) путем подходящей адаптации этого метода к указанной парадигме. Искомый способ разработан на примере задачи Коши для системы двух обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений третьего порядка. Методы исследования: вычислительный метод быстрых разложений, а также метод вычислительного эксперимента с применением системы Maple 2025. Вычислены параметры двух быстрых разложений, построены кривые. Их отклонение наглядно показывает тормозящее действие радиационного трения. Научная новизна: способ использования эффективного вычислительного метода быстрых разложений в контексте классической математической физики с применением современных компьютерных технологий (посредством применения систем компьютерной алгебры и систем компьютерной математики для численных расчетов), отличающийся от известных аналогов адаптацией этого метода к парадигме нелокальности на примере задачи Коши для системы двух обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений третьего порядка, описывающей прямолинейное взаимное удаление в вакууме двух одноименных точечных электрических зарядов с возможностью учета радиационного трения. Практическая значимость: полученные результаты могут быть использованы при математическом моделировании физических процессов в контексте классической математической физики в парадигме нелокальности с применением современных компьютерных технологий (посредством применения систем компьютерной алгебры и систем компьютерной математики для численных расчетов) для использования эффективного вычислительного метода быстрых разложений за счет подходящей адаптации этого метода к парадигме нелокальности.

Ключевые слова: метод быстрых разложений, классическая математическая физика, задача Коши, парадигма нелокальности, ряды Фурье

FAST EXPANSIONS METHOD IN THE CONTEXT OF CLASSICAL MATHEMATICAL PHYSICS IN THE PARADIGM OF NONLOCALITY

Dubrovin A. S. ORCID ID 0000-0002-6338-5572, Sumin V. I., Kravchenko A. S.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies Named after G. F. Morozov", Voronezh, Russian Federation, e-mail: asd_kiziltash@mail.ru

Known applications of the efficient computational method of fast expansions in the context of classical mathematical physics, using modern computer technologies, relate to the locality paradigm. In the nonlocality paradigm, the capabilities of this method were considered in the context of classical harmonic systems analysis. The aim of this study is to develop a method for using the efficient computational method of fast expansions in the context of classical mathematical physics within the nonlocality paradigm using modern computer technologies (through the use of computer algebra systems and computer mathematics systems for numerical calculations) by appropriately adapting this method to this paradigm. The desired method was developed using the Cauchy problem for a system of two third-order ordinary nonlinear differential equations as an example. Research methods: the computational method of fast expansions, as well as a computational experiment using Maple 2025. The parameters of the two fast expansions were calculated, and curves were plotted. Their deviation clearly demonstrates the inhibitory effect of radiation friction. Scientific novelty: a method for using the efficient computational method of fast expansions in the context of classical mathematical physics using modern computer technologies (through the use of computer algebra systems and computer mathematics systems for numerical calculations). This method differs from known analogs by adapting this method to the nonlocality paradigm using the example of the Cauchy problem for a system of two ordinary nonlinear third-order differential equations describing the rectilinear mutual separation of two like-named point electric charges in a vacuum, with the ability to take into account radiation friction. Practical significance: The obtained results can be used in the mathematical modeling of physical processes in the context of classical mathematical physics within the nonlocality paradigm using modern computer technologies (through the use of computer algebra systems and computer mathematics systems for numerical calculations). This method is suitable for the application of the efficient computational method of fast expansions due to its appropriate adaptation to the nonlocality paradigm.

Keywords: fast expansion method, classical mathematical physics, Cauchy problem, nonlocality paradigm, Fourier series

Введение

В контексте классической математической физики применительно к решению краевых задач для нелинейных дифференциальных уравнений и их систем используется ряд эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий. Так, в [1] используется метод конечных интегральных преобразований, в [2] обсуждаются методы теории возмущений, вариационные методы, метод гомотопического возмущения, принцип максимума Понтрягина, используются метод энергетического баланса, метод Рунге – Кутты, в [3] исследуются метод Эйлера, метод Кранка – Николсон, метод Ньютона, метод линий.

Предложенный профессором А. Д. Чернышовым в [4] метод быстрых разложений занимает особое место в этом ряду в том смысле, что позволяет получить приближенное аналитическое решение краевой задачи в виде его разложения (так называемого быстрого разложения) в быстро сходящийся ряд по «удобным» для исследования функциям с возможностью многократного почленного дифференцирования. Быстрое разложение формируется на основе обычного ряда Фурье добавлением специальных членов (обычно полиномиальных), образующих так называемую граничную функцию, введение которой, как показано в [5], кардинально улучшает свойства ряда Фурье, в том числе скорость его сходимости. Данный метод успешно применялся в [6] для исследования некоторых математических моделей. Несмотря на достаточную универсальность метода, его применение к различным классам задач классической математической физики имеет свою специфику, обусловливающую необходимость разработки подходящего способа использования (надлежащей адаптации метода) с применением современных компьютерных технологий (посредством применения систем компьютерной алгебры и систем компьютерной математики для численных расчетов). Так, особенности применения при решении уравнений Навье – Стокса рассмотрены в [7], уравнения Пуассона – в [8]. В [9, 10] метод применялся к задачам деформируемого твердого тела. Особенности применения при решении задачи о диффузии рассмотрены в [11], задач теплопроводности – в [12, 13]. В [14, 15] метод применялся к моделированию полета космического корабля.

Эти и некоторые другие ранее разработанные способы использования эффективного вычислительного метода быстрых разложений в контексте классической математической физики с применением современных компьютерных технологий относятся к парадигме локальности, в которой физические взаимодействия, механические напряжения, потоки вещества и тепла распространяются локально. В парадигме же нелокальности взаимодействия имеют характер дальнодействия в смысле нелокальности, которое рассматривалось, например, в [16]. В этой парадигме возможности данного метода рассматривались в контексте классического гармонического системного анализа (одно из перспективных направлений системного анализа) в [17–19], но не в контексте классической математической физики.

Цель исследования – разработка способа использования эффективного вычислительного метода быстрых разложений в контексте классической математической физики в парадигме нелокальности с применением современных компьютерных технологий (посредством применения систем компьютерной алгебры и систем компьютерной математики для численных расчетов) путем подходящей адаптации этого метода к указанной парадигме.

Материалы и методы исследования

Методы исследования: вычислительный метод быстрых разложений, эффективный применительно к задачам классической математической физики, а также метод вычислительного эксперимента с применением Maple 2025 в качестве системы компьютерной алгебры и одновременно в качестве системы компьютерной математики для численных расчетов.

Показательный пример задачи классической математической физики в парадигме нелокальности – задача Коши:

$$\left(\theta_\alpha \ddot{s}_{\alpha\chi} - \chi \ddot{\ddot{s}}_{\alpha\chi}\right)\left(s_{1\chi} + s_{2\chi}\right)^2 = C_\alpha , \quad (1)$$

$$s_{\alpha\chi}\left(-\tau\right) = R_{0\alpha} > 0 , \; \dot{s}_{\alpha\chi}\left(-\tau\right) = R_{1\alpha} \geq 0 , \quad (2)$$

$$\ddot{s}_{\alpha 1}\left(-\tau\right) = \xi_\alpha \ddot{s}_{\alpha 0}\left(-\tau\right) = R_{2\alpha} \geq 0 , \quad (3)$$

где $\alpha = \overline{1,2}$, $\chi = \overline{0,1}$, $s_{\alpha\chi} = s_{\alpha\chi}\left(t\right) > 0$,

$-\tau \leq t \leq \tau$, $\tau > 0$, $\theta_\alpha > 0$, $C_\alpha > 0$, $0 < \xi_\alpha < 1$.

Естественная физическая интерпретация задачи (1)–(3) – прямолинейное с течением времени $t \in \left[-\tau, \tau\right]$ в инерциальной системе отсчета (ИСО) взаимное удаление в вакууме двух одноименных точечных электрических зарядов с номерами α (начало координат ИСО удобно выбрать так, что-

бы в начальный момент времени $t = -\tau$ центр масс был в нем и имел нулевую скорость),

где $\theta_\alpha = 6\pi c^3 \varepsilon_0 m_\alpha / Q_\alpha^{\,2}$; $C_\alpha = (3/2)\eta_\alpha$; $\eta_\alpha = Q_{3-\alpha}/Q_\alpha$; χ – индикатор радиационного трения ($\chi = 1$, если учитывается, $\chi = 0$, иначе); $Q_\alpha > 0$, $m_\alpha > 0$, $s_{\alpha\chi}$ – абсолютная величина, масса точечного заряда α и расстояние от него до начала координат с учетом χ; c – постоянная скорости света; ε_0 – электрическая постоянная. Эта интерпретация соединяет закон Кулона, формулу Лоренца и второй закон Ньютона [17–19]. Она не содержит в явном виде ни физических полей, ни сплошных материальных сред, ни прочих материальных посредников взаимодействия, а потому взаимодействие нелокально. Кроме того, (1) не содержит в явном виде запаздывания, а потому оно мгновенно. Выбор области определения $[-\tau; \tau]$ функций $s_{\alpha\chi}(t)$ не ограничивает общности рассмотрения и обусловлен удобством применения метода быстрых разложений для (1)–(3). Выбор ИСО накладывает ограничения на $R_{\beta\alpha}$, $\beta = \overline{0,1}$ в (2):

$$R_{\beta 1} m_1 = R_{\beta 2} m_2, \ \beta = \overline{0,1}. \qquad (4)$$

После введения инвариантных относительно выбора ИСО величины $R_0 = R_{01} + R_{02}$ и скорости (подходящим выбором τ удобно выбрать ее нулевой при $t = -\tau$) $R_1 = R_{11} + R_{12}$ взаимного удаления зарядов условие (2) уточняется в силу (4) формулой

$$R_{\beta\alpha} = \left(m_{3-\alpha} / \left(m_1 + m_2\right)\right) R_\beta,$$
$$\alpha = \overline{1,2}, \ \beta = \overline{0,1}, \ R_1 = 0. \qquad (5)$$

При $\chi = 0$ система двух зарядов замкнута, поэтому на всем промежутке времени $[-\tau; \tau]$ ее центр масс покоится в начале координат. Тогда

$$s_{20}(t) = (m_1/m_2)\, s_{10}(t)$$

и система уравнений (1) сводится к единственному уравнению

$$\ddot{s}_{10} s_{10}^{\,2} = C_0,$$

$$C_0 = m_2^{\,2} Q_1 Q_2 \Big/ \left(4\pi c^3 \varepsilon_0 m_1 \left(m_1 + m_2\right)^2\right). \qquad (6)$$

При $\chi = 1$ система зарядов диссипативна (теряет энергию на излучение за счет работы сил радиационного трения), поэтому ее центр масс движется с ненулевыми скоростью и ускорением на всем промежутке времени $(-\tau; \tau]$, и (1) не сводится к единственному уравнению.

Производные в (1) имеют как четный (второй), так и нечетный (третий) порядок, а такая ситуация подпадает под регламентацию метода быстрых разложений предпочтительного использования универсальных быстрых разложений, предложенных в [20]. Аппроксимация неизвестных функций $s_{\alpha\chi}(t)$ при заданном χ универсальными быстрыми разложениями $\hat{s}_{\alpha\chi pN}(t)$ с полиномиальными граничными функциями одинакового заданного четного порядка p с неизвестными коэффициентами $A_{\alpha\chi q}$ и с частичными суммами ряда Фурье заданного порядка N с неизвестными коэффициентами $a_{\alpha\chi 0}$, $a_{\alpha\chi m}$, $b_{\alpha\chi m}$, $m = \overline{1,N}$ имеет вид

$$s_{\alpha\chi}(t) \approx \hat{s}_{\alpha\chi pN}(t) = \sum_{q=0}^{p} A_{\alpha\chi q} P_q(t) + a_{\alpha\chi 0} + \sum_{m=1}^{N} \left(a_{\alpha\chi m} \cos\left(m\pi t/\tau\right) + b_{\alpha\chi m} \sin\left(m\pi t/\tau\right)\right), \qquad (7)$$

$$P_0(t) = t/(2\tau), \ P_{2q-1}(t) = \int_0^t P_{2q-2}(x)\,dx, \ P_{2q}(t) = \int_0^t P_{2q-1}(x)\,dx - (t/\tau)\int_0^a P_{2q-1}(x)\,dx, \qquad (8)$$

где $P_q(t)$ – быстрые полиномы А. Д. Чернышова, введенные в [20]. r-кратное ($r = \overline{0,p}$) дифференцирование (7) с использованием символа Кронекера $\delta_{..}$ и с подстановкой $t = -\tau$ дает

$$s_{\alpha\chi}^{\,(r)}(t) \approx \hat{s}_{\alpha\chi pN}^{\,(r)}(t) = \sum_{q=0}^{p} A_{\alpha\chi q} P_q^{(r)}(t) + a_{\alpha\chi 0}\delta_{r0} + \sum_{m=1}^{N} \left(m\pi/\tau\right)^s \left(a_{\alpha\chi m} \cos\left(m\pi t/\tau + s\pi/\tau\right) + b_{\alpha\chi m} \sin\left(m\pi t/\tau + s\pi/\tau\right)\right), \qquad (9)$$

$$s_{\alpha\chi}^{\,(r)}(-\tau) \approx \hat{s}_{\alpha\chi pN}^{\,(r)}(-\tau) = \sum_{q=0}^{p} A_{\alpha\chi q} P_q^{(r)}(-\tau) + a_{\alpha\chi 0}\delta_{r0} + \sum_{m=1}^{N} \left(m\pi/\tau\right)^r \left(a_{\alpha\chi m} \cos\left((r-2m)\pi/2\right) + b_{\alpha\chi m} \sin\left((r-2m)\pi/2\right)\right). \qquad (10)$$

В (10) $s_{\alpha\chi}{}^{(r)}(-\tau)$, $\alpha=\overline{1,2}$, $\chi=\overline{0,1}$, $r=\overline{0,1}$ и $s_{\alpha1}{}^{(2)}(-\tau)$, $\alpha=\overline{1,2}$ задаются начальными условиями (2), (3), (5), а $s_{\alpha\chi}{}^{(r)}(-\tau)$, $\alpha=\overline{1,2}$, $\chi=\overline{0,1}$, $r=\overline{2,p}$ и $s_{\alpha1}{}^{(r)}(-\tau)$, $\alpha=\overline{1,2}$, $r=\overline{3,p}$ находятся подстановкой $t=-\tau$ в результат многократного дифференцирования систем (1), (6).

Точность быстрых разложений (7)–(8) обусловлена величиной p и N. Искомые функции $\hat{s}_{10pN}(t)$, $\hat{s}_{11pN}(t)$, $\hat{s}_{21pN}(t)$ имеют $3p+6N+6$ параметров A_{10q}, A_{11q}, A_{21q}, a_{100}, a_{110}, a_{210}, a_{10m}, a_{11m}, a_{21m}, b_{10m}, b_{11m}, b_{21m}, $q=\overline{0,p}$, $m=\overline{1,N}$ – решение системы $3p+6N+6$ нелинейных алгебраических уравнений. Первые $3p+3$ из них есть (11) с заменой $\approx$ на $=$:

$$\hat{s}_{10pN}{}^{(r)}(-\tau)=s_{10}{}^{(r)}(-\tau), \tag{11}$$

$$\hat{s}_{11pN}{}^{(r)}(-\tau)=s_{11}{}^{(r)}(-\tau),\ \hat{s}_{21pN}{}^{(r)}(-\tau)=s_{21}{}^{(r)}(-\tau),\ r=\overline{0,p}. \tag{12}$$

Следующие $3N+3$ и последние $3N$ даются подстановкой $\hat{s}_{\alpha\chi}=\hat{s}_{\alpha\chi pN}$ в (1), (6), умножением на $\cos(m\pi t/\tau)$, $m=\overline{0,N}$ и на $\sin(m\pi t/\tau)$, $m=\overline{1,N}$, интегрированием по $t\in[-\tau,\tau]$:

$$\int_{-\tau}^{\tau}\left(\theta_\alpha\ddot{\hat{s}}_{\alpha1pN}-\dddot{\hat{s}}_{\alpha1pN}\right)\left(\hat{s}_{11pN}+\hat{s}_{21pN}\right)^2\cos\left(m\pi t/\tau\right)dt=\int_{-\tau}^{\tau}C_\alpha\cos\left(m\pi t/\tau\right)dt, \tag{13}$$

$$\int_{-\tau}^{\tau}\left(\theta_\alpha\ddot{\hat{s}}_{\alpha1pN}-\dddot{\hat{s}}_{\alpha1pN}\right)\left(\hat{s}_{11pN}+\hat{s}_{21pN}\right)^2\sin\left(m\pi t/\tau\right)dt=\int_{-\tau}^{\tau}C_\alpha\sin\left(m\pi t/\tau\right)dt, \tag{14}$$

$$\int_{-\tau}^{\tau}\ddot{\hat{s}}_{10pN}\cdot\hat{s}_{10pN}{}^2\cos\frac{m\pi t}{\tau}dt=\int_{-\tau}^{\tau}C_0\cos\frac{m\pi t}{\tau}dt,\ \int_{-\tau}^{\tau}\ddot{\hat{s}}_{10pN}\cdot\hat{s}_{10pN}{}^2\sin\frac{m\pi t}{\tau}dt=\int_{-\tau}^{\tau}C_0\sin\frac{m\pi t}{\tau}dt. \tag{15}$$

Система (12)–(14) относительно $A_{\alpha1q}$, $a_{\alpha10}$, $a_{\alpha1m}$, $b_{\alpha1m}$, $\alpha=\overline{1,2}$, $q=\overline{0,p}$, $m=\overline{1,N}$ для аппроксимации $s_{\alpha1}(t)$ по (7)–(8) и система (11), (15) относительно A_{10q}, a_{100}, a_{10m}, b_{10m}, $q=\overline{0,p}$, $m=\overline{1,N}$ для аппроксимации $s_{10}(t)$ по (7)–(8) независимы. Метод предусматривает трехкратное (по порядку системы) дифференцирование полиномиальных граничных функций со снижением их порядка на 3, после которого он должен остаться не ниже порядка системы (1): $p-3\geq3$. В итоге примем минимально допустимые $p=6$, $N=1$. Для $q=\overline{0,3}$ из (8) имеем

$$P_0(t)=t/(2\tau),\quad P_1(t)=t^2/(4\tau),\quad P_2(t)=t^3/(12\tau)-\tau t/12,\quad P_3(t)=t^4/(48\tau)-\tau t^2/24,$$
$$P_4(t)=t^5/(240\tau)-\tau t^3/72+7\tau^3t/720,\quad P_5(t)=t^6/(1440\tau)-\tau t^4/288+7\tau^3t^2/1440, \tag{16}$$
$$P_6(t)=t^7/(10080\tau)-\tau t^5/1440+7\tau^3t^3/4320-31\tau^5t/30240.$$

Дифференцирование (1) при $\chi=1$ и (6) с подстановкой $t=-\tau$ с учетом (2), (3), (5) дает

$$\dddot{s}_{\alpha1}(-\tau)/\theta_\alpha=R_{2\alpha}-C/\left(m_\alpha c^3R_0{}^2\right);\ s_{\alpha1}{}^{(4)}(-\tau)/\theta_\alpha=\ddot{s}_{\alpha1}(-\tau); \tag{17}$$

$$s_{\alpha1}{}^{(5)}(-\tau)/\theta_\alpha=s_{\alpha1}{}^{(4)}(-\tau)+\left(2C/\left(m_\alpha c^3R_0{}^3\right)\right)\left(R_{21}+R_{22}\right); \tag{18}$$

$$s_{\alpha1}{}^{(6)}(-\tau)/\theta_\alpha=s_{\alpha1}{}^{(5)}(-\tau)+\left(2C/\left(m_\alpha c^3R_0{}^3\right)\right)\left(\dddot{s}_{11}(-\tau)+\dddot{s}_{21}(-\tau)\right); \tag{19}$$

$$\ddot{s}_{10}(-\tau)=C_0/s_{10}{}^2(-\tau);\ \dddot{s}_{10}(-\tau)=s_{10}{}^{(5)}(-\tau)=0; \tag{20}$$

$$s_{10}{}^{(4)}(-\tau)=-2C_0\ddot{s}_{10}(-\tau)/s_{10}{}^3(-\tau);\ s_{10}{}^{(6)}(-\tau)=-11C_0s_{10}{}^{(4)}(-\tau)/s_{10}{}^3(-\tau). \tag{21}$$

Из (9), (10), (16) получаем для функций $\hat{s}_{1061}{}^{(r)}(t)$, $\hat{s}_{1161}{}^{(r)}(t)$, $\hat{s}_{2161}{}^{(r)}(t)$, $r=\overline{0,6}$ тридцати неизвестных параметров A_{10q}, a_{100}, a_{101}, b_{101}, $A_{\alpha1q}$, $a_{\alpha10}$, $a_{\alpha11}$, $b_{\alpha11}$, $\alpha=1,2$, $q=\overline{0,6}$:

$$\hat{s}_{\alpha\chi61}(t)=A_{\alpha\chi0}t/(2\tau)+A_{\alpha\chi1}t^2/(4\tau)+A_{\alpha\chi2}\left(t^3/(12\tau)-\tau t/12\right)+A_{\alpha\chi3}\left(t^4/(48\tau)-\tau t^2/24\right)+$$
$$+A_{\alpha\chi4}\left(t^5/(240\tau)-\tau t^3/72+7\tau^3t/720\right)+A_{\alpha\chi5}\left(t^6/(1440\tau)-\tau t^4/288+7\tau^3t^2/1440\right)+ \tag{22}$$
$$+\left(A_{\alpha\chi6}/1440\right)\left(t^7/(7\tau)-\tau t^5+7\tau^3t^3/3-31\tau^5t/21\right)+a_{\alpha\chi0}+a_{\alpha\chi1}\cos\left(\pi t/\tau\right)+b_{\alpha\chi1}\sin\left(\pi t/\tau\right);$$

$$\dot{\hat{s}}_{\alpha\chi 61}(t)=\left(A_{\alpha\chi 0}+A_{\alpha\chi 1}t\right)/(2\tau)+A_{\alpha\chi 2}\left(t^2/(4\tau)-\tau/12\right)+A_{\alpha\chi 3}\left(t^3/(12\tau)-\tau t/12\right)+$$
$$+A_{\alpha\chi 4}\left(t^4/(48\tau)-\tau t^2/24+7\tau^3/720\right)+A_{\alpha\chi 5}\left(t^5/(240\tau)-\tau t^3/72+7\tau^3 t/720\right)+$$
$$+A_{\alpha\chi 6}\left(t^6/(1440\tau)-\tau t^4/288+7\tau^3 t^2/1440-31\tau^5/30240\right)+\frac{\pi}{\tau}\left(b_{\alpha\chi 1}\cos(\pi t/\tau)-a_{\alpha\chi 1}\sin(\pi t/\tau)\right); \quad (23)$$

$$\ddot{\hat{s}}_{\alpha\chi 61}(t)=\left(A_{\alpha\chi 1}+A_{\alpha\chi 2}t\right)/(2\tau)+A_{\alpha\chi 3}\left(t^2/(4\tau)-\tau/12\right)+A_{\alpha\chi 4}\left(t^3/(12\tau)-\tau t/12\right)+$$
$$+A_{\alpha\chi 5}\left(\frac{t^4}{48\tau}-\frac{\tau t^2}{24}+\frac{7\tau^3}{720}\right)+A_{\alpha\chi 6}\left(\frac{t^5}{240\tau}-\frac{\tau t^3}{72}+\frac{7\tau^3 t}{720}\right)-\left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2\left(a_{\alpha\chi 1}\cos\frac{\pi t}{\tau}+b_{\alpha\chi 1}\sin\frac{\pi t}{\tau}\right); \quad (24)$$

$$\dddot{\hat{s}}_{\alpha\chi 61}(t)=\left(A_{\alpha\chi 2}+A_{\alpha\chi 3}\right)/(2\tau)+A_{\alpha\chi 4}\left(t^2/(4\tau)-\tau/12\right)+A_{\alpha\chi 5}\left(t^3/(12\tau)-\tau t/12\right)+$$
$$+A_{\alpha\chi 6}\left(t^4/(48\tau)-\tau t^2/24+7\tau^3/720\right)+(\pi/\tau)^3\left(a_{\alpha\chi 1}\sin(\pi t/\tau)-b_{\alpha\chi 1}\cos(\pi t/\tau)\right); \quad (25)$$

$$\hat{s}^{(4)}_{\alpha\chi 61}(t)=\frac{A_{\alpha\chi 3}}{2\tau}+\frac{A_{\alpha\chi 4}t}{2\tau}+A_{\alpha\chi 5}\left(\frac{t^2}{4\tau}-\frac{\tau}{12}\right)+A_{\alpha\chi 6}\left(\frac{t^3}{12\tau}-\frac{\tau t}{12}\right)+\left(\frac{\pi}{\tau}\right)^4\left(a_{\alpha\chi 1}\cos\frac{\pi t}{\tau}+b_{\alpha\chi 1}\sin\frac{\pi t}{\tau}\right); \quad (26)$$

$$\hat{s}^{(5)}_{\alpha\chi 61}(t)=\left(A_{\alpha\chi 4}+A_{\alpha\chi 5}t\right)/(2\tau)+A_{\alpha\chi 6}\left(t^2/(4\tau)-\tau/12\right)+(\pi/\tau)^5\left(b_{\alpha\chi 1}\cos(\pi t/\tau)-a_{\alpha\chi 1}\sin(\pi t/\tau)\right); \quad (27)$$

$$\hat{s}^{(6)}_{\alpha\chi 61}(t)=\left(A_{\alpha\chi 5}+A_{\alpha\chi 6}t\right)/(2\tau)-(\pi/\tau)^6\left(a_{\alpha\chi 1}\cos(\pi t/\tau)+b_{\alpha\chi 1}\sin(\pi t/\tau)\right); \quad (28)$$

$$\hat{s}_{\alpha\chi 61}(-\tau)=-A_{\alpha\chi 0}/2+\tau A_{\alpha\chi 1}/4-\tau^3 A_{\alpha\chi 3}/48+\tau^5 A_{\alpha\chi 5}/480+a_{\alpha\chi 0}-a_{\alpha\chi 1}; \quad (29)$$

$$\dot{\hat{s}}_{\alpha\chi 61}(-\tau)=A_{\alpha\chi 0}/(2\tau)-A_{\alpha\chi 1}/2+\tau A_{\alpha\chi 2}/6-\tau^3 A_{\alpha\chi 4}/90+\tau^5 A_{\alpha\chi 6}/945-\pi b_{\alpha\chi 1}/\tau; \quad (30)$$

$$\ddot{\hat{s}}_{\alpha\chi 61}(-\tau)=A_{\alpha\chi 1}/(2\tau)-A_{\alpha\chi 2}/2+\tau A_{\alpha\chi 3}/6-\tau^3 A_{\alpha\chi 5}/90+(\pi/\tau)^2 a_{\alpha\chi 1}; \quad (31)$$

$$\dddot{\hat{s}}_{\alpha\chi 61}(-\tau)=A_{\alpha\chi 2}/(2\tau)-A_{\alpha\chi 3}/2+\tau A_{\alpha\chi 4}/6-\tau^3 A_{\alpha\chi 6}/90+(\pi/\tau)^3 b_{\alpha\chi 1}; \quad (32)$$

$$\hat{s}^{(4)}_{\alpha\chi 61}(-\tau)=A_{\alpha\chi 3}/(2\tau)-A_{\alpha\chi 4}/2+\tau A_{\alpha\chi 5}/6-(\pi/\tau)^4 a_{\alpha\chi 1}; \quad (33)$$

$$\hat{s}^{(5)}_{\alpha\chi 61}(-\tau)=\frac{A_{\alpha\chi 4}}{2\tau}-\frac{A_{\alpha\chi 5}}{2}+\frac{\tau A_{\alpha\chi 6}}{6}-\left(\frac{\pi}{\tau}\right)^5 b_{\alpha\chi 1};\ \hat{s}^{(6)}_{\alpha\chi 61}(-\tau)=\frac{A_{\alpha\chi 5}}{2\tau}-\frac{A_{\alpha\chi 6}}{2}+\left(\frac{\pi}{\tau}\right)^6 a_{\alpha\chi m}; \quad (34)$$

Система (11)–(15), где $s_{\alpha\chi}{}^{(r)}(-\tau)$, $\hat{s}_{\alpha\chi 61}{}^{(r)}(t)$, $\hat{s}_{\alpha\chi 61}{}^{(r)}(-\tau)$ определены (2), (3), (5), (17)–(34), есть

$$\hat{s}_{\alpha 161}{}^{(r)}(-\tau)=s_{\alpha 1}{}^{(r)}(-\tau),\ \hat{s}_{1061}{}^{(r)}(-\tau)=s_{10}{}^{(r)}(-\tau),\ r=\overline{0,6}; \quad (35)$$

$$\int_{-\tau}^{\tau}\left(\theta_\alpha\ddot{\hat{s}}_{\alpha 161}(t)-\dddot{\hat{s}}_{\alpha 161}(t)\right)\left(\hat{s}_{1161}(t)+\hat{s}_{2161}(t)\right)^2 dt=2\tau C_\alpha; \quad (36)$$

$$\int_{-\tau}^{\tau}\left(\theta_\alpha\ddot{\hat{s}}_{\alpha 161}(t)-\dddot{\hat{s}}_{\alpha 161}(t)\right)\left(\hat{s}_{1161}(t)+\hat{s}_{2161}(t)\right)^2\cos(\pi t/\tau)dt=0; \quad (37)$$

$$\int_{-\tau}^{\tau}\left(\theta_\alpha\ddot{\hat{s}}_{\alpha 161}(t)-\dddot{\hat{s}}_{\alpha 161}(t)\right)\left(\hat{s}_{1161}(t)+\hat{s}_{2161}(t)\right)^2\sin(\pi t/\tau)dt=0; \quad (38)$$

$$\int_{-\tau}^{\tau}\ddot{\hat{s}}_{1061}(t)\cdot\hat{s}_{1061}{}^2(t)dt=2\tau C_0;\ \int_{-\tau}^{\tau}\ddot{\hat{s}}_{1061}(t)\cdot\hat{s}_{1061}{}^2(t)\cos\frac{\pi t}{\tau}dt=0;\ \int_{-\tau}^{\tau}\ddot{\hat{s}}_{1061}(t)\cdot\hat{s}_{1061}{}^2(t)\sin\frac{\pi t}{\tau}dt=0. \quad (39)$$

Интегралы в (36)–(39) – берущиеся. Для их символьного вычисления удобно использовать системы компьютерной алгебры, после чего (35)–(39) задают разрешимую систему нелинейных алгебраических уравнений. Для ее численного решения удобно использовать системы компьютерной математики для численных расчетов.

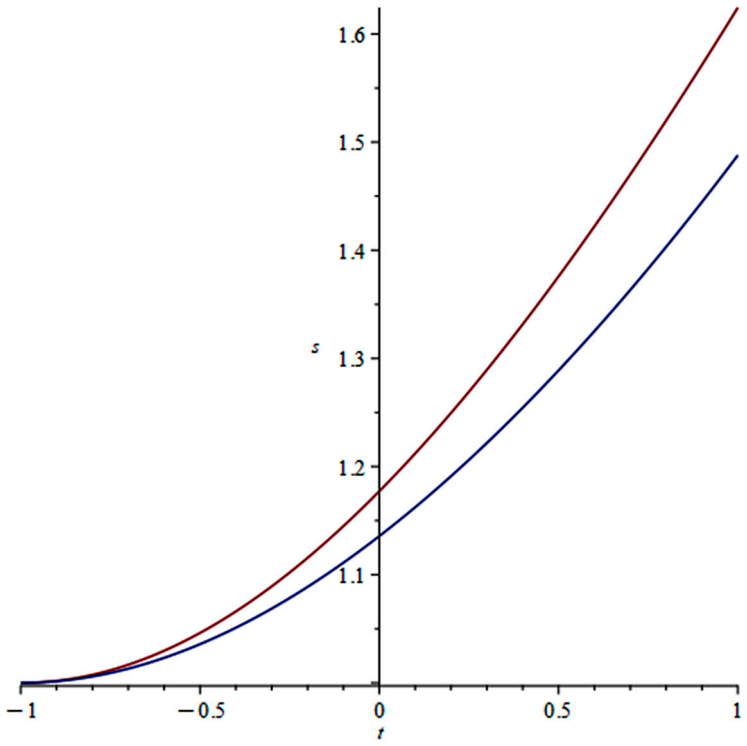
Результаты исследования и их обсуждение

Для верификации предложенного способа использования метода быстрых разложений в контексте классической математической физики в парадигме нелокальности на примере задачи (1)–(3), (5), (6) проведен с применением Maple 2025 вычислительный эксперимент с данными в таблице.

Исходные и выходные данные расчетов

Исходные данные									
η_α		τ		R_0		θ_α		ξ_α	
1		1		2		1		0,8	
Выходные данные									
A_{100}	A_{101}	A_{102}	A_{103}	A_{104}	A_{105}	A_{106}	a_{100}	a_{101}	b_{101}
$6{,}243\times10^{-1}$	$5{,}369\times10^{-1}$	$-2{,}320\times10^{-1}$	$-8{,}162\times10^{-2}$	$4{,}412\times10^{-1}$	$3{,}687\times10^{-1}$	$-3{,}465\times10^{-1}$	$1{,}176\times10^{0}$	$8{,}348\times10^{-4}$	$-7{,}036\times10^{-5}$
$A_{\alpha10}$	$A_{\alpha11}$	$A_{\alpha12}$	$A_{\alpha13}$	$A_{\alpha14}$	$A_{\alpha15}$	$A_{\alpha16}$	$a_{\alpha10}$	$a_{\alpha11}$	$b_{\alpha11}$
$4{,}878\times10^{-1}$	$4{,}407\times10^{-1}$	$-1{,}304\times10^{-1}$	$7{,}457\times10^{-2}$	$1{,}672\times10^{-1}$	$-1{,}614\times10^{-1}$	$-3{,}136\times10^{-1}$	$1{,}136\times10^{0}$	$1{,}833\times10^{-5}$	$1{,}241\times10^{-4}$

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.



Графики быстрых разложений (зависимости расстояния s от времени t).
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Искомые быстрые разложения $\hat{s}_{1061}(t)$, $\hat{s}_{\alpha 161}(t)$, аппроксимирующие решения $s_{10}(t)$, $s_{\alpha 1}(t)$, определяются (22), где параметры A_{10q}, a_{100}, a_{101}, b_{101}, $A_{\alpha 1q}$, $a_{\alpha 10}$, $a_{\alpha 11}$, $b_{\alpha 11}$, $q = \overline{0,6}$, вычисленные решением (35)–(39), заданы в таблице. Графики $\hat{s}_{1061}(t)$ и $\hat{s}_{\alpha 161}(t)$ приведены на рисунке (верхняя и нижняя кривые соответственно), причем отклонение нижней кривой от верхней наглядно показывает тормозящее действие силы радиационного трения.

Заключение

В настоящей работе проведена с применением современных компьютерных технологий (посредством применения систем компьютерной алгебры и систем компьютерной математики для численных расчетов на примере Maple 2025) адаптация эффективного вычислительного метода быстрых разложений к парадигме нелокальности в контексте классической математической физики на примере задачи Коши для системы двух обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений третьего порядка, описывающей прямолинейное взаимное удаление в вакууме двух одноименных точечных электрических зарядов с возможностью учета радиационного трения. Тем самым цель работы достигнута.

Научная новизна: способ использования эффективного вычислительного метода быстрых разложений в контексте классической математической физики с применением современных компьютерных технологий (посредством применения систем компьютерной алгебры и систем компьютерной математики для численных расчетов), отличающийся от известных аналогов адаптацией этого метода к парадигме нелокальности на примере задачи Коши для системы двух обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений третьего порядка, описывающей прямолинейное взаимное удаление в вакууме двух одноименных точечных электрических зарядов с возможностью учета радиационного трения. Формулы (7), (8), (22) непосредственно регламентируются методом быстрых разложений для данной задачи, а (35)–(39) – разработанным способом использования данного метода.

Практическая значимость: полученные результаты могут быть использованы при математическом моделировании физических процессов в контексте классической математической физики в парадигме нелокальности с применением современных компьютерных технологий (посредством применения систем компьютерной алгебры и систем компьютерной математики для численных расчетов) для использования эффективного вычислительного метода быстрых разложений за счет подходящей адаптации этого метода к парадигме нелокальности.

Список литературы

1. Тугов В. В. Моделирование и решение нелинейных задач нестационарной теплопроводности в многослойных конструкциях // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 5–1. С. 76–81. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40008 (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.17513/snt.40008.

2. Бадекин М. Ю., Ивахненко Н. Н. Применение метода энергетического баланса к нелинейным уравнениям вибрации // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 8. С. 28–34. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40108 (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.17513/snt.40108.

3. Катаева Л. Ю. Анализ численных методов решения обобщенного уравнения Бюргерса для нелинейных волн // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 9. С. 78–86. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40489 (дата обращения: 09.04.2026). DOI: 10.17513/snt.40489.

4. Chernyshov A. D. Method of Fast Expansions for Solving Nonlinear Differential Equations // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2014. Vol. 54. Is. 1. P. 11–21. URL: https://link.springer.com/article/10.1134/S0965542514010060 (дата обращения: 07.04.2026). DOI: 10.1134/S0965542514010060.

5. Чернышов А. Д., Горяйнов В. В., Лешонков О. В., Соболева Е. А., Никифорова О. Ю. Сравнение скорости сходимости быстрых разложений с разложениями в классический ряд Фурье // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2019. № 1. С. 27–34. URL: http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/analiz/2019/01/2019-01-04.pdf (дата обращения: 06.04.2026). EDN: YXATJG.

6. Лешонков О. В. Исследование некоторых математических моделей методом быстрых разложений: дис. … канд. физ.-мат. наук. Воронеж, 2018. 213 с. [Электронный ресурс]. URL: http://www.science.vsu.ru/dissertations/6530/Диссертация_Лешонков_О.В.pdf (дата обращения: 07.04.2026).

7. Чернышов А. Д., Кузнецов С. Ф., Половинкина М. В., Соболева Е. А., Никифорова О. Ю. Об особенностях применения метода быстрых разложений при решении уравнений Навье – Стокса // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 1. С. 81–89. URL: https://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/article/view/1211 (дата обращения: 13.04.2026). DOI: 10.20914/2310-1202-2017-1-81-89.

8. Chernyshov A. D., Goryainov V. V., Popov M. I., Nikiforova Yu. O. Using of Fast Expansions in the Construction of Two-Dimensional Exact Solutions of the Poisson Equation // Journal of Physics: Conference Series. 2020. P. 012146. [Электронный ресурс]. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1479/1/012146 (дата обращения: 14.04.2026). DOI: 10.1088/1742-6596/1479/1/012146.

9. Goryainov V. V., Popov M. I., Chernyshov A. D. Solving the Stress Problem in a Sharp Wedge-Whaped Cutting Tool Using the Quick Decomposition Method and the Problem of Matching Boundary Conditions // Mechanics of Solids. 2019. Vol. 54. Is. 7. P. 1083–1097. URL: https://link.springer.com/article/10.3103/S0025654419070094 (дата обращения: 14.04.2026). DOI: 10.3103/S0025654419070094.

10. Чернышов А. Д., Горяйнов В. В., Кузнецов С. Ф., Никифорова О. Ю. Применение быстрых разложений для построения точных решений задачи о прогибе прямоугольной мембраны под действием переменной нагрузки // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2021. № 70. С. 127–142. URL: https://journals.tsu.ru/mathematics/&journal_page=archive&id=2092&article_

id=47050 (дата обращения: 07.04.2026). DOI: 10.17223/19988621/70/11.

11. Чернышов А. Д., Сайко Д. С., Горяйнов В. В., Кузнецов С. Ф., Никифорова О. Ю. Точные решения задачи о диффузии в прямоугольной емкости с внутренним источником, полученные методом быстрых разложений // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2020. Т. 13. № 3. С. 42–55. URL: https://physmath.spbstu.ru/en/article/2020.49.04 (дата обращения: 13.04.2026). DOI: 10.18721/JPM.13304.

12. Goryainov V. V., Kuznetsov S. F., Nikiforova O. Yu., Voronkova I. S. Some Exact Solutions of the Heat Conduction Equation in Parallelepiped Obtained by the Fast Expansions Method // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1902. P. 012006. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1902/1/012006 (дата обращения: 07.04.2026). DOI: 10.1088/1742-6596/1902/1/012006.

13. Chernyshov A. D. Solution of the Stefan Two-Phase Problem with an Internal Source and of Heat Conduction Problems by the Method of Rapid Expansions // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2021. Vol. 94. Is. 1. P. 95–112. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s10891-021-02277-x (дата обращения: 14.04.2026). DOI: 10.1007/s10891-021-02277-x.

14. Popov M. I., Skrypnikov A. V., Chernyshov A. D., Sablin S. Y., Nikitin V. V., Kozlov V. G., Chernyshov A. V., Druzhinin R. A. Application of the Fast Expansion Method in Space–Related Problems // Mathematics and Statistics. 2022. Vol. 10. Is. 2. P. 320–328. URL: https://www.hrpub.org/journals/article_info.php?aid=11840 (дата обращения: 14.04.2026). DOI: 10.13189/ms.2022.100206.

15. Chernyshov A. D., Popov M. I., Goryainov V. V., Nikiforova O. Yu. Application of the Method of Fast Expansions to Construction of a Trajectory of Movement of a Body with Variable Mass from Its Initial Position in an Achieved Final Position in a Gravitational Field // Mechanics of Solids. 2023. Vol. 58. Is. 8. P. 2908–2919. URL: https://link.springer.com/article/10.3103/S0025654423080083 (дата обращения: 14.04.2026). DOI: 10.3103/s0025654423080083.

16. Дубровин А. С. От дальнодействия Фоккера-Фейнмана к гиперконтинуальному дальнодействию // LV Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники: материалы конференции (г. Москва, 13–17 мая 2019 г.). М.: Издательство Российского университета дружбы народов (РУДН), 2019. С. 37–40. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=46242797 (дата обращения: 10.04.2026). EDN: EAUZEC.

17. Дубровин А. С. Гармонический системный анализ и обработка информации в модели дальнодействия взаимно отталкивающихся точечных зарядов // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2023. № 2. С. 42–49. URL: https://vi.fsin.gov.ru/upload/territory/Vi/nauchnaja_dejatelnost/Вестник/v_fsin_2023_2.pdf (дата обращения: 06.04.2026). EDN: OCEDKE.

18. Дубровин А. С., Сумин В. И., Кравченко А. С. Системное моделирование отталкивания с радиационным трением точечных зарядов на основе классического гармонического анализа // Экономика. Информатика. 2025. Т. 52. № 3. С. 623–641. URL: https://econom-inform-journal.ru/index.php/journal/article/view/463?ysclid=mnn7ldqnrw447298612 (дата обращения: 06.04.2026). DOI: 10.52575/2687-0932-2025-52-3-623-641.

19. Дубровин А. С., Сумин В. И. Классический гармонический системный анализ и обработка информации в модели отталкивания с радиационным трением точечных зарядов // Проблемы и перспективы моделирования систем и процессов: материалы Всероссийской научно-практической конференции (г. Воронеж, 14 октября 2025 г.). Воронеж: Издательство Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г. Ф. Морозова, 2025. С. 50–58. URL: https://bibl.vgltu.ru/ru/nauka/conference_article/18946/view (дата обращения: 08.04.2026). DOI: 10.58168/PPSPM2025_50-58.

20. Chernyshov A. D., Saiko D. S., Kovaleva E. N. Universal Fast Expansion for Solving Nonlinear Problems // Journal of Physics: Conference Series. 2020. P. 012147. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1479/1/012147 (дата обращения: 07.04.2026). DOI: 10.1088/1742-6596/1479/1/012147.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 621.762.01
DOI 10.17513/snt.40821

CC BY 4.0

ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КИНЕТИКИ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В СПЕЧЕННОМ ДИФФУЗИОННО-ЛЕГИРОВАННОМ ПОРОШКОВОМ МАТЕРИАЛЕ Fe–Ni–Cu–Mo

Егоров М. С. ORCID ID 0000-0002-4289-1601,
Егорова Р. В. ORCID ID 0000-0002-1082-3970,
Жеволуков В. Е. ORCID ID 0009-0005-0280-5966,
Коробка И. О. ORCID 0009-0008-6007-6820, Егоров А. М.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Российская Федерация, e-mail: aquavdonsk@mail.ru

Цель исследования – установление закономерностей роста усталостной трещины в спеченном порошковом материале системы Fe–Ni–Cu–Mo марки ПЛ-Н2Д2М при циклическом изгибе в зависимости от пористости и времени спекания. Образцы изготавливали методом холодного прессования из порошка ПЛ-Н2Д2М с пористостью 10, 15 и 20 %, затем спекали при 1050 °С в течение 30, 60 и 90 мин. Испытания на циклический изгиб проводили с частотой 7 Гц и амплитудой 3,5 мм. Кинетику роста трещины фиксировали методом электропотенциалов с непрерывной записью сигнала в реальном времени. Все образцы демонстрируют S-образную кинетику роста трещины с тремя этапами: зарождение повреждений, стабильный рост и ускоренное разрушение. Снижение пористости с 20 до 10 % увеличивает число циклов до разрушения и снижает скорость роста трещины. Увеличение времени спекания наиболее эффективно для низкопористых образцов. Микроструктурный анализ выявил наличие тройного твердого раствора Fe–Cu–Ni, создающего локальные концентраторы напряжений. Установлен трехстадийный характер усталостного разрушения. В условиях проведенных испытаний снижение пористости сопровождалось увеличением усталостной долговечности. Подтверждена применимость метода электропотенциалов для непрерывного контроля длины трещины в реальном времени без остановки испытаний.

Ключевые слова: порошковая металлургия, диффузионно-легированный порошок, усталостная трещина, циклический изгиб, метод электропотенциалов, пористость, время спекания, кинетика разрушения

HIGH-TECH METHODS OF CONTROLLED FRACTURE GROWTH KINETICS IN SINTERED DIFFUSION-ALLOYED POWDER MATERIAL Fe–Ni–Cu–Mo

Egorov M. S. ORCID ID 0000-0002-4289-1601,
Egorova R. V. ORCID ID 0000-0002-1082-3970,
Zhevolukov V. E. ORCID ID 0009-0005-0280-5966,
Korobka I. A. ORCID 0009-0008-6007-6820, Egorov A. M.

Federal State Budgetary Educational Institution "Don State Technical University", Rostov-on-Don, Russian Federation, e-mail: aquavdonsk@mail.ru

The aim of the study is to establish the patterns of fatigue crack growth in the sintered powder material of the Fe–Ni–Cu–Mo system of the PL-N2D2M brand under cyclic bending depending on the porosity and sintering time. Samples were made by cold pressing from the PL-N2D2M powder with porosity of 10, 15 and 20 %, then sintered at 1050°C for 30, 60 and 90 minutes. Cyclic bending tests were performed at a frequency of 7 Hz and an amplitude of 3.5 mm. The crack growth kinetics were recorded using the electro-potential method with continuous real-time signal recording. All samples exhibit an S-shaped crack growth kinetics with three stages: damage initiation, stable growth, and accelerated failure. Reducing the porosity from 20 % to 10 % increases the number of cycles before failure and reduces the crack growth rate. Increasing the sintering time is most effective for low-porosity samples. Microstructure analysis revealed the presence of a triple solid solution Fe–Cu–Ni, creating local stress concentrators. The three-stage nature of fatigue fracture is established. Porosity is a determining factor of fatigue durability. The applicability of the method of electro-potentials for continuous monitoring of the crack length in real time without stopping the tests is confirmed.

Keywords: powder metallurgy, diffusion-alloyed powder, fatigue crack, cyclic bending, electro-potential method, porosity, sintering time, fracture kinetics

Введение

Конструкционные материалы и изделия из них являются самым распространенным видом продукции порошковой металлургии. Они широко применяются в машино- и приборостроении, новых отраслях техники. К этому классу материалов относятся материалы как на основе железа, так и на основе цветных металлов [1]. Это могут быть как материалы общего назначения, заменяющие обычные углеродистые и легированные стали, чугуны, сплавы цветных металлов, так и материалы с особыми свойствами – высокой прочностью, пластичностью, износостойкостью, используемые при создании новых типов машин, приборов, механизмов, а также для промышленного улучшения технических характеристик существующих машин и приборов [2].

Одной из важнейших характеристик порошкового сырья для классических и аддитивных технологий металлургии является морфология частиц. Практика показывает, что частицы правильной сферической формы обеспечивают наилучшие показатели сыпучести и стабильность дозирования материала при подаче в зону построения, а это, в свою очередь, напрямую коррелирует с качеством получаемой структуры готового изделия [3]. Наиболее распространенными промышленными технологиями изготовления таких порошков служат методы распыления жидкого металла – газовое, вакуумное и центробежное [4]. Несмотря на широкое распространение, данные методы имеют серьезные ограничения: они плохо приспособлены для получения порошков с нестандартным химическим составом, а также экономически нецелесообразны при выпуске малых объемов материала [5].

Конструкционные порошковые материалы используются для получения многочисленной номенклатуры изделий: это шестерни, храповики, собачки, эксцентрики, рычаги, шайбы, заглушки, колпачки, крышки, фланцы, корпуса подшипников, детали насосов, пишущих и счетных машин и др.

Автомобильная промышленность [6] использует значительное количество спеченных деталей, в основном в качестве компонентов трансмиссий и двигателей. Шестерни – это детали, которые больше всего выигрывают с точки зрения экономии средств благодаря технологии порошковой металлургии, позволяющей получать изделия практически чистовой формы. Однако пористость наряду с неоднородной микроструктурой может негативно влиять на механическое поведение, особенно на усталостную прочность [7].

Реальные кристаллические тела при пластической деформации склонны к образованию макроскопических трещин. Данное явление объясняется следующим образом: процесс пластического течения в кристаллах сопровождается дислокационным скольжением, причем дислокации концентрируются в определенных плоскостях, что позволяет отдельным частям кристалла смещаться друг относительно друга не полностью, а по схеме незавершенного сдвига.

Для спеченных материалов порошкового происхождения, которые отличаются структурной неоднородностью, характер разрушения не является единообразным и может существенно различаться даже для близких по составу материалов [8]. Ключевыми переменными здесь выступают: особенности внутреннего строения, химический состав, состояние границ и поверхности, режим нагружения, внешние условия эксплуатации и др. Варьирование этих параметров способно перевести механизм разрушения от одного крайнего типа (внешнее хрупкое) к противоположному (замедленное пластически-вязкое) [9]. В связи с этим, чтобы уметь заранее оценивать риск разрушения твердотельного спеченного изделия и сознательно регулировать его сопротивление, исследователь должен располагать систематизированными сведениями о микромеханизмах разрушения, реализующихся в зависимости от конкретной структуры материала.

Цель исследования – установление закономерностей кинетики роста усталостной трещины в спеченном диффузионно-легированном порошковом материале системы Fe–Ni–Cu–Mo (марки ПЛ-Н2Д2М) при циклическом изгибе.

Материалы и методы исследования

В качестве исходного сырья был взят отечественный порошок марки ПЛ-Н2Д2М (ТУ 14-5402-2002) производства ПАО Северсталь (г. Череповец). Порошок ПЛ-Н2Д2М – это диффузионно легированный железный порошок, полученный методом отжига смеси порошков, содержащие легирующие добавки. Химический состав используемого порошка представлен в таблице [5, 6].

С целью определения однородности порошковой смеси, распределения легирующих элементов, а также с целью определения структурных составляющих, характера разрушения в изломах порошковых материалов применялся электронный микроскоп марки S-3400N фирмы HitachiHigh – Technologies Corporation (Япония), оснащенным рентгеновским энерго-дисперсионным спектрометром NORAN.

Химический состав порошка марки ПЛ-Н2Д2М

Марка порошка	Содержание элементов, масс. %								
	C	O	Mo	Ni	Cu	Mn	Si	S	P
ПЛ–Н2Д2М	0,02	0,25	0,3–0,7	1,5–2,5	1,5–2	0,15	0,05	0,02	0,02

Примечание: составлена авторами на основе источника [5].

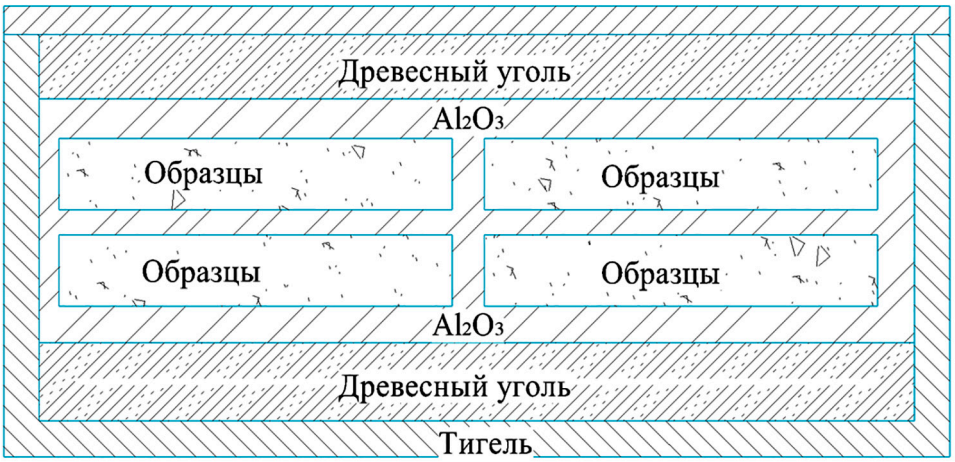


Рис. 1. Схема размещения образцов в тигле при спекании
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Статическое холодное прессование призматических образцов проводилось на гидравлическом прессе модели TS0500-6 (Китай) с максимальным усилием в 50 т, в лабораторных пресс-формах [9]. Образцы изготавливались с пористостью 20, 15, 10 % размерами 10x10x55 мм. Гомогенизирующее спекание производили в лаборатории термической обработки кафедры «Материаловедение и технология металлов» в муфельной электропечи модели SNOL 6,7/1300 при температуре 1050 °С. Условия нагрева исключали контакт заготовок с окислительной средой: вокруг них формировалась газовая прослойка, насыщенная CO и CO_2, которые появляются при реакции Будуара (взаимодействие древесного угля с атмосферным кислородом). Рисунок 1 демонстрирует способ укладки изделий в тигли. Трехслойная угольная обсыпка играет защитную роль – она отделяет углерод от поверхности частиц легированного железа. Это не дает развиться цементитной фазе в локальных объемах материала. Следовательно, исключается процесс контактного плавления (образование жидкости) и полное расплавление образцов. Общая длительность спекания принимала три значения: 30, 60 и 90 мин [10]. На каждом режиме испытывали не менее трех образцов. Общее количество изготовленных образцов – 27 (3 уровня пористости × 3 времени спекания × 3 образца на режим). Перед спеканием во всех образцах выполняли V-образный надрез. Надрез располагался посередине одной из широких граней (10×55 мм) перпендикулярно продольной оси образца. Глубина надреза составляла 1,0 мм, угол при вершине – 60°, радиус скругления в вершине – не более 0,1 мм. Надрез служил концентратором напряжений для инициирования усталостной трещины.

Испытания на циклический изгиб проводили с использованием испытательной машины лабораторной установки (рис. 2) в автоматическом режиме с помощью персонального компьютера [11].

В состав установки входили: стенд для наведения усталостной трещины, а также оборудование для исследования и фиксации кинетики ее развития. Процесс возникновения и последующего развития трещины фиксировался методом электропотенциалов [11, 12]. Блок-схема для фиксации кинетики роста трещины в реальном времени приведена на рис. 3. Для этого на образец (4), имеющий V-надрез, через балластное сопротивление 3 от понижающего трансформатора РНО-250-5 (2) подавался переменный электрический ток промышленной частоты 50 Гц, величину которого можно было регулировать.



Рис. 2. Установка для усталостных испытаний образцов на циклический изгиб
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

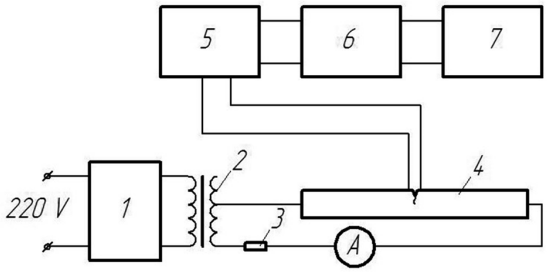


Рис. 3. Блок-схема измерения разности потенциалов
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

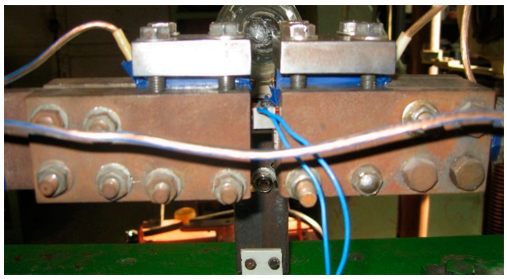


Рис. 4. Образец в зажимах стенда с подсоединенными проводами у надреза
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Электропитание данного блока лабораторной установки осуществлялось через стабилизатор напряжения С-09 (1). Такое техническое решение было принято для исключения возможного влияния флуктуаций напряжения в сети на достоверность регистрируемых данных. В процессе инициирования и распространения трещины в зоне исходного надреза фиксировалась разность электрических потенциалов. Ее значения измерялись с помощью милливольтметра (5), работающего на переменном токе и имеющего коэффициент усиления, равный 7. С выхода милливольтметра сигнал подавался на вход АЦП Е-154 (6), изготовленного фирмой L-Card. Задача АЦП заключалась в оцифровке аналогового сигнала и его последующей передаче на компьютер (7). На компьютере было установлено программное обеспечение LGraph2. Это ПО давало возможность в непрерывном режиме записывать изменение падения напряжения на образце, причем запись велась синхронно с ростом усталостной трещины и в масштабе времени, близком к реальному [11, 12].

Частота колебаний вибростенда была постоянной и составляла 7 Гц. Амплитуда колебаний по всей видимости должна была быть ниже, чем у монолитных образцов аналогичного химического состава. Поэтому она была задана в 1,5 ниже, то есть составила 3,5 мм. С другой стороны, электрическое сопротивление образцов порошковых сталей было больше, чем монолитных. Поэтому и падение напряжения у краев надреза должно было быть больше и, таким образом, напряжение и ток, подаваемые на образец, должны были быть меньше.

Фактическая нагрузка, создаваемая вибростендом, не измерялась непосредственно, а задавалась через амплитуду перемещения свободного конца образца. Напряжение в вершине надреза не приводится в статье, однако оно оставалось постоянным для всех испытуемых образцов, что позволяло корректно сравнивать их усталостную долговечность.

На рис. 5 представлен образец после испытаний на усталостный излом. Показания роста длины трещины снимали каждые 12–15 мин, что составляло примерно $5 \cdot 10^3$ циклов.

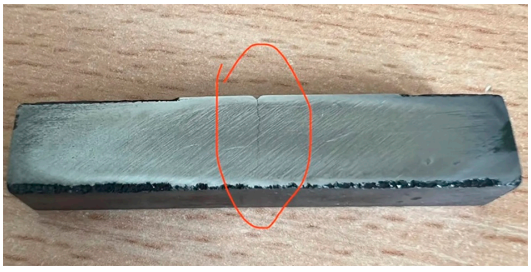


Рис. 5. Образец после испытаний на усталостный изгиб
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

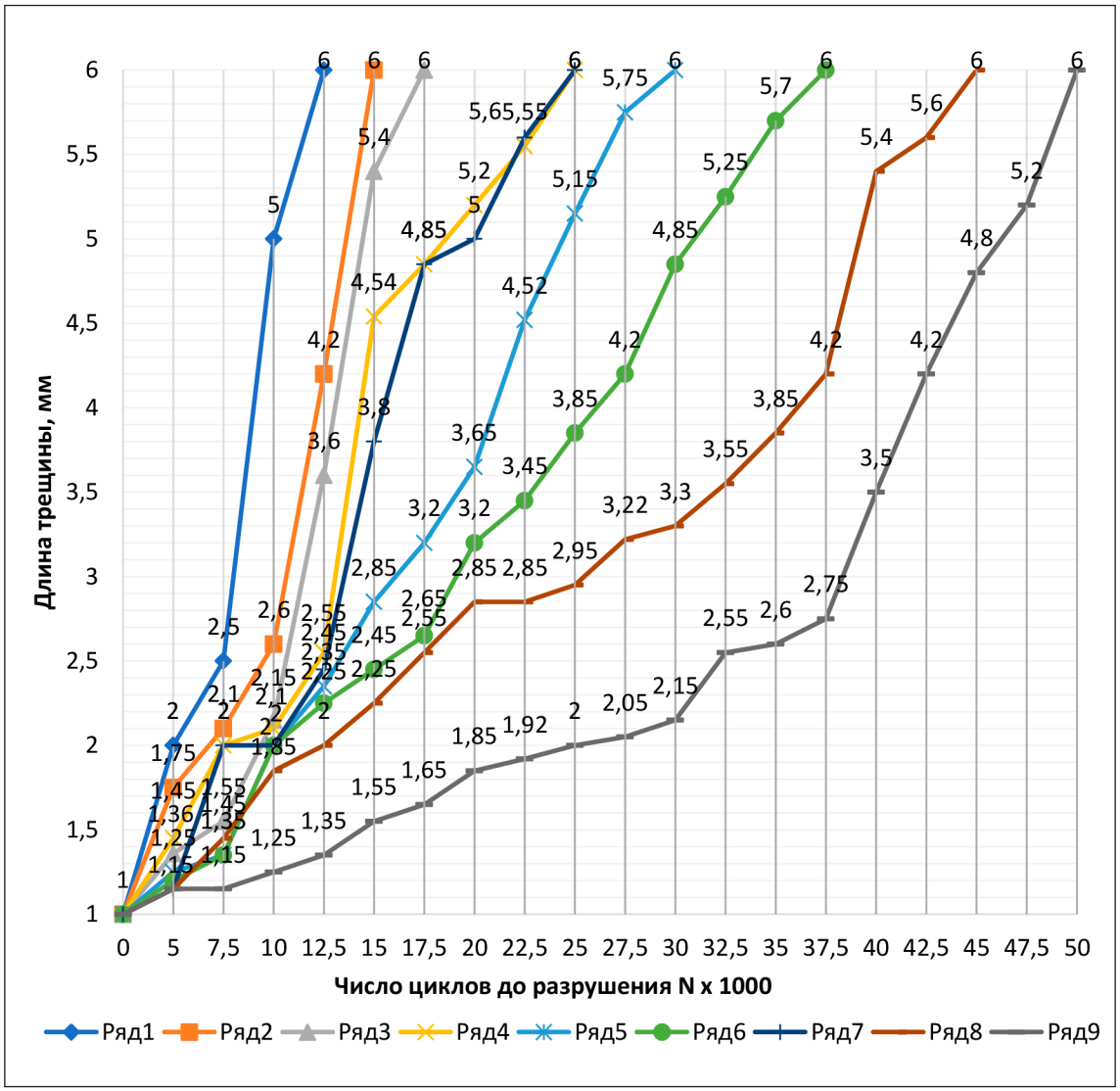


Рис. 6. Зависимость длины усталостной трещины от числа циклов усталостных испытаний для спеченного материала Н2Д2М. Температура спекания 1050°С. Обозначение рядов: ряд 1 – П = 20 %,τ τ = 30 мин; ряд 2 – П = 20 %, τ = 60 мин; ряд 3 – П = 20 %, τ = 90 мин; ряд 4 – П = 15 %, τ = 30 мин; ряд 5 – П = 15 %, τ = 60 мин; ряд 6 – П = 15 %, τ = 90 мин; ряд 7 – П = 10 %, τ = 30 мин; ряд 8 – П = 10 %, τ = 60 мин; ряд 9 – П = 10 %, τ = 90 мин. Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

На рис. 6 представлены экспериментальные зависимости длины усталостной трещины от количества циклов нагружения для спеченного порошкового материала марки ПЛ-Н2Д2М. Испытания проводились при фиксированной температуре спекания 1050 °С. Переменными параметрами являлись пористость образцов (10, 15 и 20 %) и время изотермической выдержки при спекании (30, 60 и 90 мин) [11]. Всего на графике приведены девять кривых, каждая из которых соответствует определенному сочетанию пористости и времени спекания.

Для каждого сочетания пористости и времени спекания обрабатывали данные не менее трех образцов. Определяли средние значения числа циклов до разрушения, средней скорости роста трещины на линейном участке и длительности начального этапа. Погрешность измерения числа циклов определялась стабильностью частоты нагружения (7 ± 0,1 Гц) и составляла около 1,5 %. Погрешность амплитуды колебаний не превышала ±0,1 мм. Построение кривых усталостного разрушения выполняли по средним значениям для каждого режима.

Все девять кривых имеют S-образную (сигмоидальную) форму, характерную для усталостного разрушения материалов, с тремя последовательными этапами: начальным (зарождение субмикроскопических повреждений), линейным (стабильный рост трещины) и завершающим (ускоренное разрушение) [12]. Кривые для образцов с пористостью 20 % (ряды 1–3) располагаются левее всех, что свидетельствует о наименьшем числе циклов до разрушения и наибольшей скорости роста трещины. Образцы с пористостью 10 % (ряды 7–9) демонстрируют максимальную усталостную долговечность, наиболее продолжительный начальный этап и наименьший наклон линейного участка. При сравнении кривых с одинаковой пористостью установлено, что увеличение времени спекания с 30 до 90 мин оказывает наиболее заметное положительное влияние на усталостную прочность для низкопористых образцов (10 %), тогда как при высокой пористости (20 %) влияние времени спекания выражено слабо [13].

На рис. 7 приведены микроструктуры спеченных образцов, отражающие кинетику усталостного разрушения на различных его этапах. Микроструктура характеризуется чередованием зон с разной травимостью [14]. В областях повышенной травимости выявляются дисперсные кристаллы пластинчатой и (частично) равноосной формы, тогда как в зонах пониженной травимости структурные составляющие оптически не дифференцируются.

Включения в виде продолговатых светлых участков являются тройным твердым раствором Fe–Cu–Ni, состав которого варьируется по сечению в зависимости от локального соотношения меди и никеля, с максимумом концентрации в центральной части глобулы. Наличие такой неоднородной структуры связано с режимом спекания: низкая температура и короткая выдержка препятствуют полному растворению легирующих компонентов, вследствие чего формируется отмеченная структурная неоднородность [15, 16].

Опираясь на данные работ [5, 9], можно с уверенностью говорить, что в пористых спеченных материалах, с учетом степени деформации и температуры нагрева, реализуются два механизма зарождения центров рекристаллизации, которые непосредственно влияют на сопротивление зарождению и распространению трещин: коалесценция субзерен и выгибание высокоугловой границы с образованием выступа [17]. Формирование данных центров определяет структурную неоднородность, от которой зависит склонность материала к микротрещинообразованию на ранних стадиях нагружения [11, 12].

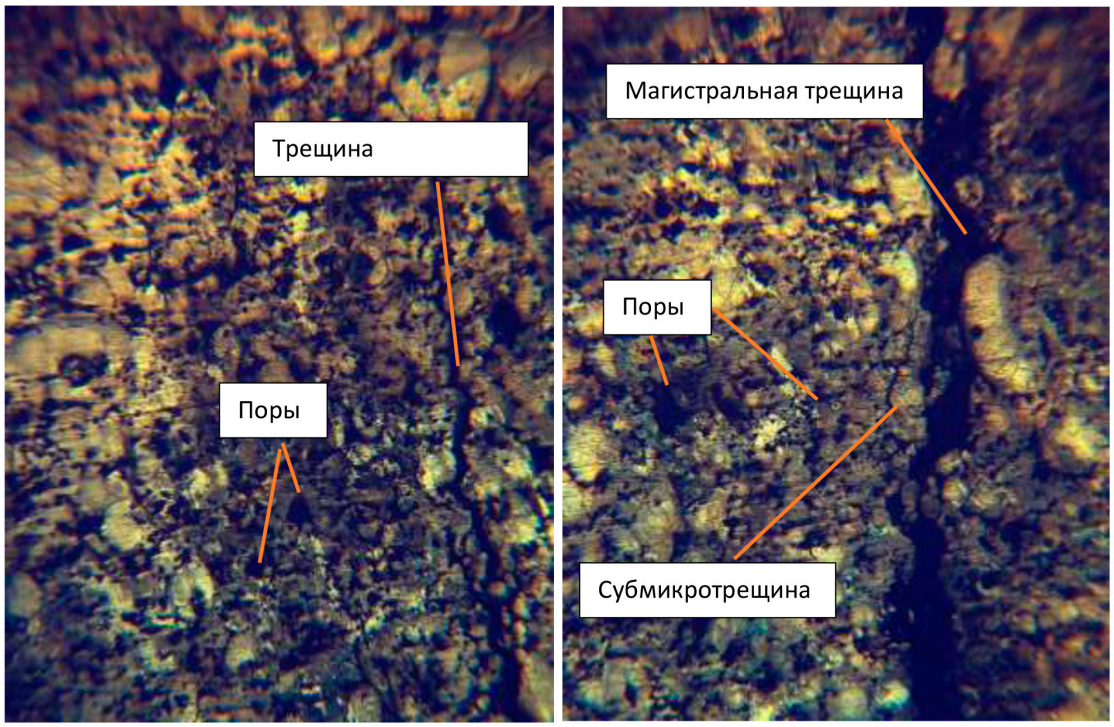


Рис. 7. Кинетика развития трещины в спеченных образцах Н2Д2М: Т = 1050°С; τ = 30 мин; П = 20 %
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Повышения свойств порошковых сталей можно также добиться путем усложнения их состава, а также применением термической и химико-термической обработки. Однако такие способы повышения свойств этих сталей имеют ряд особенностей, обусловленных, прежде всего, остаточной пористостью, а также химической и структурной неоднородностью [18].

Заключение

В результате выполнения экспериментальных исследований, направленных на установление закономерностей кинетики роста усталостной трещины в спеченном диффузионно-легированном порошковом материале системы Fe–Ni–Cu–Mo (марки ПЛ-Н2Д2М) при циклическом изгибе, сформулированы следующие основные выводы.

Установлено, что независимо от пористости (10–20 %) и времени спекания (30–90 мин) кинетика роста усталостной трещины подчиняется единой S-образной закономерности, включающей этапы зарождения повреждений, стабильного распространения и ускоренного роста вплоть до макроразрушения образца. Снижение остаточной пористости с 20% до 10% при прочих равных условиях приводит к увеличению числа циклов до разрушения, удлинению начального этапа зарождения трещины и уменьшению скорости ее роста на линейном участке. Пористость оказывает более существенное влияние на усталостную долговечность, чем время спекания. Увеличение длительности изотермической выдержки при спекании с 30 до 90 мин положительно сказывается на усталостной прочности, однако степень этого влияния существенно зависит от уровня пористости. Максимальный эффект наблюдается для низкопористых образцов (10 %), в то время как при высокой пористости (20 %) увеличение времени спекания не позволяет компенсировать негативное влияние обилия пор. Микроструктурный анализ выявил наличие тройного твердого раствора Fe–Cu–Ni, зон различной травимости и включений легирующих элементов, что создает локальные концентраторы напряжений. Формирование такой неоднородной структуры связано с выбранными режимами спекания (1050 °С, 30–90 мин), которые не обеспечивают полного растворения легирующих компонентов.

Полученные закономерности позволяют обоснованно выбирать технологические параметры (пористость, время спекания) для обеспечения требуемой усталостной долговечности деталей из порошковых материалов, работающих в условиях циклического нагружения – шестерен, рычагов, эксцентриков, корпусных деталей и элементов трансмиссий.

Список литературы

1. Erden M. A., Yaşar N., Korkmaz M. E., Ayvaci B., Nimel Sworna Ross K., Mozammel M. Investigation of microstructure, mechanical and machinability properties of Mo-added steel produced by powder metallurgy method // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 114. P. 2811–2827. DOI: 10.1007/s00170-021-07052-z.

2. Dorofeev V. Yu., Sviridova A. N., Samoilov V. A. Formation of Structure and Properties of Hot-Deformed Powder Steels Microalloyed with Sodium and Calcium in the Process of Thermal and Thermomechanical Treatment // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2021. Vol. 62 (6). P. 723–731. DOI: 10.3103/S1067821221060080.

3. Hellenbrand G., Mevissen D., Brimmers J., Brecher C. Stressability of PM-Gears under Consideration of Local Porosity // J. Jpn. Soc. Powder Metallurgy. 2025. 72 Supplement. S1195–S1202. DOI: 10.2497/jjspm.16C-T11-03.

4. Dorofeev V. Yu., Sviridova A. N., Svistun L. I. Influence of Sodium Microalloying on Rolling Contact Endurance and Mechanical Properties of Hot-Deformed Powder Steels // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2020. Vol. 61. Is. 3. P. 354–361. DOI: 10.3103/S1067821220030062.

5. Агеев Е. В., Кругляков О. В., Алтухов А. Ю., Андреева А. Е. Анализ износостойкости образцов, полученных селективным сплавлением электроэрозионных железохромоникелевых порошков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2026. № 1. С. 8–18. DOI: 10.21869/2223-1528-2026-16-1-8-18.

6. Егоров М. С., Егорова Р. В., Ковтун М. В. Влияние содержания углерода на формирование контактной межчастичной поверхности при горячей допрессовке // Безопасность техногенных и природных систем. 2023. Vol. 7 (2). P. 90–101. DOI: 10.23947/2541-9129-2023-7-2-90-101.

7. Tan Z., Liu Y., Huang X., Li S. Fatigue Behavior of Alloy Steels Sintered from Pre-Alloyed and Diffusion-Bonding Alloyed Powders // Metals. 2022. Vol. 12. Is. 4. P. 659. DOI: 10.3390/met12040659.

8. Schenk O., Kaletsch A., Brockmann C. Numerical and experimental Assessment of the Effect of Sintering Time and Temperature on Yielding Behaviour of sintered Steel // Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy. 2025. Vol. 72. P. S263–S270. DOI: 10.2497/jjspm.14F-T12-06.

9. Özdemirler D., Gündüz S., Erden M. Influence of NbC addition on the sintering behaviour of medium carbon PM steels // Metals. 2017. Vol. 7 (4). P. 121. DOI: 10.3390/met7040121.

10. Егорова Р. В., Егоров М. С., Пустовойт В. Н., Егоров А. М. Влияние микроструктурных факторов на механизм разрушения и пластичность спеченных хромоникелевых порошковых сталей при сдвиговых деформациях // Металлург. 2026. № 3. С. 99–103. DOI: 10.52351/00260827_2026_3_99.

11. Пустовойт В. Н., Гришин С. А., Дука В. В., Федосов В. В. Установка для исследования кинетики развития трещины при испытаниях на циклический изгиб // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 7. С. 59–64. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-7-59-64.

12. Пустовойт В. Н., Гришин С. А., Долгачев Ю. В., Дука В. В. Усталостное разрушение стали со структурой феррито-мартенситного композита // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2022. № 65 (2). С. 92–97. DOI: 10.17073/0368-0797-2022-2-92-97.

13. Duan Y., Liu W., Ma Y., Cai Q. Revealing Charpy impact behavior of 30CrMnSiNi2A steel prepared by powder hot isostatic pressing // Materials Characterization. 2025. Vol. 221. Art. 114727. DOI: 10.1016/j.matchar.2025.114727.

14. Hojati M., Gierl-Mayer C., Danninger H. Impact Fracture Behaviour of Powder Metallurgy Steels Sintered at Different Temperatures // Berg- und Hüttenmännische Monatshefte. 2024. Vol. 169. P. 132–139. DOI: 10.1007/s00501-024-01428-w.

15. Dai Z., Chen H., Ding R. Lu Q., Zhang Ci., Yang Z. van der Zwaag S. Fundamentals and application of solid-state phase transformations for advanced high strength steels containing metastable retained austenite // Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 143. P. 10590. DOI: 10.1016/j.mser.2020.100590.

16. Fontanari V., Molinari A., Marini M., Pahl W., Benedetti M. Tooth Root Bending Fatigue Strength of High-Density Sintered Small-Module Spur Gears: The Effect of Porosity and Microstructure // Metals. 2019. Vol. 9 (5). P. 599. DOI: 10.3390/met9050599.

17. Егоров М. С., Егорова Р. В., Пустовойт В. Н., Баглюк Г. А. Кинетика возникновения трещин в осаживаемых цилиндрических образцах // Вестник Донского государственного технического университета. 2017. № 3 (90). С. 103–109. DOI: 10.23947/1992-5980-2017-17-3-103-109.

18. Егоров М. С., Месхи Б. Ч., Егорова Р. В. Термическая обработка спеченных порошковых сталей. Аустенитизация в спеченных порошковых сталях // Металлург. 2024. № 9. С. 54–59. DOI: 10.52351/00260827_2024_9_54.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 004.62:681.518
DOI 10.17513/snt.40822

CC BY 4.0

РЕЖИМНО-АДАПТИВНОЕ АРХИВИРОВАНИЕ ТЕЛЕМЕТРИИ ВИБРОДИАГНОСТИКИ НА ОСНОВЕ МЕРТВОЙ ЗОНЫ С СОХРАНЕНИЕМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И УМЕНЬШЕНИЕМ ОБЪЕМА ДАННЫХ

Журавлева М. О., Киселев Д. С. ORCID ID 0009-0006-5213-2736, Зорина Н. В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Российская Федерация, e-mail: kiselevmirea@gmail.com

В работе рассматривается задача архивирования агрегированных диагностических показателей вибрации в системах вибродиагностики промышленного оборудования, включая среднеквадратичное значение виброскорости. Целью исследования является разработка и экспериментальное обоснование метода режимно-адаптивного архивирования телеметрии вибродиагностики по мертвой зоне, обеспечивающего сокращение объема хранимых данных при контролируемом уровне искажения переходных процессов. Стационарные режимы формируют основную долю записей и отражают преимущественно шум измерительного канала, тогда как переходные процессы содержат наиболее информативные участки для диагностики и прогноза. Предложен режимно-адаптивный метод архивирования по мертвой зоне, в котором порог записи автоматически снижается при обнаружении переходного процесса по локальной изменчивости сигнала и возвращается к исходному значению в стационарном режиме. На модельном сигнале среднеквадратичного значения виброскорости (SimInTech, 2000 отсчетов, среднеквадратическое отклонение шума 0,020) метод обеспечил степень сжатия 4,6 при максимальной ошибке на переходном участке 0,027, что в 2,6 раза лучше варианта с фиксированным порогом при степени сжатия того же порядка (6,3 против 4,6). Параметры метода выражаются через уровень шума измерительного канала, что упрощает настройку без идентификации модели объекта.

Ключевые слова: вибродиагностика, мертвая зона, СКЗ виброскорости, SCADA, информатика, адаптивное архивирование, система архивации, переходный процесс, SimInTech, предиктивное обслуживание

REGIME-ADAPTIVE DEAD-ZONE-BASED ARCHIVING OF VIBRATION-DIAGNOSTIC TELEMETRY WITH PRESERVATION OF TRANSIENT PROCESSES AND REDUCED DATA VOLUME

Zhuravleva M. O., Kiselev D. S. ORCID ID 0009-0006-5213-2736, Zorina N. V.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "MIREA – Russian Technological University", Moscow, Russian Federation, e-mail: kiselevmirea@gmail.com

This paper addresses the problem of archiving aggregated vibration diagnostic indicators in industrial equipment vibration diagnostics systems, including the root-mean-square vibration velocity. The purpose of the study is to develop and experimentally validate a regime-adaptive dead-zone-based method for archiving vibration-diagnostic telemetry, which reduces the volume of stored data while maintaining a controlled level of distortion in transient processes. Steady-state operating modes account for the majority of records and mainly reflect measurement-channel noise, whereas transient processes contain the most informative segments for diagnostics and prognostics. A regime-adaptive dead-zone-based archiving method is proposed, in which the recording threshold is automatically reduced when a transient process is detected from the local variability of the signal and is restored to its initial value under steady-state conditions. On a simulated root-mean-square vibration-velocity signal generated in SimInTech, consisting of 2000 samples with a noise standard deviation of 0.020, the method achieved a compression ratio of 4.6 with a maximum error of 0.027 in the transient interval. This is 2.6 times better than the fixed-threshold approach at a compression ratio of the same order, 6.3 versus 4.6. The method parameters are expressed through the measurement-channel noise level, which simplifies tuning without requiring identification of the plant model.

Keywords: vibration diagnostics, deadband, RMS vibration velocity, SCADA, informatics, data archiving system, adaptive archiving, transient process, SimInTech, predictive maintenance

Введение

Вибродиагностика является одним из основных методов оценки технического состояния промышленного оборудования с механическими приводами, насосов, компрессоров, турбин, электродвигателей и металлорежущих станков. Вибродатчики на подшипниковых опорах регистрируют механические колебания, по изменениям которых выявляются признаки развивающихся неисправностей: нарушение балансировки, несоосность, дефекты подшипников и ослабление крепежных соединений [1].

В системах технического обслуживания первичный вибросигнал проходит фильтрацию и вычисление диагностических при-

знаков. В системы диспетчерского управления и архивации поступают не исходные высокочастотные колебания, а агрегированные показатели. Прежде всего среднеквадратичные значения (далее – СКЗ) виброскорости. Они обновляются с частотой от единиц до сотен герц и образуют медленно изменяющиеся последовательности с длительными стационарными участками, сменяющимися переходными процессами. Переходные участки наиболее информативны, потому что по ним оцениваются скорость изменения вибрации и форма переходного процесса, что важно для диагностики и прогноза.

При обновлении показателя каждые 10 мс один канал формирует около 8,6 млн отсчетов в сутки; при тысячах каналов объем данных достигает терабайтов. При этом стационарные участки занимают до 90 % и более общей длительности и отражают преимущественно шум измерительного канала. Возникает противоречие. Запись всех отсчетов обеспечивает полноту, но создает высокую нагрузку на хранение. Широкий фиксированный порог сокращает объем архива, однако искажает переходные процессы и снижает ценность данных для прогностической аналитики.

Современные работы по предиктивному обслуживанию опираются на анализ временных рядов эксплуатационных параметров оборудования. M. A. B. Syed и соавт. систематизировали методы предварительной обработки, извлечения признаков, прогнозирования, обнаружения аномалий и оценки качества моделей [2]. Диагностический результат определяется не только выбранным алгоритмом, но и свойствами исходных данных, включая полноту, устойчивость к помехам и пригодность к последующему анализу.

При увеличении числа датчиков и частоты опроса существенным ограничением становится хранение телеметрии. G. Chiarot и C. Silvestri выполнили обзор методов сжатия временных рядов и предложили классификацию по принципам работы, типу ошибки и условиям применения [3].

J. D. A. Correa и соавт. рассмотрели сжатие данных датчиков интернета вещей с потерями и показали, что уменьшение объема передаваемых данных требует явного контроля ошибки восстановления [4]. Для систем вибродиагностики это критично, поскольку степень сжатия не является самостоятельным показателем качества архивирования при потере фрагментов, содержащих диагностическую информацию.

Адаптивные методы сжатия развиваются в направлении учета структуры сигнала при выборе параметров. A. El Sayed и соавт. предложили подход к адаптивному сжатию телеметрических временных рядов и обнаружению аномалий на основе автокодировщиков [5]. Q. Gong и соавт. рассматривают пространственно-временное адаптивное сжатие научных данных с сохранением значимых признаков [6]. В этих работах подчеркивается преимущество изменяемых параметров сжатия для сохранения информативных фрагментов.

Подобные решения, как правило, требуют обучаемых моделей, усложненной настройки и дополнительных вычислительных ресурсов, что ограничивает их использование в задачах промышленной архивации.

Для архивирования агрегированных диагностических показателей более применимы методы с интерпретируемыми параметрами. V. Agrawal, G. Kuldeep и D. Dey предложили почти без потерь методы сжатия временных рядов на основе статистических характеристик и отклонений [7]. По принципу действия данный класс подходов близок к архивированию по мертвой зоне, при котором малые отклонения подавляются, а запись выполняется при превышении порога относительно последнего сохраненного значения. Ограничение фиксированной мертвой зоны связано с единым значением порога для стационарных участков и переходных процессов. При малом пороге увеличивается число записей на стационаре за счет шумовой составляющей. При большом пороге ухудшается воспроизведение формы переходного процесса и растет ошибка восстановления на динамическом участке.

Отдельную группу составляют исследования, ориентированные на вибрационные данные. R. Pandey и соавт. исследовали сжатие вибрационных данных в распределенных беспроводных системах мониторинга состояния и показали применимость методов обработки сигнала для передачи данных от сенсорных узлов [8]. В российской литературе О. В. Панина и соавт. предложили нейросетевой подход к анализу вибрационных сигналов горного оборудования для предупреждения аварийных ситуаций [9]. Модель обучалась на данных реального оборудования и классифицировала состояния от нормального до предаварийного, что подтверждает использование виброданных в задачах прогноза технического состояния.

Прикладная направленность вибродиагностики демонстрируется на различных типах объектов. Для промышленного оборудования описана система на основе интернета вещей, в которой вибрация анализируется как во временной, так и в частотной области [10]. Есть и энергетические

объекты. P. Baron и соавт. рассматривают использование вибродиагностики в задачах предиктивного обслуживания турбогенераторов малой гидроэлектростанции [11]. Для станочного оборудования показан вибрационный мониторинг электрошпинделя с распознаванием технического состояния по диагностическим признакам вибросигнала [12]. В совокупности эти примеры подтверждают, что изменения формы, интенсивности и структуры вибрации могут выступать устойчивыми индикаторами смены режима и развития дефектов.

Сохранение переходных процессов важно не только для восстановления сигналов, но и для выявления смены режимов. F. Forbicini и соавт. в обзоре методов анализа временных рядов компрессорных машин выделяют обнаружение неисправностей, прогнозирование отказов и выявление точек изменения режима [13]. M. Zheng и соавт. предложили модель частично контролируемого обнаружения аномалий по данным диспетчерского контроля ветроустановок, объединяющую восстановительный и прогнозный компоненты [14]. Для подобных методов потеря переходных участков при прореживании архива приводит к снижению диагностической ценности данных.

Представленная научная литература включает исследования по анализу временных рядов в задачах предиктивного обслуживания, методы сжатия временных рядов и данных датчиков интернета вещей, адаптивные подходы к сжатию с сохранением значимых признаков, а также работы по обработке вибрационных данных промышленного оборудования. Вместе с тем вопрос режимно-адаптивного архивирования агрегированных вибродиагностических показателей, при котором на стационарных участках сохраняется высокая степень сжатия, а на переходных процессах обеспечивается повышенная плотность записи без применения обучаемых моделей и идентификации объекта, освещен ограниченно. Это определяет актуальность предлагаемого подхода.

Одним из распространенных способов уменьшения объема архива является архивирование по мертвой зоне (далее – d_z, от англ. *dead zone*): новая точка записывается только при превышении порога изменения относительно последней сохраненной. Рассматриваются агрегированные диагностические показатели, усредняемые на интервале 10–100 мс. Кратковременные импульсные воздействия проявляются в них как локальное повышение СКЗ и превышают d_z, поэтому фиксируются в архиве. Задачи регистрации отдельных ударных импульсов в исходном высокочастотном вибросигнале относятся к другому уровню данных и в настоящей работе не рассматриваются.

Цель исследования – разработка и экспериментальное обоснование метода режимно-адаптивного архивирования телеметрии вибродиагностики по мертвой зоне, которая обеспечивает существенное сокращение объема хранимых данных при контролируемом уровне искажения переходных процессов.

Исследование направлено на решение следующих задач:

1. Разработать алгоритм режимно-адаптивного архивирования по мертвой зоне с детектором режима и механизмом гистерезиса.

2. Реализовать имитационную модель сигнала среднеквадратичного значения виброскорости в среде SimInTech и организовать экспорт данных для последующего анализа.

3. Провести численный эксперимент и выполнить сравнение стратегий архивирования, включая запись всех отсчетов, архивирование с фиксированным порогом (малым и большим) и режимно-адаптивное архивирование, по показателям степени сжатия, средней абсолютной ошибки, среднеквадратичной ошибки и максимальной ошибки на переходном участке.

4. Сформулировать практические рекомендации по настройке параметров алгоритма для применения в системах вибродиагностики.

Научная значимость исследования состоит в обосновании режимно-зависимой настройки порога мертвой зоны, при которой параметры архивирования выбираются с учетом различий между стационарными и переходными режимами. Это позволяет повышать точность сохранения переходных процессов при сохранении высокой степени сжатия данных. Практическая значимость исследования заключается в возможности применения предложенного подхода при архивировании агрегированных диагностических показателей вибрации в системах промышленной эксплуатации, где требуется уменьшение объема передаваемой и хранимой телеметрии без потери информативности переходных процессов для диагностики и прогноза. В рамках исследования выдвигается гипотеза о том, что режимно-адаптивная мертвая зона с автоматическим переключением порога между d_{z_min} в переходном режиме и d_{z_max} в стационарном режиме на основе оценки локальной изменчивости сигнала с гистерезисом обеспечивает более выгодное соотношение между степенью сжатия и точностью сохранения переходного процесса. Предполагается, что при со-

поставимой степени сжатия максимальная ошибка восстановления на переходном участке уменьшается не менее чем вдвое по сравнению с архивированием при фиксированном широком пороге d_{z_max}.

Материалы и методы исследования

В качестве архивируемой величины рассматривается агрегированный диагностический показатель вибрации – СКЗ виброскорости. Выбор этого показателя согласуется с практикой оценки вибрационного состояния машин по измерениям на невращающихся частях, где используются параметры вибрации, включая виброскорость [15, 16].

В основе рассматриваемых подходов лежит архивирование по мертвой зоне. Новая точка телеметрии записывается только при превышении заданного порога изменения относительно последней сохраненной. Для каждого отсчета t_i вычисляется отклонение:

$$\Delta(t_i) = \left| y(t_i) - y_{\text{last}} \right|, \qquad (1)$$

где $y(t_i)$ – текущее измерение, y_{last} – значение последней записанной точки. Переменные состояния y_{last} и t_{last}, соответствующие моменту последней записи, обновляются только при выполнении записи.

Запись выполняется по двум условиям:

$$\text{write}(t_i) = 1 \Leftrightarrow (\Delta(t_i) > d_z) \vee (t_i - t_{\text{last}} \geq T_{\text{hb}}), \qquad (2)$$

где d_z – порог мертвой зоны, T_{hb} – период контрольной записи. Первое условие подавляет малые шумовые колебания, второе гарантирует наличие опорной точки не реже одного раза в T_{hb} секунд даже при отсутствии значимых изменений. В работе принято $T_{\text{hb}} = 1$ с.

Недостаток фиксированного порога состоит в том, что одно и то же значение d_z применяется и на стационарных участках, и при переходных процессах. Большой d_z дает высокое сжатие в стационаре, но разрежает запись перехода и увеличивает ошибку восстановления. Малый d_z сохраняет форму перехода, однако на стационаре возрастает число шумовых записей и снижается степень сжатия.

Предлагаемый подход устраняет это противоречие. Порог мертвой зоны задается как кусочно-постоянная функция режима работы объекта:

$$d_z(t_i) = \begin{cases} d_{z_max}, & \text{mode}(t_i) = 0 \ (\text{стационар}) \\ d_{z_min}, & \text{mode}(t_i) = 1 \ (\text{переходный режим}), \end{cases} \quad d_{z_max} > d_{z_min}. \qquad (3)$$

В стационарном режиме широкий порог d_{z_max} подавляет шумовые колебания и обеспечивает высокое сжатие. На переходных участках порог автоматически снижается до d_{z_min}, что повышает плотность записей и сохраняет форму перехода. Переключение выполняется детектором режима с гистерезисом, что снижает вероятность ложных срабатываний при шумовых всплесках.

Для идентификации режима вводится скользящее стандартное отклонение $\sigma(t_i)$, вычисляемое по последним W отсчетам сигнала, где W – размер скользящего окна:

$$\bar{y}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=i-m+1}^{i} y(t_j),$$
$$\sigma(t_i) = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=i-m+1}^{i} (y(t_j) - \bar{y}_i)^2}, \qquad (4)$$

где $m = \min(W, i+1)$.

В работе приняты $\Delta t = 0{,}01$ с и $W = 150$, то есть $\sigma(t_i)$ оценивает изменчивость сигнала на интервале 1,5 с (150 отсчетов при шаге 0,01 с). В стационарном режиме $\sigma(t_i)$ близко к уровню шума измерительного канала σ_η. В переходном процессе, когда внутри окна оказываются значения разных уровней, $\sigma(t_i)$ возрастает.

Для разделения режимов вводится порог σ_{th}. Его значение определяется относительно σ_η, где σ_η – среднеквадратическое отклонение шума измерительного канала, оцениваемое по заведомо стационарному участку сигнала. Порог вычисляется по правилу

$$\sigma_{\text{th}} = k_\sigma \cdot \sigma_\eta, \qquad (5)$$

где k_σ – коэффициент запаса, задающий отступ порога от фонового уровня шума. При $\sigma_\eta \approx 0{,}020$ и $k_\sigma = 1{,}25$ получаем $\sigma_{\text{th}} \approx 0{,}025$.

Для подавления ложных переключений вблизи порога σ_{th} применяется временной гистерезис, реализованный двумя счетчиками. Счетчик cnt_{up} отслеживает число последовательных отсчетов, для которых $\sigma(t_i) > \sigma_{\text{th}}$. Счетчик cnt_{down} отслеживает число последовательных отсчетов, для которых $\sigma(t_i) \leq \sigma_{\text{th}}$. На каждом шаге обновляется только один из счетчиков, а второй сбрасывается в ноль.

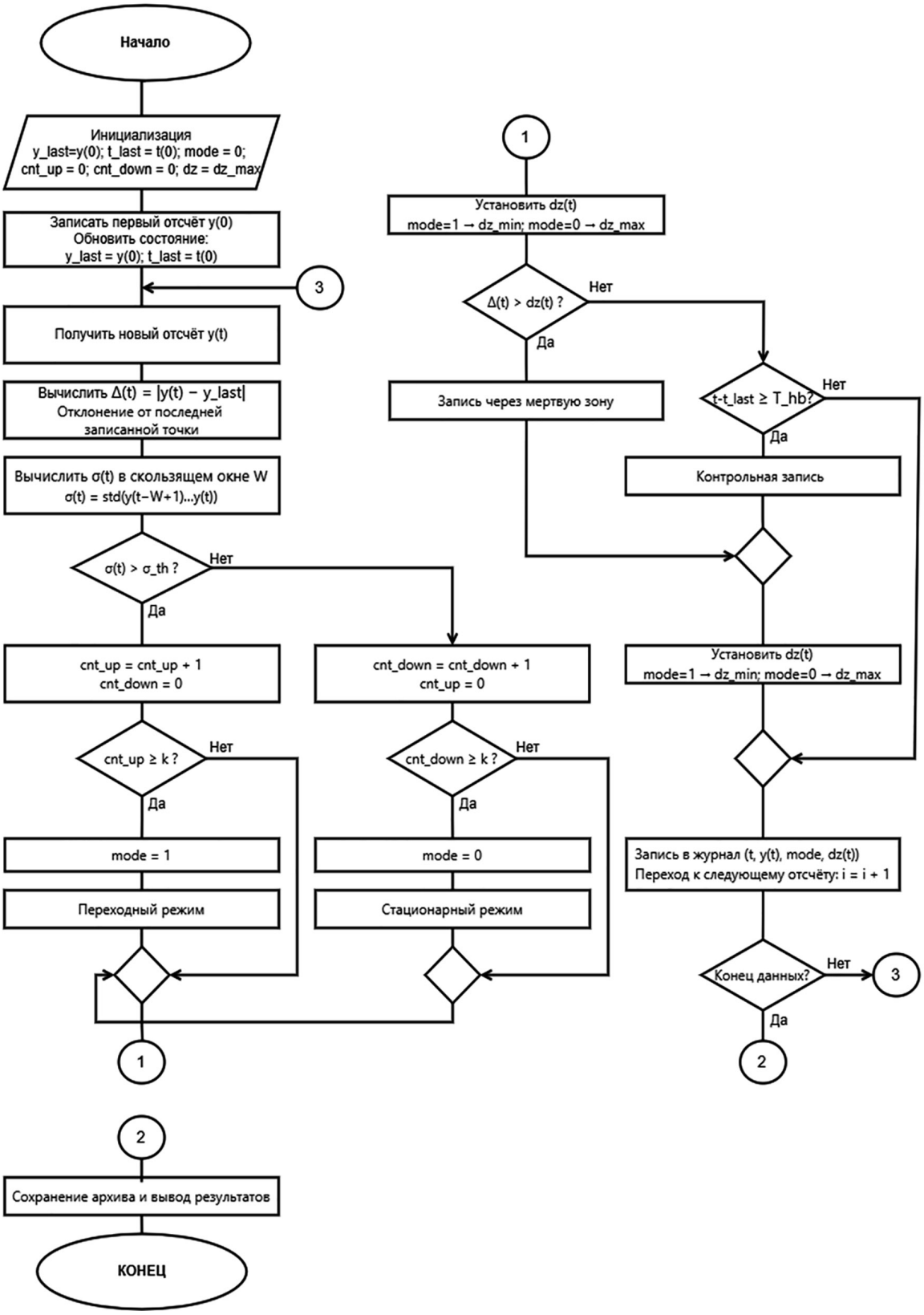


Рис. 1. Блок-схема алгоритма режимно-адаптивного архивирования по мертвой зоне

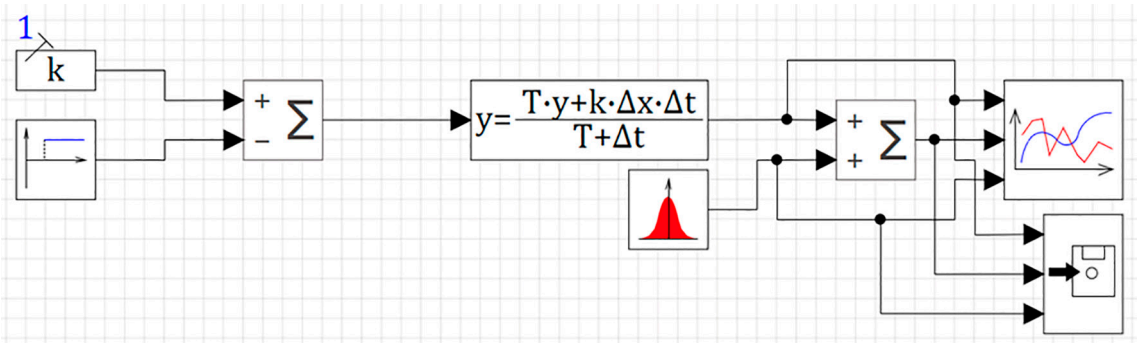


Рис. 2. Модель в среде SimInTech
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Переключение режима выполняется только при достижении одним из счетчиков порогового значения K, где K – число отсчетов подтверждения (параметр гистерезиса). Переход в переходный режим ($mode$ = 1) происходит при $cnt_{up} \geq K$ и текущем $mode$ = 0. Возврат в стационарный режим ($mode$ = 0) происходит при $cnt_{down} \geq K$ и текущем $mode$ = 1. Если ни одно из этих условий не выполнено, значение $mode$ сохраняется без изменений.

Время подтверждения составляет

$$T_{\text{confirm}} = K \cdot \Delta t. \qquad (6)$$

При K = 30 и Δt = 0,01 с получаем T_{confirm} = 0,3 с. Это означает, что кратковременные всплески $\sigma(t_i)$ продолжительностью менее 0,3 с не приводят к смене режима, что исключает переключения порога $\bar{d}_z(t_i)$.

Полная логика алгоритма, включая инициализацию переменных состояния, детектор режима с гистерезисом, адаптивное переключение порога $\bar{d}(t)$ и правило записи, представлена на рис. 1.

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

В среде SimInTech реализована модель на рис. 2, формирующая сигнал СКЗ виброскорости с характерными стационарными и переходными участками.

Сигнал задается как

$$y(t_i) = s(t_i) + \eta(t_i), \qquad (7)$$

где $s(t)$ – детерминированная составляющая, $\eta(t)$ – аддитивный гауссов шум с $\sigma_\eta \approx 0{,}020$, моделирующий погрешность измерительного канала. Составляющая $s(t)$ описывает изменение уровня с 1,0 до 0,7 в относительных единицах через инерционное звено первого порядка; переходный процесс начинается при $t \approx 5$ с и длится около 2 с (рис. 2).

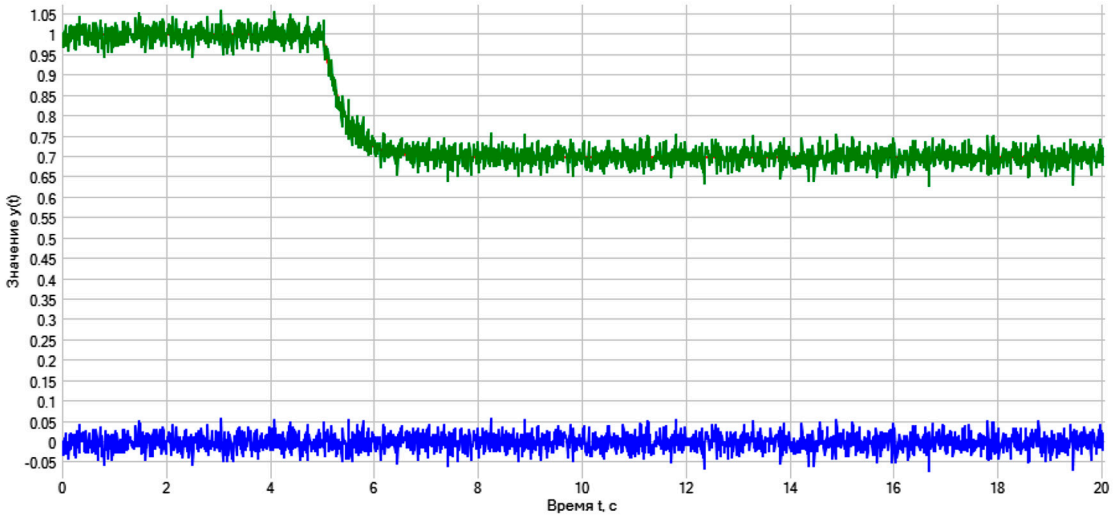


Рис. 3. Исходные данные из SimInTech
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 3 представлены измеренный сигнал $y(t)$ и эталонный сигнал $x(t)$ без шума. До $t \approx 5$ с наблюдается стационарный уровень около 1,0, затем следует переходный процесс, и к $t \approx 7$ с устанавливается новый уровень около 0,7. В нижней части рисунка показана шумовая компонента $\eta(t)$ с уровнем $\sigma_\eta \approx 0{,}020$, используемым при выборе порогов алгоритма. Стационарные участки занимают основную часть времени наблюдения, поэтому их прореживание дает основной эффект сокращения объема архива (рис. 3).

Сопоставлены три стратегии архивирования для сигнала $y(t)$ (рис. 4). На каждой панели представлены исходный зашумленный сигнал, восстановленная по архивным точкам кривая и записанные точки, дополнительно указаны число записей и степень сжатия.

При фиксированном пороге $d_z = 0{,}015$ записано 1222 точки из 2000, степень сжатия равна 1,6. Поскольку порог ниже уровня шума $\sigma_\eta \approx 0{,}020$, фиксируется значительная часть шумовых колебаний, поэтому сокращение объема данных оказывается минимальным, хотя восстановление получается точным.

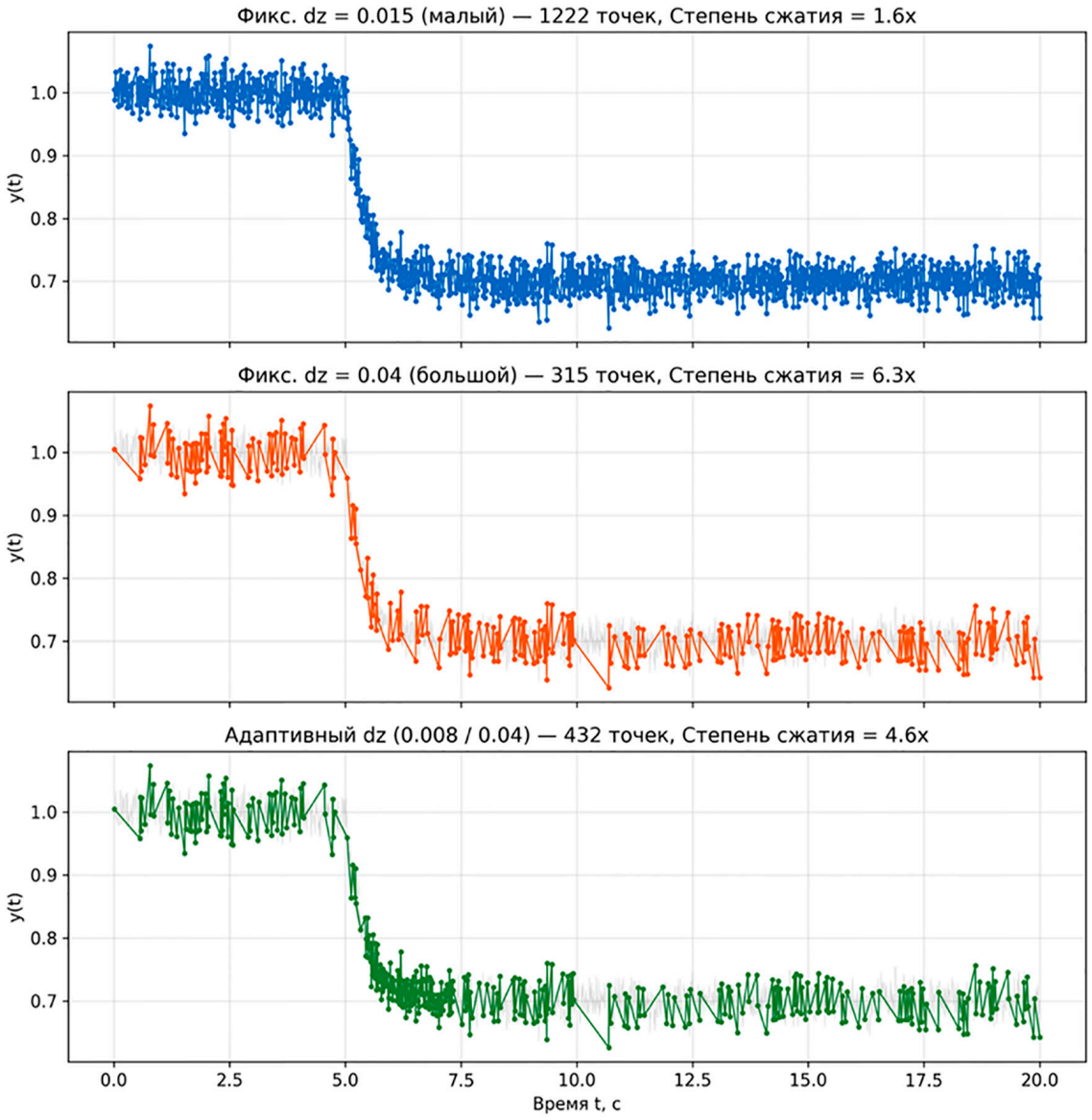


Рис. 4. Сравнение трех стратегий архивирования
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

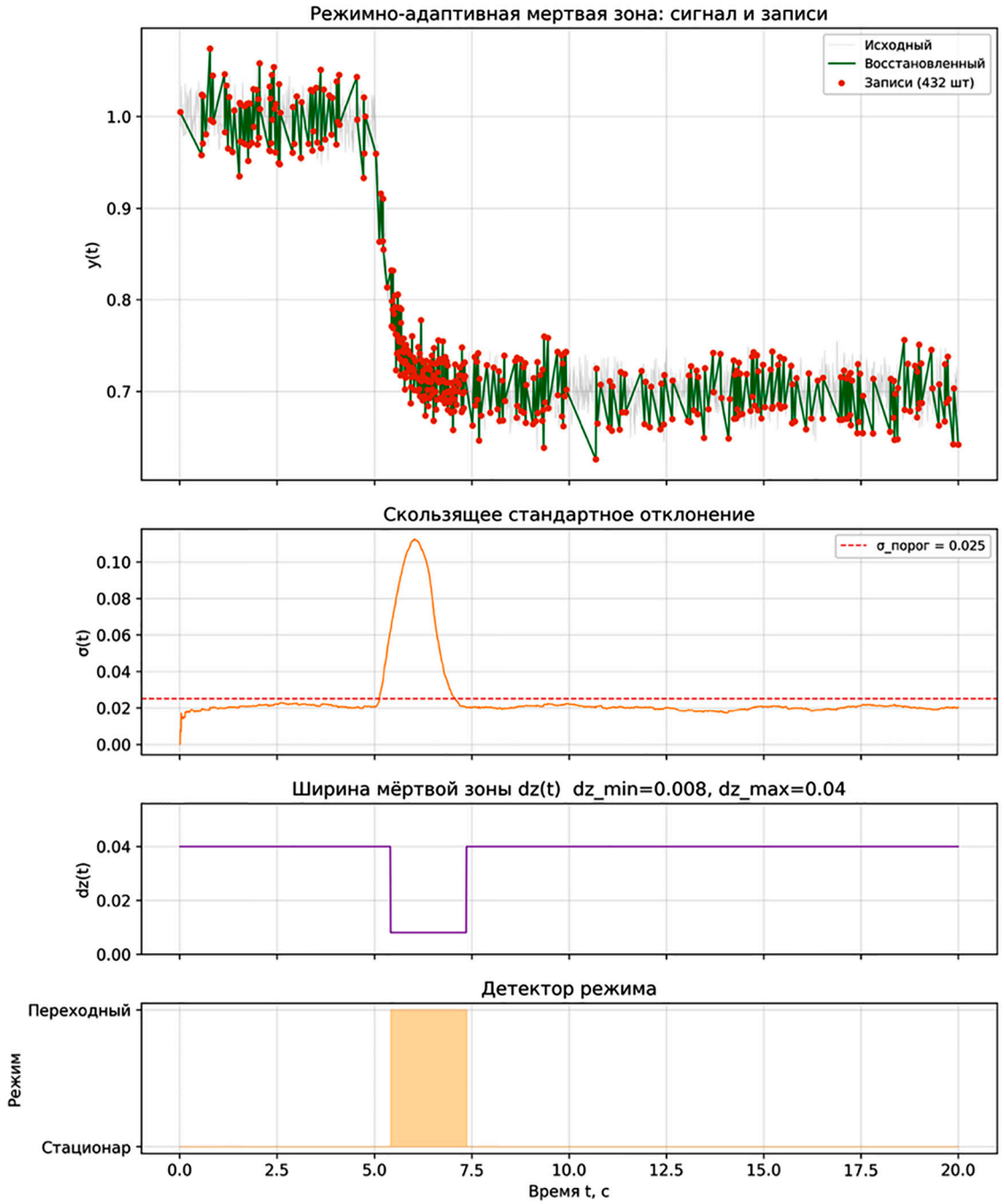


Рис. 5. Детальная работа адаптивного метода
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

При фиксированном пороге d_z = 0,04 записано 315 точек, степень сжатия равна 6,3. На стационарных участках записи определяются преимущественно периодической контрольной записью. На переходном участке записи остаются разреженными, форма перехода сглаживается, а максимальная ошибка на переходном участке достигает 0,068, что составляет около 23 % амплитуды перехода. В режимно-адаптивном варианте используется d_{z_max} = 0,04 на стационарных участках и d_{z_min} = 0,008 на переходном участке. Записано 432 точки, степень сжатия равна 4,6. Дополнительные 117 точек относительно варианта с фиксированным порогом d_z = 0,04 сосредоточены в области переходного процесса и обеспечивают снижение максимальной ошибки

на переходном участке с 0,068 до 0,027, то есть в 2,6 раза.

Рассмотрена работа режимно-адаптивного алгоритма в виде четырех синхронизированных по времени панелей (рис. 5). Первая панель содержит зашумленный сигнал $y(t)$, восстановленную кривую $\hat{y}(t)$ и 432 записанные точки. На стационарных участках при $t < 5$ с и $t > 7{,}5$ с точки разрежены и определяются преимущественно контрольной записью с периодом $T_{hb} = 1$ с, тогда как на переходном участке при $t \approx 5$–$7{,}5$ с плотность записей возрастает. Вторая панель показывает скользящее стандартное отклонение $\sigma(t)$. На стационарных участках $\sigma(t)$ близко к $\sigma_n \approx 0{,}020$ и не превышает порога $\sigma_{th} = 0{,}025$. В переходном процессе $\sigma(t)$ возрастает до 0,11 при $t \approx 6$ с, после чего возвращается к фоновому уровню. Третья панель отражает изменение порога $d_z(t)$. После подтверждения переходного режима в течение $T_{confirm} = 0{,}3$ с порог переключается с $d_{z_max} = 0{,}04$ на $d_{z_min} = 0{,}008$, что повышает плотность записей; после устойчивого возврата $\sigma(t)$ ниже σ_{th} порог возвращается к d_{z_max}. Четвертая панель показывает сигнал режима $mode(t)$, где 0 соответствует стационарному режиму, 1 – переходному процессу. Переходный интервал при $t \approx 5{,}4$–$7{,}8$ с согласуется с ростом числа записей и уменьшением $d_z(t)$, что подтверждает согласованную работу детектора режима, адаптивного порога и правила записи.

Приведен увеличенный фрагмент переходного процесса на интервале t = 4–8 с (рис. 6). Красной штриховой линией показан эталонный сигнал $x(t)$. При $d_z = 0{,}015$ восстановленная кривая близка к эталону, но степень сжатия невелика. При $d_z = 0{,}04$ переходный участок записывается разреженно, максимальная ошибка достигает 0,068. Режимно-адаптивный вариант до обнаружения перехода работает аналогично варианту $d_z = 0{,}04$, после переключения плотность записей резко возрастает. На графике заметна небольшая задержка обнаружения, обусловленная шириной окна W и временем подтверждения $T_{confirm}$.

Приведены гистограммы ошибок восстановления для трех методов по всем 2000 отсчетам (рис. 7). При $d_z = 0{,}015$ ошибки сосредоточены вблизи нуля. При $d_z = 0{,}04$ распределение шире из-за крупных отклонений на переходном участке. Для режимно-адаптивного метода крупные отклонения выражены слабее, поскольку на переходе порог снижается до d_{z_min} и плотность записей возрастает.

Выведена зависимость среднеквадратичной ошибки восстановления от степени сжатия (рис. 8). Режимно-адаптивный метод обеспечивает степень сжатия 4,6 при среднеквадратичной ошибке 0,025 и одновременно снижает максимальную ошибку на переходном участке в 2,6 раза по сравнению с фиксированным широким порогом.

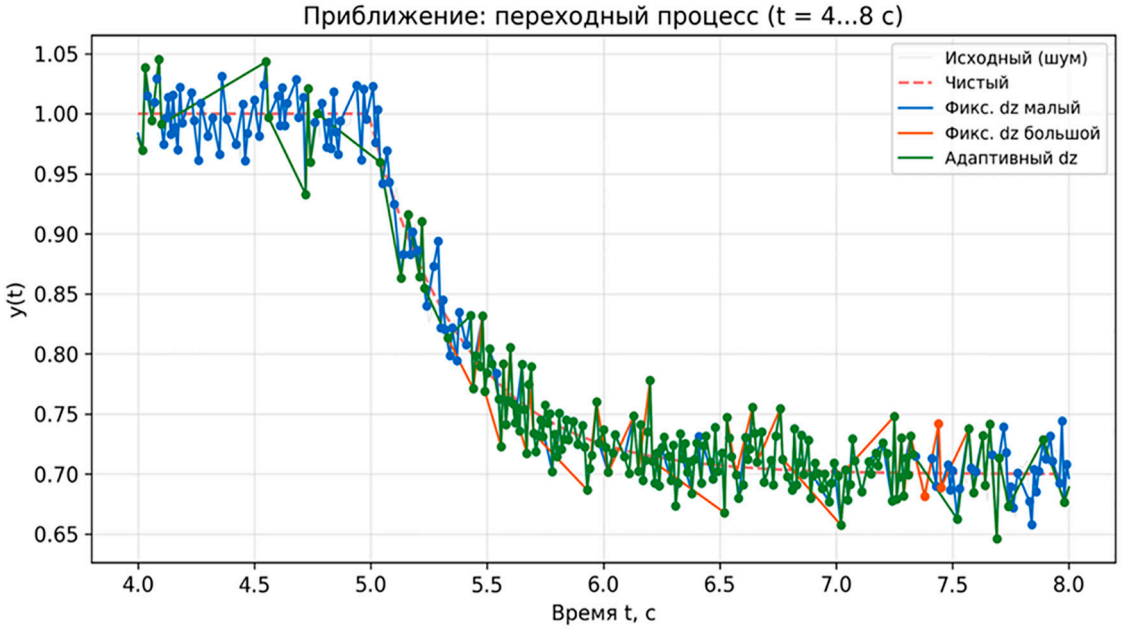


Рис. 6. Увеличенный участок переходного процесса на интервале t = 4–8 с, сравнение восстановленных сигналов трех методов с эталонным сигналом x(t)
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

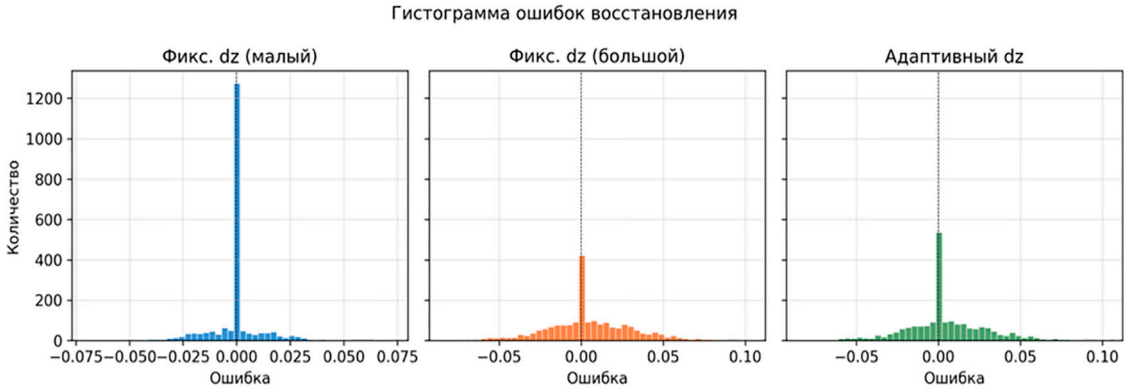


Рис. 7. Сравнение распределений ошибок восстановления для трех методов архивирования
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования



Рис. 8. Зависимость среднеквадратичной ошибки восстановления от степени сжатия архива
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Результаты численного эксперимента

	Записано точек	Степень сжатия	Средняя абсолютная ошибка	Среднекв. ошибка	Макс. ошибка	Макс. ошибка на переходе
Фикс. d_z (малый)	1222	1,6	0,005664	0,011322	0,072831	0,039803
Фикс. d_z (большой)	315	6,3	0,018937	0,026233	0,102881	0,068326
Адаптивный d_z	432	4,6	0,017210	0,025024	0,102881	0,026750

Примечание: составлена авторами в дополнение к сравнению полученных результатов

Для комплексного сопоставления стратегий по показателям качества архивирования, включая среднюю ошибку и максимальную ошибку на переходном участке, приведены результаты численного эксперимента (таблица).

При фиксированном пороге d_z = 0,015 степень сжатия равна 1,6, поскольку значительная часть шумовых колебаний превышает порог при σ_η ≈ 0,020. При d_z = 0,04 степень сжатия достигает 6,3. Режимно-адаптивный метод обеспечивает степень сжатия 4,6. Дополнительные 117 записей по сравнению с фиксированным широким порогом сосредоточены на переходном участке, тогда как на стационаре оба метода работают одинаково.

Средняя абсолютная ошибка составляет 0,0172 для режимно-адаптивного метода и 0,0189 для фиксированного широкого порога. Среднеквадратичная ошибка равна 0,0250 и 0,0262 соответственно. Различия невелики, поскольку около 90 % времени сигнал находится на стационаре, где обе стратегии совпадают.

Ключевое различие проявляется в максимальной ошибке на переходном участке. При d_z = 0,04 она равна 0,068, что составляет около 23 % амплитуды перехода. Режимно-адаптивный метод снижает ее до 0,027, то есть в 2,6 раза. Достигнутая величина сопоставима с σ_η ≈ 0,020, что означает сохранение формы перехода с точностью, близкой к ограничению измерительного канала. Максимальная ошибка на всем интервале для обоих методов равна 0,103 и обусловлена шумовым выбросом на стационаре между контрольными записями.

Гипотеза требовала снижения максимальной ошибки на переходном участке не менее чем вдвое при сопоставимой степени сжатия. Степень сжатия составила 4,6 против 6,3, ошибка снизилась с 0,068 до 0,027, то есть в 2,6 раза. Оба условия выполнены.

Заключение

В работе предложен и экспериментально исследован метод режимно-адаптивного архивирования телеметрии вибродиагностики на основе мертвой зоны, ориентированный на снижение объема хранимых данных при сохранении информативности переходных процессов. Метод основан на автоматическом переключении порога мертвой зоны между d_{z_min} в переходном режиме и d_{z_max} в стационарном режиме, при этом выбор режима выполняется детектором на основе скользящего среднеквадратического отклонения σ(t) с механизмом гистерезиса, что снижает вероятность ложных срабатываний при шумовых всплесках. Для проверки подхода реализована имитационная модель сигнала среднеквадратичного значения виброскорости в среде SimInTech, включающая переход уровня 1,0 к 0,7 через инерционное звено первого порядка и аддитивный гауссов шум с $\sigma_\eta \approx 0{,}020$; сформирован массив из 2000 отсчетов при шаге Δt = 0,01 с и обеспечен экспорт данных для последующего анализа. Сравнение трех стратегий архивирования, включавших фиксированные пороги d_z = 0,015 и d_z = 0,04 и режимно-адаптивный вариант d_{z_min}/d_{z_max} = 0,008/0,04, показало, что режимно-адаптивный метод обеспечивает степень сжатия 4,6 при максимальной ошибке на переходном участке 0,027, тогда как вариант с фиксированным широким порогом обеспечивает степень сжатия 6,3 при максимальной ошибке 0,068; тем самым точность сохранения переходного процесса повышается в 2,6 раза при степени сжатия того же порядка, что подтверждает сформулированную гипотезу. Показано, что параметры настройки могут быть выражены через оценку уровня шума измерительного канала σ_η, определяемую по стационарному участку, что позволяет выполнять настройку без идентификации модели объекта; дополнительное снижение максимальной ошибки на стационарных участках достигается сокращением периода контрольной записи T_{hb} до 0,5 с за счет увеличения плотности контрольных точек.

Список литературы

1. AlQemlas T., Saber A., Abdelfattah A., Mokhiamar O., Amine S., Gazo-Hanna E.Artificial Intelligence-Driven Fault Detection and Predictive Maintenance in Renewable Energy Systems: A Review // Engineered Science. 2026. Vol. 39. Art. 2061. DOI: 10.30919/es2061.

2. Syed M. A. B., Hasan M. R., Chowdhury N. I., Rahman M. H., Ahmed I. A systematic review of time series algorithms and analytics in predictive maintenance // Decision Analytics Journal. 2025. Vol. 15. Art. 100573. DOI: 10.1016/j.dajour.2025.100573.

3. Chiarot G., Silvestri C. Time Series Compression Survey // ACM Computing Surveys. 2023. Vol. 55. Is. 10. Art. 198. P. 1–32. DOI: 10.1145/3560814.

4. Correa J. D. A. Pinto A. S. R., Montez C. Lossy Data Compression for IoT Sensors: A Review // Internet of Things. 2022. Vol. 19. Art. 100516. DOI: 10.1016/j.iot.2022.100516.

5. El Sayed A., Ruiz M., Harb H., Velasco L. Deep Learning-Based Adaptive Compression and Anomaly Detection for Smart B5G Use Cases Operation // Sensors. 2023. Vol. 23. Is. 2. Art. 1043. DOI: 10.3390/s23021043.

6. Gong Q., Zhang C., Liang X., Reshniak V., Chen J., Rangarajan A., Ranka S., Vidal N., Wan L., Ullrich P., Podhorszki N., Jacob R., Klasky S. Spatiotemporally Adaptive Compression for Scientific Dataset with Feature Preservation – A Case Study on Simulation Data with Extreme Climate Events Analysis // 2023 IEEE 19th International Conference on e-Science (e-Science). Limassol, Cyprus. 2023. P. 1–10. DOI: 10.1109/e-Science58273.2023.10254796.

7. Agrawal V., Kuldeep G., Dey D. Near Lossless Time Series Data Compression Methods Using Statistics and Deviation // 2022 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Rio de Janeiro, Brazil. 2022. DOI: 10.1109/GCWkshps56602.2022.10008693.

8. Pandey R., Grimm F., Nille D., Böckenhoff C., Gamez J., Uziel S., Dorneich A., Hutschenreuther T., Krug S. Case Study on Compression of Vibration Data for Distributed Wireless Condition Monitoring Systems // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. Is. 22. Art. 12346. DOI: 10.3390/app152212346.

9. Панина О. В., Завалько Н. А., Еремин С. Г., Харченко К. В., Зуденкова С. А. Разработка нейронных сетей для анализа вибрационных сигналов горного оборудования и предупреждения аварийных ситуаций // Горная промышленность. 2025. № 2. С. 97–104. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-2-97-104.

10. Turkin I., Leznovskyi V., Zelenkov A., Nabizade A., Volobuieva L., Turkina V. The Use of IoT for Determination of Time and Frequency Vibration Characteristics of Industrial Equipment for Condition-Based Maintenance // Computation. 2023. Vol. 11. Is. 9. Art. 177. DOI: 10.3390/computation11090177.

11. Baron P., Kočiško M., Hlavatá S., Franas E. Vibrodiagnostics as a Predictive Maintenance Tool in the Operation of Turbo Generators of a Small Hydropower Plant // Advances in Mechanical Engineering. 2022. Vol. 14. Is. 5. DOI: 10.1177/16878132221101023.

12. Tao X., Zhao Y., Chen Y. Vibration Monitoring and Health Status Recognition Technology of Machine Tool Electric Spindle // Journal of Engineering and Applied Science. 2025. Vol. 72. Art. 102. DOI: 10.1186/s44147-025-00672-2.

13. Forbicini F. Time Series Analysis in Compressor-Based Machines: A Survey / Forbicini F., Vago N. O. P., Fraternali P. // Neural Computing and Applications. 2025. DOI: 10.1007/s00521-025-11065-0.

14. Zheng M., Man J., Wang D., Chen Y., Li Q., Liu Y. Semi-Supervised Multivariate Time Series Anomaly Detection for Wind Turbines Using Generator SCADA Data // Reliability Engineering & System Safety. 2023. Vol. 235. Art. 109235. DOI: 10.1016/j.ress.2023.109235.

15. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч. 1. Общие требования. Введ. 1999-07-01. М.: Стандартинформ, 1997. 16 с. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200008666 (дата обращения: 24.05.2026).

16. ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч. 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 мин$^{-1}$. М.: Стандартинформ, 2007. 12 с.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 004.89
DOI 10.17513/snt.40823

CC BY 4.0

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ ВЕРИФИКАЦИИ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

[1]Зиновьев В. И. ORCID ID 0009-0008-4384-3768,
[2]Ромашкова О. Н. ORCID ID 0000-0002-1646-8527

[1]Государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский городской педагогический университет», Москва, Российская Федерация, e-mail: legrang@yandex.ru;
[2]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации», Москва, Российская Федерация

В статье исследована актуальная проблема обеспечения контекстуальной непрерывности и информационной безопасности в децентрализованных организационных системах. В рамках разработки математических моделей и критериев оценки эффективности, качества и надежности организационных систем формализован феномен семантического разрыва, возникающего при транзите цифровых состояний между различными средами доверия. Главная цель работы заключается в совершенствовании процессов управления децентрализованными сетями посредством разработки комплексной математической модели гибридной верификации транзакций. Для достижения поставленной цели предложенная модель декомпозирует общую оценку легитимности на три независимых направления: изоляционный, семантический и синхронизационный базисы. В качестве новой информационной технологии для решения сложных задач управления в организационных системах применена синергия методов машинного обучения, спектрального анализа графов и закона Литтла. Дополнительно реализована инкапсуляция процессов логического вывода в доверенные аппаратные среды исполнения с последующей генерацией криптографических доказательств с нулевым разглашением. Эмпирическая валидация на реальных наборах данных подтверждает высокую точность и отказоустойчивость разработанного мета-предиктора. Предложенная архитектура позволяет динамически адаптироваться к изменяющимся сетевым нагрузкам и эффективно противодействовать атакам на истощение ресурсов. Полученные результаты минимизируют риски оппортунистического поведения агентов и обеспечивают надежную интеллектуальную поддержку принятия стратегических и оперативных управленческих решений в современных распределенных организационных структурах.

Ключевые слова: гибридная верификация, семантический разрыв, закон Литтла, топологическая энтропия, вектор Фидлера, распределенные реестры, нулевое разглашение

MATHEMATICAL MODELING OF HYBRID VERIFICATION FOR INTELLIGENT DECISION SUPPORT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS

[1]Zinovev V. I. ORCID ID 0009-0008-4384-3768,
[2] Romashkova O. N. ORCID ID 0000-0002-1646-8527

[1]State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Moscow City Pedagogical University", Moscow, Russian Federation, e-mail: legrang@yandex.ru;
[2]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration", Moscow, Russian Federation

The article investigates the urgent problem of ensuring contextual continuity and information security in decentralized organizational systems. Within the framework of developing mathematical models and criteria for evaluating the efficiency, quality, and reliability of organizational systems, the phenomenon of the semantic gap arising during the transit of digital states between different trust environments is formalized. The main objective of the study is to improve the management processes of decentralized networks through the development of a comprehensive mathematical model of hybrid transaction verification. To achieve this goal, the proposed model decomposes the overall legitimacy assessment into three independent directions: isolation, semantic, and synchronization bases. As a new information technology for solving complex management tasks in organizational systems, the synergy of machine learning methods, spectral graph analysis, and Little's law is applied. Additionally, the encapsulation of inference processes into trusted hardware execution environments with the subsequent generation of zero-knowledge cryptographic proofs is implemented. Empirical validation on real datasets confirms the high accuracy and fault tolerance of the developed meta-predictor. The proposed architecture allows for dynamic adaptation to changing network loads and effectively counters resource exhaustion attacks. The obtained results minimize the risks of opportunistic behavior of agents and provide reliable intelligent support for making strategic and operational managerial decisions in modern distributed organizational structures.

Keywords: hybrid verification, semantic gap, Little's law, Fiedler vector, topological entropy, distributed ledgers, zero-knowledge

Введение

Эволюция управления смещается к децентрализованным сетям [1], где отсутствие центра доверия провоцирует оппортунизм агентов [2, с. 417]. Текущие подходы к детерминированному консенсусу [3; 4] не учитывают стохастический AML-контекст при конфликте прозрачности и анонимности [5]. В свою очередь, применение методов графового машинного обучения [6] сопряжено с высокой уязвимостью к сетевым L7 DoS-атакам [7]. Данные барьеры диктуют необходимость в разработке методов и алгоритмов решения задач управления в организационных системах, интегрирующих энтропию полезной нагрузки, спектральную связность графа и сетевые задержки в единый контур. Без такого синтеза возникает «семантический разрыв» – утрата нормативного контекста при транзите актива.

Цель исследования – совершенствование процессов управления транзитом цифровых активов в децентрализованных организационных системах (объект исследования) средствами разработки математической модели гибридной интеллектуальной верификации (предмет исследования), обеспечивающей интеллектуальную поддержку принятия управленческих решений в организационных системах на основе синергии машинного обучения, спектрального анализа графов и доказательств с нулевым разглашением.

Материал и методы исследования

Методологический фундамент исследования основывается на системном подходе [8] к анализу децентрализованных структур, требующем предварительного аналитического описания условий возникновения информационных противоречий при передаче состояний активов.

Результаты исследования и их обсуждение

Цифровой актив в системе моделируется как неделимый многомерный кортеж:

$$A = \langle V, R, H \rangle,$$

где V – номинальная ценность актива; R – нормативный базис (матрица юрисдикционных политик и комплаенс-ограничений); H – направленный ациклический граф истории состояний (родословная актива).

При транзите актива из корпоративной среды (ERP) в децентрализованную среду оператор проецирования Π расщепляет базис R на вычисляемые (on-chain) и скрытые (off-chain) правила

$$R_{tgt} = R_{on} \cup R_{off}. \quad (1)$$

Семантический разрыв формализуется как разность множеств исходного базиса и того, что способен верифицировать детерминированный смарт-контракт

$$\Delta_{sem} = R_{src} \setminus \Pi^{-1}(R_{on}). \quad (2)$$

Для демонстрации процесса расщепления нормативного базиса и формирования компенсаторного механизма разработана диаграмма переходов состояний (рис. 1).

Для устранения Δ_{sem} вводится глобальная функция предиктивной верификации $\hat{Y}$, представляющая собой синергетическое объединение трех независимых метрических функций

$$\hat{Y} = w_1 \cdot F_{iso}(x) + w_2 \cdot F_{sem}(H) + w_3 \cdot F_{sync}(t). \quad (3)$$

Условие нормировки адаптивных весовых коэффициентов

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1. \quad (4)$$

Синтез предлагаемой модели предполагает последовательную декомпозицию процесса верификации на функциональные уровни, отвечающие за изоляцию аномалий, семантический анализ транзакционных связей и временную синхронизацию потоков.

Изоляционный базис (F_{iso}). Функция выявляет инъекции и аномальные паттерны в полезной нагрузке текущего запроса x. Сначала вычисляется информационная энтропия Шеннона

$$H_{payload} = -\sum_{i=1}^{n} p_i \cdot \log_2(p_i). \quad (5)$$

Для интеллектуальной классификации применяется алгоритм Изолирующего леса (Isolation Forest). Оценка аномальности $s(x,n)$ вычисляется на основе длины пути $E(h(x))$ в дереве изоляции и средней длины неудачного поиска $c(n)$

$$s(x,n) = 2^{-\frac{E(h(x))}{c(n)}}. \quad (6)$$

Базис F_{iso} агрегирует эти метрики с помощью градиентного бустинга (XGBoost) [9], возвращая нормированную вероятность чистоты payload-составляющей.

Семантический графовый базис (F_{sem}) [10]. Для выявления циклических схем обфускации (например, пулов легализации) анализируется подграф истории H. Вычисляется нормированная матрица Лапласа

$$L_{graph} = I - D^{-1/2} A_{matrix} D^{-1/2}, \quad (7)$$

где D – диагональная матрица степеней, A_{matrix} – матрица смежности.



Рис. 1. Автомат состояний транзита актива
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

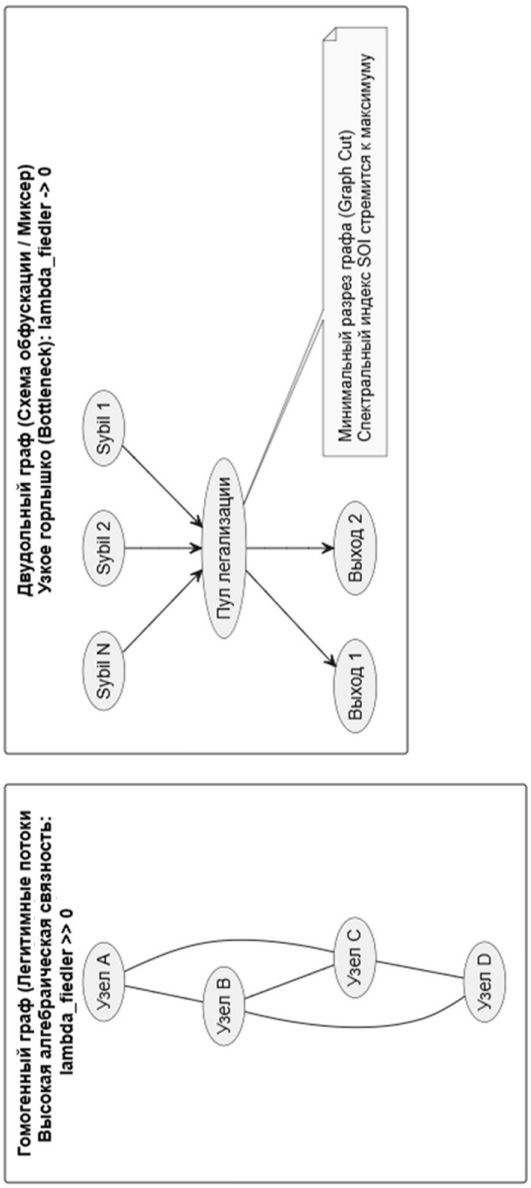


Рис. 2. Топологическая абстракция выявления схем обфускации
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

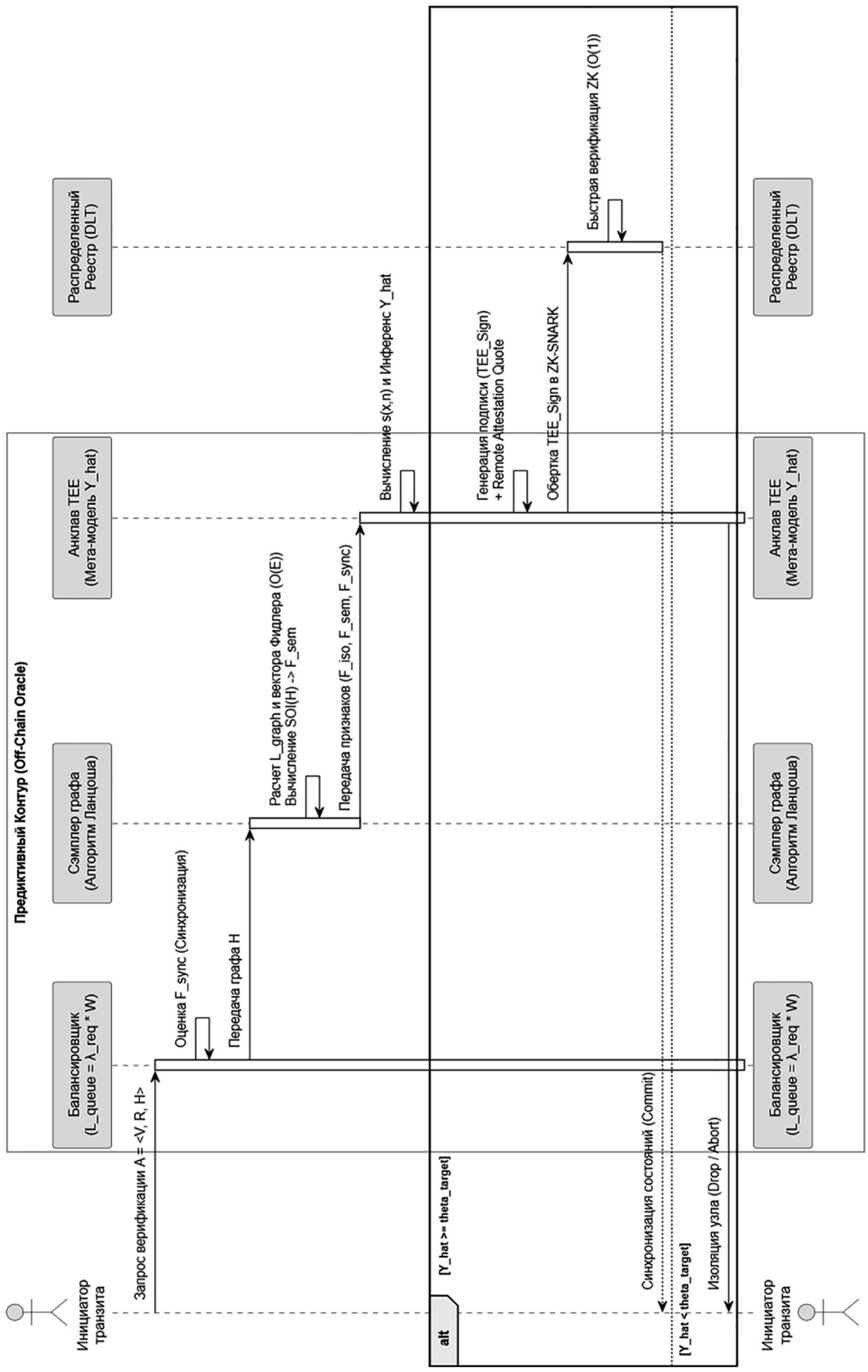


Рис. 3. Архитектура гибридной верификации
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

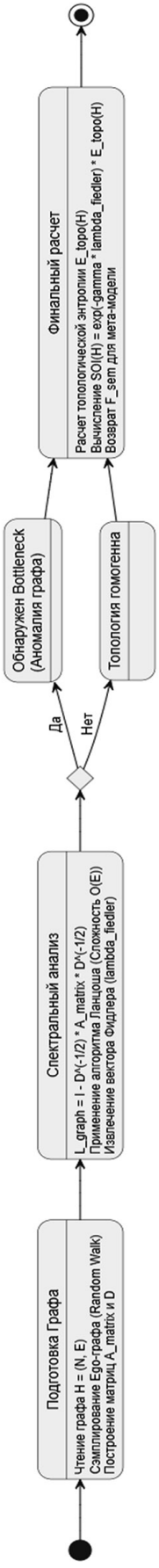


Рис. 4. Алгоритм спектральной верификации
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

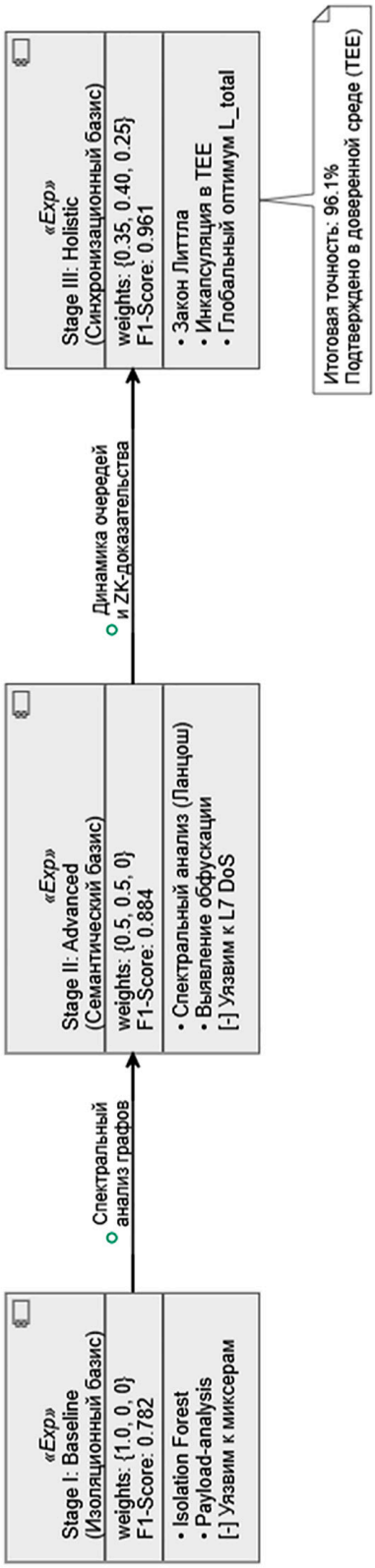


Рис. 5. Абляционный анализ компонентов метапредикта
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Для преодоления кубической вычислительной сложности прямого спектрального разложения применяется метод случайных блужданий с возвратом (RWR) для сэмплинга графа. Второе собственное значение (вектор Фидлера $\lambda_{fiedler}$) вычисляется алгоритмом Ланцоша за асимптотическое время $O(E)$, где E – число ребер. Наличие узкого горлышка (признак преднамеренной обфускации) выражается как $\lambda_{fiedler} \to 0$. Концептуальная абстракция представлена на рис. 2.

Топологическая энтропия графа $E_{topo}(H)$ вычисляется по распределению степеней узлов $P(k)$

$$E_{topo}(H) = -\sum_{k} P(k) \log_2 P(k). \quad (8)$$

Спектральный индекс обфускации (SOI), служащий главным предиктором для F_{sem}, равен

$$SOI(H) = \exp\left(-\gamma \cdot \lambda_{fiedler}\right) \cdot E_{topo}(H). \quad (9)$$

Синхронизационный сетевой базис (F_{sync}). Для защиты от асинхронных атак на истощение ресурсов (L7 DoS), генерируемых ботнетами, оценивается состояние распределенной очереди. Согласно закону Литтла из теории массового обслуживания [11]

$$L_{queue} = \lambda_{red} \cdot W,$$

где L_{queue} – математическое ожидание длины очереди, λ_{red} – интенсивность входящих M2M-запросов, W – среднее время задержки обработки. Если L_{queue} экспоненциально растет при легитимном F_{sem},, система диагностирует Sybil-атаку, и F_{sync} стремится к нулю.

Детерминизация итогового решения для смарт-контракта осуществляется по динамическому порогу θ_{target}:

если $\hat{Y} \geq \theta_{target} \Rightarrow \sigma_{oracle} = 1$,

если $\hat{Y} < \theta_{target} \Rightarrow \sigma_{oracle} = 0$.

Практическая апробация разработанных теоретических положений позволила синтезировать целевую архитектуру системы, обеспечивающую интеллектуальную поддержку процессов верификации и криптографическую защиту транзита состояний [12].

Интеграция тяжелых ML-вычислений в распределенный реестр требует применения доказательств с нулевым разглашением (ZK-SNARK) [13; 14]. Однако генерация SNARK для случайного леса или расчета графов аппаратно неэффективна (ZKML-барьер). В качестве синергетического решения предложено инкапсулировать вычисление $\hat{Y}$ в Доверенные среды исполнения (TEE, например, Intel SGX) [15]. Анклав генерирует легковесную подпись и криптографическую квоту удаленной аттестации (Remote Attestation Quote), которые обертываются в ZK-SNARK за константное время $O(1)$ (рис. 3).

Спектральный анализ подграфа детализирован на алгоритмической схеме (рис. 4).

Экспериментальные исследования и абляционный анализ. Обучение ансамбля моделей (XGBoost + Graph Neural Networks) осуществлялось через минимизацию взвешенной асимметричной функции потерь L_{async}

$$L_{async} = -\left[\alpha \cdot y \log\left(\hat{Y}\right) + \beta \cdot (1-y) \log\left(1-\hat{Y}\right)\right]. \quad (10)$$

Для обеспечения глобальной сходимости в условиях мультимодальных данных введена совокупная функция потерь L_{total}

$$L_{total} = \alpha L_{async} + \beta L_{sem} + \gamma L_{sync}. \quad (11)$$

Валидация проведена на графе Elliptic Data Set (N = 203769, E = 234355) методом темпорально-стратифицированного сэмплинга. Для оценки $\hat{Y}$ инжектированы возмущения трех типов: искажения нагрузки (F_{iso}), подграфы обфускации (F_{sem}) и сетевые задержки (F_{sync}). Дисбаланс классов (88/12 %) соответствует энтропии реальных M2M-систем. Синергия компонентов $\hat{Y}$ обоснована абляционным анализом (Ablation Study) с поочередным отключением базисов (рис. 5).

Изолированное ML-профилирование (F_{iso}) не выявляет топологические аномалии. Внедрение F_{sem} повысило F1-Score до 0,884, но не обеспечило сепарацию легитимных пиков нагрузки и атак. Интеграция закона Литтла (F_{sync}) позволила ансамблю адаптироваться к физике сети, достигнув F1 = 0,961 при инференсе 18 мс.

Для обеспечения гибкости организационной системы в условиях волатильности сетевого трафика и изменения паттернов поведения агентов, в разработанной модели реализован механизм динамической адаптации порога принятия решений θ_{target}.

В предложенной гибридной модели порог детерминизации θ_{target} не является статической константой, а вычисляется как функция от скользящего окна исторической топологической энтропии $\overline{E_{topo}}$ и текущей нагрузки на мемпул (mempool) распределенного реестра. При экспоненциальном росте очереди входящих запросов (L_{queue}), модель автоматически повышает требования к спектральной чистоте анализируемого подграфа ($SOI(H)$). Это позволяет системе формировать превентивный защитный барьер, снижая вероятность успешного проведения атак Сивиллы (Sybil attack)

или использования сложных схем обфускации через пулы легализации.

С точки зрения управления организационными системами данный подход означает качественный переход от реактивной модели комплаенс-контроля к проактивной. Система получает возможность автоматически балансировать между пропускной способностью транзакций (TPS) и требуемым уровнем безопасности. В периоды стабильного функционирования сети требования к верификации оптимизируются, что обеспечивает высокую скорость обработки данных. При выявлении паттернов скоординированного оппортунистического поведения агентов система переходит в режим повышенной изоляции, блокируя сомнительные транзиты цифровых активов еще на этапе off-chain предикта.

Внедрение предложенной модели гибридной верификации в контур управления децентрализованными организационными системами позволяет существенно нивелировать транзакционные издержки, связанные с ручным аудитом и комплаенс-контролем. Интеллектуальная поддержка принятия решений, основанная на агрегации метрик из трех независимых базисов, минимизирует влияние человеческого фактора и предотвращает эскалацию конфликтов интересов между независимыми агентами сети. Практическая значимость разработанного подхода подтверждается не только высокой точностью обнаружения аномалий, но и способностью системы к динамической самоадаптации при изменении топологии сети. Это формирует замкнутый цикл управления рисками, что является критически важным условием для обеспечения надежности, прозрачности и отказоустойчивости современных распределенных организационных структур в условиях неопределенности.

Заключение

В ходе исследования решена научная задача по разработке теоретических основ управления в организационных системах применительно к децентрализованным сетям. Выполненная разработка математической модели и критериев эффективности гибридной верификации на базе алгоритма Ланцоша и ZK-SNARK представляет собой новую информационную технологию для решения задач управления, исключающую семантический разрыв без потери производительности. Результаты исследования служат фундаментом для разработки методов и алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений в организационных системах, позволяя минимизировать риски в реальном времени.

Список литературы

1. Shuai Wang, Wenwen Ding, Juanjuan Li, Yong Yuan, Liwei Ouyang, Fei-Yue Wang Decentralized Autonomous Organizations: Concept, Model, and Applications // IEEE Transactions on Computational Social Systems. 2019. Vol. 6. Is. 5. P. 870–878. DOI: 10.1109/TCSS.2019.2938190.

2. Новиков Д. А. Теория управления организационными системами. 4-е изд., испр. и дополн. М.: Ленанд, 2022. 500 с. ISBN 978-5-9710-9459-3.

3. Schär F. Decentralized Finance: On Blockchain – and Smart Contract-Based Financial Markets // Federal Reserve Bank of St. Louis Review. 2021. Vol. 103. Is. 2. P. 153–174. DOI: 10.20955/r.103.153-74.

4. Buterin V. A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform // Ethereum White Paper. 2014. 36 p. [Электронный ресурс]. URL: https://ethereum.org/en/whitepaper/ (дата обращения: 09.04.2026).

5. Nassif A. B., Talib M. A., Nasir Q., Dakalbab F. M. Machine Learning for Anomaly Detection: A Systematic Review // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 78658–78700. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3083060.

6. Zhang Z., Cui P., Zhu W. Deep Learning on Graphs: A Survey // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2022. Vol. 34. Is. 1. P. 249–270. DOI: 10.1109/TKDE.2020.2981333.

7. Saad M., Spaulding J., Njilla L., Kamhoua C., Shetty S., Nyang D., Mohaisen A. Exploring the Attack Surface of Blockchain: A Comprehensive Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2020. Vol. 22. Is. 3. P. 1977–2008. DOI: 10.1109/COMST.2020.2975999.

8. Каптерев А. И., Ромашкова О. Н., Чискидов С. В., Ермакова Т. Н. Современное состояние и перспективы моделирования цифровых профессиональных пространств в бизнесе и образовании // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Информатизация образования. 2023. Т. 20. № 4. С. 358–372. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=63430246 (дата обращения: 09.04.2026). EDN: BSBPRL.

9. Liu F. T., Ting K. M., Zhou Z. Isolation Forest // 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining. 2008. P. 413–422. DOI: 10.1109/ICDM.2008.17.

10. Wu Z., Pan S., Chen F. A., et al. Comprehensive Survey on Graph Neural Networks // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2021. Vol. 32. Is. 1. P. 4–24. DOI: 10.1109/TNNLS.2020.2978386.

11. Little J. D. C. OR FORUM – Little's Law as Viewed on Its 50th Anniversary // Operations Research. 2011. Vol. 59. Is. 3. P. 536–549. DOI: 10.1287/opre.1110.0940.

12. Zhang R., Xue R., Liu L. Security and Privacy on Blockchain // ACM Computing Surveys. 2019. Vol. 52. Is. 3. P. 1–34. DOI: 10.1145/3316481.

13. Ben-Sasson E., Chiesa A., Genkin D., Tromer E., Virza M. SNARKs for C: Verifying Program Executions Succinctly and in Zero Knowledge // Advances in Cryptology – CRYPTO 2013. 2013. P. 90–108. DOI: 10.1007/978-3-642-40084-1_6.

14. Xiaoqiang Sun, F. Richard Yu, Peng Zhang et al. A Survey on Zero-Knowledge Proof in Blockchain // IEEE Network. 2021. Vol. 35. Is. 4. P. 198–205. DOI: 10.1109/MNET.011.2000473.

15. Cheng R. et al. Ekiden: A Platform for Confidentiality-Preserving, Trustworthy, and Performant Smart Contracts // 2019 IEEE European Symposium on Security and Privacy (EuroS&P). 2019. P. 185–200. DOI: 10.1109/EuroSP.2019.00023.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 517.958:531.332:534-14
DOI 10.17513/snt.40824

CC BY 4.0

ГРАНИЧНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ СТЕНКИ РЕАКТОРА ПИРОЛИЗА МЕТАНА

Колотилкина К. В. ORCID ID 0009-0003-0896-9510

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», Самара, Российская Федерация, e-mail: xeniakolotilkina@yandex.ru

Важной научной проблемой является разработка новых методов получения высокоточных аналитических решений сложных краевых задач математической физики, отличающихся универсальностью, простотой реализации и удобством для использования в инженерных приложениях. Целью работы является разработка метода получения аналитического решения высокой точности применительно к решению нестационарной задачи теплопроводности для керамической стенки жидкометаллического реактора пиролиза метана при несимметричных граничных условиях третьего рода. Искомое решение представляется в виде суммы двух функций, представляющих частное решение стационарной задачи с неоднородными граничными условиями и общее решение нестационарной задачи с однородными граничными условиями. С целью упрощения процесса получения решения нестационарной задачи используются дополнительные граничные условия, выполняемые в одной из граничных точек рассматриваемой области, что приводит к выполнению уравнения Штурма – Лиувилля и во всей области без необходимости его интегрирования по пространственной переменной. Собственные числа, определяемые из решения краевой задачи Штурма – Лиувилля, практически совпадают с точными их значениями. Приводится доказательство теоремы, подтверждающей выполнение уравнения во всей рассматриваемой области при его граничном выполнении. Найденное решение применено для расчета температуры керамической стенки жидкометаллического реактора пиролиза метана. Анализ результатов позволяет заключить, что на начальном участке времени прогрева реактора перепад температуры в стенке достигает величин, вызывающих термические напряжения, превышающие предел прочности для данного материала.

Ключевые слова: пиролиз, теплопроводность, неоднородные условия третьего рода, дополнительные граничные условия, задача Штурма – Лиувилля

BOUNDARY METHOD FOR ANALYSIS OF THE THERMAL STATE OF A METHANE PYROLYSIS REACTOR WALL

Kolotilkina K. V. ORCID ID 0009-0003-0896-9510

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Samara State Technical University", Samara, Russian Federation, e-mail: xeniakolotilkina@yandex.ru

An important scientific problem is the development of new methods for obtaining high-accuracy analytical solutions to complex boundary value problems in mathematical physics, characterized by their universality, implementation simplicity, and convenience for engineering applications. The objective of this study is to develop a method for obtaining a high-accuracy analytical solution for a non-stationary heat conduction problem pertaining to the ceramic wall of a liquid-metal methane pyrolysis reactor under asymmetric third-kind boundary conditions. The sought solution is expressed as the sum of two functions: a particular solution to the steady-state problem with non-homogeneous boundary conditions and a general solution to the non-stationary problem with homogeneous boundary conditions. To simplify the solution process for the non-stationary problem, additional boundary conditions satisfied at one of the boundary points of the domain are employed, leading to the satisfaction of the Sturm – Liouville equation throughout the entire domain without the need for integration over the spatial variable. The eigenvalues derived from the solution of the Sturm – Liouville boundary value problem are in close agreement with their exact values. A theorem is proved confirming that satisfaction of the equation at the boundary implies its satisfaction throughout the entire domain under consideration. The obtained solution was applied to calculate the temperature of the ceramic wall in a liquid-metal methane pyrolysis reactor. Analysis of the results reveals that during the initial heating phase of the reactor, the temperature differential across the wall reaches magnitudes that induce thermal stresses exceeding the ultimate strength limit of the material.

Keywords: pyrolysis, heat conduction, non-homogeneous third-kind boundary conditions, Sturm – Liouville problem, additional boundary conditions

Введение

Перспективным методом экологичного и экономичного получения водорода является пиролиз (термическое разложение без доступа кислорода) метана в жидкометаллических средах (олово, висмут и др.). При его практическом применении важной проблемой является появление в керамическом реакторе, содержащем жидкий металл, дефектов в виде трещин, нарушающих его герметичность. Трещинообразование связано с температурными напряжениями, возникающими вследствие больших градиентов температур в процессе пусков и остановов реактора. Для выяснения причин их появления необходимо выполнить исследование температурного состояния реактора в указанных процессах. Решению в данном случае подлежит задача теплопроводности при несимметричных граничных условиях третьего рода. Ее точное аналитическое решение имеет вид бесконечного ряда, собственные числа которого находятся из трансцендентных уравнений, решаемых лишь численно. Получаемое в этом случае решение исходной задачи затруднительно применять для инженерных приложений. В настоящей работе для решения таких задач используется приближенный аналитический метод, практически эквивалентный точному, основанный на использовании дополнительных граничных условий. Основной проблемой, ограничивающей использование приближенных методов (Л. В. Канторовича, Галеркина, интегрального метода и др.), является недостаточная точность решений из-за ограничения числа приближений по причине плохой обусловленности матриц систем алгебраических уравнений [1, с. 101–117; 2, с. 114–125; 3]. Подобные системы возникают при определении неизвестных коэффициентов аналитических решений, принимаемых в форме алгебраических или тригонометрических полиномов с целью выполнения уравнения и краевых условий задачи. Универсальность приближенных методов состоит в выполнении не исходного дифференциального уравнения, а его осредненного аналога – интеграла теплового баланса, в связи с чем эти методы могут быть применены к задачам, решения которых классическими точными аналитическими методами (Фурье, интегральных преобразований и др.) не могут быть получены [4, с. 125–132; 5; 6].

В ряде работ [3; 4, с. 125–132; 5] для повышения точности приближенных методов используются дополнительные граничные условия (ДГУ), оказывающие определяющее влияние на обусловленность матриц, что связано со следующими обстоятельствами. Дополнительные граничные условия приводят к выполнению уравнения в граничных точках [7–9]. В работах [4, с. 125–132; 5] (в результате доказательства теорем) утверждается, что выполнение уравнения на границах при большом числе ДГУ приводит к его выполнению и внутри области.

Используемые в указанных работах ДГУ выполняются при любом другом методе получения решения [10; 11], в том числе и в точных аналитических методах (в чем можно убедиться подстановкой соответствующих решений в ДГУ), однако в этих методах они не выделяются в качестве отдельного рассмотрения [12; 13]. Эффективность их использования, как будет показано ниже, связана с тем, что ДГУ представляются в виде производных высокого порядка от уравнения задачи Штурма – Лиувилля. Удовлетворение таких ДГУ в граничной точке $\xi = 0$ приводит к цепочным системам алгебраических линейных уравнений относительно неизвестных коэффициентов решений, в которых каждое уравнение содержит лишь одно неизвестное. Такие системы имеют сильно разреженные матрицы коэффициентов ленточного типа с минимальной шириной ленты, проблемы плохой обусловленности которых вообще не возникают. В отличие от [4, с. 125–132; 5], в настоящей работе доказательство теоремы связано с решением не исходного уравнения в частных производных, а уравнения краевой задачи Штурма – Лиувилля, дополнительные граничные условия для которого выполняются лишь в одной граничной точке $\xi = 0$.

Цель исследования – разработка метода получения высокоточного решения задачи теплопроводности для пластины с неоднородными условиями третьего рода путем использования ДГУ, приводящих к граничному выполнению уравнения, что обеспечивает его выполнение и внутри области, исключая интегрирование по пространственной координате.

Материалы и методы исследования

Найдем решение задачи теплопроводности для керамической стенки реактора пиролиза метана с несимметричными условиями третьего рода. Снаружи реактор омывается горячими газами печи – греющая среда, а внутри через слой расплавленного металла, находящего в начальном диапазоне времени в гранулированном состоянии, движется нагреваемый метан. Математическая постановка задачи:

$$\frac{\partial t(x,\tau)}{\partial \tau} = a\frac{\partial^2 t(x,\tau)}{\partial x^2};\ (\tau > 0;\ 0 < x < \delta); \quad (1)$$

$$t(x,0)=t_0; \quad (2)$$

$$\lambda\frac{\partial t(0,\tau)}{\partial x}-\alpha_1\left[t(0,\tau)-t_1\right]=0; \quad (3)$$

$$\lambda\frac{\partial t(\delta,\tau)}{\partial x}+\alpha_2\left[t(\delta,\tau)-t_2\right]=0, \quad (4)$$

где t, x, τ– температура, координата, время; t_0 – начальная температура; t_1 – температура горячих газов; t_2 – температура метана; α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи; λ – коэффициент теплопроводности; a – коэффициент температуропроводности; δ – толщина стенки реактора.

Обозначим:

$$T(\xi,\mathrm{Fo})=\frac{t(x,\tau)-t_0}{t_2-t_0}; \quad \xi=\frac{x}{\delta};$$

$$\mathrm{Fo}=\frac{a\tau}{\delta^2}; \quad \mathrm{Bi}_1=\frac{\alpha_1\delta}{\lambda}; \quad \mathrm{Bi}_2=\frac{\alpha_2\delta}{\lambda},$$

где T, ξ, Fo – безразмерные температура, координата, время; Bi_1, Bi_2 – числа Био.

В безразмерном виде задача будет

$$\frac{\partial T(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}}=\frac{\partial^2 T(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial \xi^2}; \ (\mathrm{Fo}>0;\ 0<\xi<1); \quad (5)$$

$$T(\xi,0)=0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial T(0,\mathrm{Fo})}{\partial \xi}-\mathrm{Bi}_1\left[T(0,\mathrm{Fo})+D\right]=0; \quad (7)$$

$$\frac{\partial T(1,\mathrm{Fo})}{\partial \xi}+\mathrm{Bi}_2\left[T(1,\mathrm{Fo})-1\right]=0, \quad (8)$$

где $D=(t_0-t_1)/(t_2-t_0)$.

Будем искать решение задачи (5)–(8) в виде

$$T(\xi,\mathrm{Fo})=T_c(\xi)+\Theta(\xi,\mathrm{Fo}), \quad (9)$$

где $T_c(\xi)$ – решение стационарной задачи с неоднородными условиями (7), (8), $\Theta(\xi,\mathrm{Fo})$ – решение нестационарной задачи с соответствующими однородными условиями.

Математическая постановка стационарной задачи

$$\frac{\partial^2 T_c(\xi)}{\partial \xi^2}=0; \ (0<\xi<1); \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_c(0)}{\partial \xi}-\mathrm{Bi}_1\left[T_c(0)+D\right]=0; \quad (11)$$

$$\frac{\partial T_c(1)}{\partial \xi}-\mathrm{Bi}_2\left[T_c(1)-1\right]=0. \quad (12)$$

Решение задачи (10)–(12) представим в виде

$$T_c(\xi)=F_1+F_2\xi, \quad (13)$$

где F_1, F_2 – постоянные, определяемые из условий (11), (12) и имеющие вид (при $T_1=T_0$)

$$F_1=\mathrm{Bi}_2/(\mathrm{Bi}_1+\mathrm{Bi}_2+\mathrm{Bi}_1\mathrm{Bi}_2),$$

$$F_2=F_1\mathrm{Bi}_1. \quad (14)$$

Аналитическое решение стационарной задачи (10)–(12), удовлетворяющее уравнению (10) и условиям (11), (12), принимает вид

$$T_c(\xi)=\frac{\mathrm{Bi}_2}{\mathrm{Bi}_1+\mathrm{Bi}_2+\mathrm{Bi}_1\mathrm{Bi}_2}(1+\mathrm{Bi}_1\xi). \quad (15)$$

Математическая постановка нестационарной задачи

$$\frac{\partial\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}}=\frac{\partial^2\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\xi^2}; \ (\mathrm{Fo}>0;\ 0<\xi<1); \quad (16)$$

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo})=T(\xi,0)-T_c(\xi)=-T_c(\xi); \quad (17)$$

$$\frac{\partial\Theta(0,\mathrm{Fo})}{\partial\xi}-\mathrm{Bi}_1\Theta(0,\mathrm{Fo})=0; \quad (18)$$

$$\frac{\partial\Theta(1,\mathrm{Fo})}{\partial\xi}-\mathrm{Bi}_2\Theta(1,\mathrm{Fo})=0. \quad (19)$$

Решение задачи (16)–(19) примем в виде

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo})=\phi(\mathrm{Fo})\psi(\xi), \quad (20)$$

где функции $\phi(\mathrm{Fo})$ и $\psi(\xi)$ находятся из решения следующих обыкновенных дифференциальных уравнений, получаемых после подстановки (20) в (16)

$$\frac{d\phi(\mathrm{Fo})}{d\mathrm{Fo}}+\mu\phi(\mathrm{Fo})=0; \quad (21)$$

$$\frac{d^2\psi(\xi)}{d\xi^2}+\mu\psi(\xi)=0, \quad (22)$$

где μ – постоянная.

Интегрируя уравнение (21), находим

$$\phi(\mathrm{Fo})=A\exp(-\mu\mathrm{Fo}), \quad (23)$$

где A – постоянная интегрирования.

Граничные условия для функции $\psi(\xi)$ находим путем подстановки (20) в (18), (19)

$$\frac{d\psi(0)}{d\xi}-\mathrm{Bi}_1\psi(0)=0; \quad (24)$$

$$\frac{d\psi(1)}{d\xi}-\mathrm{Bi}_2\psi(1)=0. \quad (25)$$

Соотношения (22), (24), (25) представляют краевую задачу Штурма – Лиувилля. Ее решение принимается в виде

$$\psi(\xi) = \sum_{k=0}^{n} b_k(\mu)\xi^k , \qquad (26)$$

где $b_k(\mu)$ – неизвестные коэффициенты.

Для определения постоянных $b_k(\mu)$, $(\overline{k = 0,n})$ используются основные (24), (25) и ДГУ, определяемые путем выполнения искомым решением (26) уравнения (22) и соотношений, полученных после определения производных от него различного порядка, в точке $\xi = 0$. Любое число таких условий можно представить в виде

$$\frac{d^2\psi(0)}{d\xi^2} + \mu\psi(0) = 0;$$

$$\frac{d^3\psi(0)}{d\xi^3} + \mu\frac{d\psi(0)}{d\xi} = 0;$$

$$\frac{d^4\psi(0)}{d\xi^4} + \mu\frac{d^2\psi(0)}{d\xi^2} = 0;$$

$$\ldots\ldots . \qquad (27)$$

Подставляя (26) (например, при $n = 48$), в граничное условие (24) и в 48 дополнительных граничных условий вида (27), для нахождения $b_k(\mu)$, ($k = 0,1,2,\ldots,48$) получаем систему 49 алгебраических линейных уравнений вида

$$\left.\begin{aligned} & b_1 - \mathrm{Bi}_1 b_0 = 0; \\ & 2b_2 + \mu b_0 = 0; \\ & 6b_3 - \mu b_1 = 0; \\ & 12b_4 + \mu b_2 = 0; \\ & 20b_5 + \mu b_3 = 0; \\ & 30b_6 + \mu b_4 = 0; \\ & 42b_7 + \mu b_5 = 0; \\ & \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \end{aligned}\right\} \qquad (28)$$

Анализ системы уравнений (28) позволяет заключить, что она имеет цепочный вид с сильно разреженной матрицей коэффициентов ленточного типа. Цепочность системы состоит в том, что неизвестные $b_0, b_1, b_2, b_3, \ldots, b_{48}$ находятся из последовательного решения одного алгебраического уравнения с одним неизвестным. Положив в (28) $b_0 = 1$, получаем следующие формулы для определения $b_k(\mu)$, ($k = 0,1,2,\ldots,48$):

$$b_0 = 1; b_1 = \mathrm{Bi}_1;\ b_2 = -\mu/2;\ b_3 = -\mu\mathrm{Bi}_1/6;$$

$$b_4 = \mu^2/24;\ b_5 = \mu^2\mathrm{Bi}_1/120;$$

$$b_6 = -\mu^3/720;\ b_7 = -\mu^3\mathrm{Bi}_1/5040;$$

$$b_8 = \mu^4/40320;\ \ldots\ldots . \qquad (29)$$

При известных $b_k(\mu)$, ($k = 0,1,2,\ldots,48$) собственные функции находятся из соотношения (26), принимающего вид

$$\psi(\mu,\xi) = 1 + \sum_{k=1}^{48} b_k(\mu)\xi^k . \qquad (30)$$

Соотношение (30) удовлетворяет граничному условию (24), уравнению (22) и 46 соотношениям, полученным после нахождения производных от него, в точке $\xi = 0$. Однако оно не удовлетворяет граничному условию (25). Подставляя (30) в (25) (положив $\mathrm{Bi}_1 = 3$; $\mathrm{Bi}_2 = 2$), относительно μ получаем алгебраический полином 24-й степени. Из 24 корней полинома 6 корней выражаются действительными числами и 16 корней являются самосопряженными комплексными. Действительные корни полинома следующие:

$$\mu_1 = 3,4043;\ \mu_2 = 17,684;\ \mu_3 = 48,569;$$

$$\mu_4 = 98,357;\ \mu_5 = 167,63;$$

$$\mu_6 = 256,24;\ \mu_7 = 493,85 . \qquad (31)$$

Точные значения первых шести собственных чисел имеют вид [14, с. 40–70]:

$$\mu_1 = 3,4040;\ \mu_2 = 17,682;$$

$$\mu_3 = 48,567;\ \mu_4 = 98,346;$$

$$\mu_5 = 167,65;\ \mu_6 = 256,544 .$$

Учитывая, что уравнение Штурма – Лиувилля выполняется лишь при дискретных значениях μ_k (собственных значениях), комплексные корни, как не имеющие физического смысла, не используются. Отмечается высокая точность определения собственных чисел, отличающихся от точных их значений лишь в первом – четвертом знаке после запятой.

Для сравнения рассмотрим еще один метод определения собственных чисел, известный как метод неопределенных коэффициентов. Подставляя (26) в (22), (24) и группируя слагаемые при одинаковых степенях ξ, получаем алгебраические уравнения относительно $b_k(\mu)$, ($k = 0,1,2,\ldots,48$). Определяемые из их решения коэффициенты b_k полностью совпадают с соотношениями (29). Собственные числа, как и выше, находятся из условия (25), и они полностью совпадают с их значениями вида (31). Следовательно, два рассмотренных метода определения собственных чисел эквивалентны.

Следует, однако, отметить, что первый метод является более простым и универсальным ввиду того, что уравнение краевой задачи Штурма – Лиувилля и соотношения для производных от него различного порядка выполняются лишь в одной граничной точке $\xi = 0$. В связи с этим он может быть применен к решению задач с переменными физическими свойствами, с источниками теплоты и др., для которых применение второго метода затруднительно.

Докажем следующую **теорему**: *если неизвестные функции b_k соотношения (26) находить из выполнения уравнения (22) и соотношений, полученных после взятия производных от него, в граничной точке $\xi = 0$, то при большом числе приближений это уравнение будет выполняться во всей области изменения переменной* $0 \le \xi \le 1$.

Для **доказательства** теоремы потребуем, чтобы решение (26) удовлетворяло уравнению (22) и соотношениям, полученным после взятия k-х производных от него, в точке $\xi = 0$, то есть

$$\frac{d^k}{d\xi^k}\left(\frac{d^2\Psi}{d\xi^2}+\mu\Psi\right)_{\xi=0}=0,\ (k=0,1,2,3,\ldots). \quad (32)$$

При $k = 0$ соотношение (33) приводится к уравнению (22). При $k = 1,2,3,\ldots$ оно представляет соотношения для производных различного порядка от уравнения (22). Подставляя (26) в (32), положив $\xi = 0$, для каждого k имеем следующие алгебраические уравнения для коэффициентов b_k, $(k=\overline{0,n})$.

$$\mu + 2b_2 = 0;\ \mu b_1 + 6b_3 = 0;$$

$$\mu b_2 + 12b_4 = 0;\ \mu b_3 + 20b_5 = 0;\ \ldots. \quad (33)$$

Умножая (33) последовательно на ξ^k, $(k=\overline{0,n})$ и суммируя полученные соотношения, находим

$$2b_2 + 6b_3\xi + 12b_4\xi^2 + 20b_5\xi^3 + \ldots + \mu(b_0 + b_1\xi + b_2\xi^2 + b_3\xi^3 + \ldots) = 0. \quad (34)$$

Подставляя (26) в (22) (без привязки к конкретному значению ξ), получаем соотношение, полностью совпадающее с (34) и, следовательно, сформулированная выше теорема доказана. Отметим, что, в отличие от работы [3], здесь не требуется выполнения интеграла теплового баланса – осредненного по координате ξ уравнения (22).

Подставляя (23), (30) в (20), получаем

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo}) = \sum_{n=1}^{8}\left[A_n \exp(-\mu_n \mathrm{Fo})\left(1+\sum_{k=1}^{48} b_k(\mu)\xi^k\right)\right]. \quad (35)$$

Для определения постоянных A_n составим невязку начального условия (17) и потребуем выполнения ее ортогональности к каждой собственной функции $\psi_i(\xi)$, $(i = n = 1, 2, 3, \ldots, 8)$

$$\int_0^1 \sum_{n=1}^{8}\left[A_n\left(1+\sum_{k=1}^{48} b_k(\mu)\xi^k\right)+T_c(\xi)\right]\psi_i(\xi)d\xi = 0. \quad (36)$$

Соотношение (36) представляет систему восьми алгебраических линейных уравнений, относительно такого же количества неизвестных постоянных A_n.

Подставляя (15), (35) в (9), получаем решение задачи (5)–(8)

$$T(\xi,\mathrm{Fo}) = \frac{\mathrm{Bi}_2(1+\mathrm{Bi}_1\xi)}{\mathrm{Bi}_1+\mathrm{Bi}_2+\mathrm{Bi}_1\mathrm{Bi}_2} + \sum_{n=1}^{8}\left[A_n e^{-\mu\,\mathrm{Fo}}\left(1+\sum_{k=1}^{48} b_k(\mu)\xi^k\right)\right]. \quad (37)$$

Значения безразмерных температур, найденных по формуле (37), в сравнении с точным решением [14, с. 40–70] даны на рисунке. Видно, что для $\mathrm{Fo} \ge 0{,}0001$ они практически одинаковы.

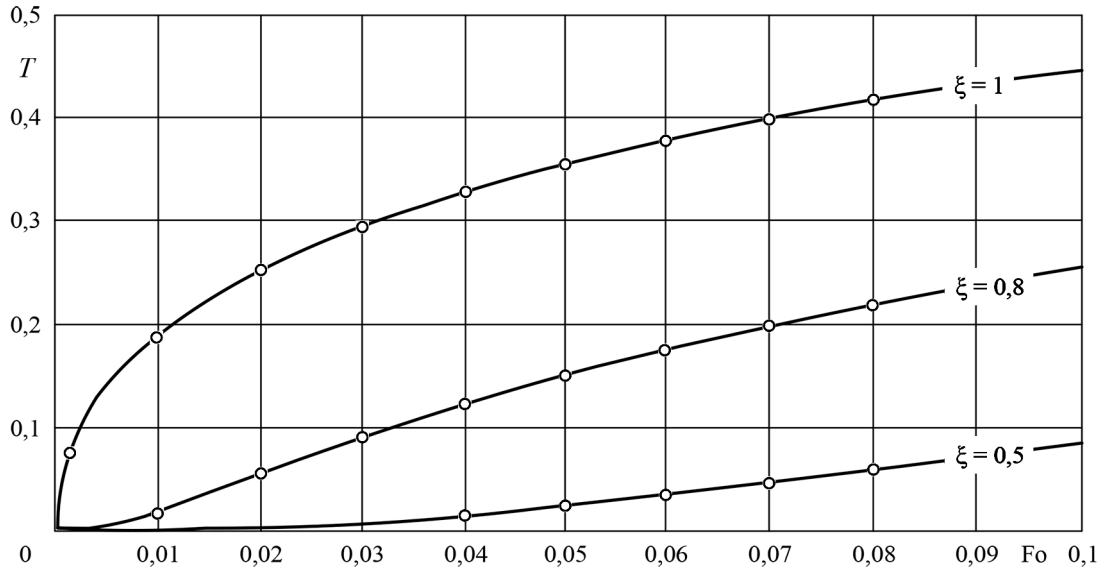
Таким образом, в статье применен метод разделения переменных (метод Фурье). Получаемая при этом краевая задача Штурма – Лиувилля решается методом, предложенным авторами статьи. В ходе его реализации возникает необходимость решения систем алгебраических линейных уравнений и степенного алгебраического полинома. Их решение выполняется с использованием стандартных программных пакетов системы компьютерной алгебры MathCAD 15.0. Отсутствие в работе экспериментальных данных объясняется тем, что достоверность полученных в статье результатов подтверждена сравнением с известным точным аналитическим решением [14, с. 40–70].

Выполним исследование полученного решения для реальной конструкции керамической стенки реактора пиролиза метана при следующих исходных данных:

$t_0 = 20°\mathrm{C}$; $t_1 = 20°\mathrm{C}$; $t_2 = 1000°\mathrm{C}$;

$\delta = 0{,}05$ м; $\lambda = 1$Вт/(м·К); $a = 1{,}5\cdot10^{-6}$ м^2/с;

$\alpha_1 = 60$Вт/(м^2·К); $\alpha_2 = 40$Вт/(м^2·К).



Распределение температуры: ▬▬ – точное решение [14]; ○ – по формуле (37); Bi_1 = 3; Bi_2 = 2
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Будем рассматривать процесс теплообмена до момента времени, когда метан остается при начальной температуре, то есть прогревается только стенка.

Из анализа графиков рисунка следует, что максимальный перепад температуры на прогретой части стенки в диапазоне $0{,}5 \le \xi \le 1$ при Fo = 0,03 (τ = 50 сек) составляет $\Delta\Theta$ = 0,28 (Δt = 294°C).

Оценка температурных напряжений растяжения, найденных по приближенной формуле для тонкой стенки [15, с. 23–54]

$$\sigma = \frac{\beta E \Delta t}{1 - \nu}, \qquad (38)$$

приводит к величине σ = 78,4 кг/мм^2, что значительно превышает предел прочности для данного материала. В формуле (38) обозначено: β = 0,00001/К – коэффициент линейного расширения; E = 20000 кг/мм^2 – модуль упругости; ν = 0,25 – коэффициент Пуассона.

Кроме того, на участке времени $0 \le Fo \le 0{,}01$ отмечается высокий темп прогрева, когда температура стенки при ξ = 1 возрастает от 20°C до 176,4°C за время Δt = 37,5 сек. Столь быстрый прогрев приводит к большим значениям динамических температурных напряжений, которые также могут быть причиной появления дефектов в керамической стенке реактора пиролиза метана.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ результатов приводит к заключению, что ДГУ являются эффективным средством получения аналитического решения задачи теплопроводности для пластины с несимметричными условиями третьего рода. С целью теоретического обоснования полученных расчетным путем результатов приведено доказательство теоремы, по которой граничное выполнение уравнения эквивалентно его выполнению внутри рассматриваемой области. Анализируя полученные результаты, можно заключить, что научной новизной статьи является разработка методики получения высокоточного аналитического решения третьей краевой задачи, отличающееся от известных тем, что благодаря применению дополнительных граничных условий, выполняемых лишь в одной граничной точке (центре симметрии пластины), дифференциальное уравнение краевой задачи Штурма – Лиувилля выполняется во всей области определения пространственной переменной ($0 \le \xi \le 1$), исключая необходимость его непосредственного интегрирования.

Выводы

1. Исследования полученного решения применительно к определению температурного состояния керамической стенки реактора пиролиза метана показали, что в диапазоне начального времени температурный перепад на стенке приводит к термическим напряжениям растяжения, превышающим предел прочности для данного материала. В этом же диапазоне времени отмечается высокий темп прогрева стенки (176°C за время Δt = 37,5 сек), что может приводить к динамическим напряжениям, также пре-

вышающим предел прочности для данного материала. Для предотвращения трещинообразования в стенке реактора пиролиза метана необходимо уменьшать интенсивность подвода теплоты от греющего агента за счет постепенного повышения температуры горячих газов.

2. Данный метод может быть применен к задачам теплопроводности для цилиндра и шара, задачам с переменными физическими свойствами среды и др. Получаемые таким путем решения для цилиндрических и сферических координат не содержат функции Бесселя.

Список литературы

1. Формалев В. Ф. Теплопроводность анизотропных тел. Аналитические методы решения задач. М.: Физматлит, 2014. 309 с. [Электронный ресурс]. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01007869209 (дата обращения: 24.04.2026). ISBN 978-5-9221-1579-7.

2. Формалев В. Ф. Теплоперенос в анизотропных твердых телах. Численные методы, тепловые волны, обратные задачи. М.: Физматлит, 2015. 280 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.rfbr.ru/library/books/2171/ (дата обращения: 24.04.2026). ISBN 978-5-9221-1624-4.

3. Кудинов В. А., Стефанюк Е. В., Назаренко С. А. Метод координатных функций в несимметричных задачах теплопроводности для многослойных конструкций // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки». 2003. Вып. 19. С. 12–15. URL: https://www.mathnet.ru/links/40aacc00a0c0709394988fd985edc306/vsgtu132.pdf (дата обращения: 02.03.2026). DOI: 10.14498/vsgtu132.

4. Федоров Ф. М. Граничный метод решения прикладных задач математической физики. Новосибирск: Наука, 2000. 220 с. [Электронный ресурс]. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01000670276 (дата обращения: 25.02.2026). ISBN 5-02-031622-9.

5. Кудинов И. В., Котова Е. В., Кудинов В. А. Метод получения аналитических решений краевых задач на основе определения дополнительных граничных условий и дополнительных искомых функций // Сибирский журнал вычислительной математики. Новосибирск. 2019. Т. 22. № 2. С. 153–165. URL: https://www.mathnet.ru/rus/sjvm/v22/i2/p153 (дата обращения: 25.02.2026). DOI: 10.15372/SJNM20190203.

6. Pashchenko D., Eremin A. Heat flow inside a catalyst particle for steam methane reforming: CFD-modeling and analytical solution // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. T. 165. C. 120617. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931020335535 (дата обращения: 28.02.2026). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120617.

7. Карташов Э. М. Оригиналы операционных изображений для обобщенных задач нестационарной теплопроводности // Тонкие химические технологии. 2019. Т. 14. № 4. С. 77–86. URL: https://www.finechem-mirea.ru/jour/article/viewFile/1287/1329.pdf (дата обращения: 24.04.2026).

8. Трубицын К. В. Метод дополнительных граничных условий в краевых задачах теплопроводности. Математическое моделирование и численные методы. 2025. № 2. С. 68–81. URL: https://mmcm.bmstu.ru/articles/375/ (дата обращения: 03.03.2026). DOI: 10.18698/2309-3684-2025-2-6881.

9. Eremin A. V., Krasnova N. P. One Method of Heat Transfer Process Mathematical Modeling in Solids // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE, 2019. P. 1–5. URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8933826 (дата обращения: 03.03.2026). DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8933826.

10. Sobolev S. L. Discrete space-time model for heat conduction: Application to size-dependent thermal conductivity in nano-films // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. T. 108. C. 933–939. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931016334573 (дата обращения: 28.02.2026). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.051.

11. Sobolev S. L. On hyperbolic heat-mass transfer equation // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. T. 122. C. 629–630. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931017353759 (дата обращения: 28.02.2026). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.022.

12. Карелин В. А., Саломатов В. В. Построение приближенных аналитических решений для модели переноса тепла в слое льда при СВЧ-облучении // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30. № 6. С. 1189–1196. URL: https://www.sibran.ru/upload/iblock/a7f/a7fb33b6c59497a68ac8155fd2878d04.pdf (дата обращения: 25.02.2026).

13. Полянин А. Д., Сорокин В. Г., Вязьмин А. В. Точные решения и качественные особенности нелинейных гиперболических реакционно-диффузионных уравнений с запаздыванием // Теоретические основы химической технологии. 2015. Т. 49. № 5. С. 527–541. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=24045239 (дата обращения: 26.04.2026).

14. Григорьев Л. Я., Маньковский О. Н. Инженерные задачи нестационарного теплообмена. Л.: Энергия, 1968. 84 с. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01006095176 (дата обращения: 25.02.2026).

15. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1979. 560 с. [Электронный ресурс]. URL: https://books.totalarch.com/theory_of_elasticity_tymoshenko (дата обращения: 25.02.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSSE-2026-0003) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета.

Financing: The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FSSE-2026-0003) as part of the state task of the Samara State Technical University.

УДК 65.014:65.07:65.012.122
DOI 10.17513/snt.40825

CC BY 4.0

МЕТОД ПОДГОТОВКИ ПАТЕНТНОГО ЛАНДШАФТА В НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

[1, 2]Королев М. К. ORCID ID 0000-0001-8102-9830

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет», Новокузнецк, Российская Федерация;
[2]Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии» Сибирского отделения Российской академии наук, Кемерово, Российская Федерация, e-mail: m.korolev.gm@gmail.com

Патентная аналитика является инструментом, который способен дать ответы на вопросы о конкурентоспособности применяемых в организационной системе технологий, конкурентной среде, тенденциях развития технологической области, а также выявить наиболее значимые и перспективные для науки и рынка технические решения. Современным продуктом патентной аналитики является патентный ландшафт. При его подготовке научно-исследовательские организационные системы обладают конкурентным преимуществом за счет наличия в штате экспертов-технологов, которых можно привлечь к анализу технической составляющей патентных документов. Цель данного исследования – разработка метода подготовки патентного ландшафта в научно-исследовательской организации. В статье представлена структура научно-исследовательской организации, в которую интегрирован отдел, специализирующийся на патентной аналитике. Существующие подходы к подготовке патентных ландшафтов систематизированы и дополнены этапом экспертного анализа. Процесс подготовки патентного ландшафта формализирован с применением методологии idef0 и математического моделирования. Дополненный метод также представлен в виде графа технологического процесса, вершинами которого являются этапы процесса подготовки патентного ландшафта, а ребрами – связи между этапами. Этот граф дополнен информацией о время- и трудозатратах на их реализацию, а также подходом к расчету себестоимости готового аналитического продукта. На основе этого метода была сформулирована оптимизационная задача, предназначенная для снижения себестоимости патентного ландшафта за счет выбора оптимального числа привлекаемых патентных аналитиков. Все предлагаемые автором дополнения в совокупности позволяют создавать конкурентоспособный аналитический продукт на базе научно-исследовательских организаций.

Ключевые слова: патентная аналитика, патентный ландшафт, алгоритм, оптимизация, организационная система, принятие управленческих решений

METHOD FOR PATENT LANDSCAPE PREPARATION IN A RESEARCH ORGANIZATION

[1, 2]Korolev M. K. ORCID ID 0000-0001-8102-9830

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State Industrial University", Novokuznetsk, Russian Federation;
[2]Federal State Budget Scientific Institution "The Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry" of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: m.korolev.gm@gmail.com

Patent analytics is a tool that can provide answers to questions about competitiveness of technologies used in an organizational system, competitive environment, and development trends in the technological scope, as well as identify the most significant and promising technologies for science and economics. Patent Landscape is a modern product of patent analytics. Research organizational systems have a competitive advantage at patent landscape preparation due to presence of technological experts on staff who can be involved in the analysis of the technical components of patent documents. The objective of this study is to develop a method for preparing a patent landscape in a research organization. This article presents the structure of a research organization with an integrated department specializing in patent analytics. Existing approaches to preparing patent landscapes are systematized and supplemented by an expert analysis stage. The process of preparing a patent landscape is formalized using the idef0 methodology and mathematical modeling. The expanded method is also presented as a process flow graph, the nodes of which represent the stages of patent landscape preparation, and the edges represent the connections between these stages. This graph is supplemented with information on the time and labor costs involved in their implementation, as well as an approach to calculating the cost of the finished analytical product. Based on this method, an optimization problem was formulated aimed at reducing the cost of patent landscape development by selecting the optimal number of patent analysts. All of the additions proposed by the author, taken together, enable the creation of a competitive analytical product based on research organizations.

Keywords: patent analytics, patent landscape, algorithm, optimization, organization, management decision-making

Введение

Современное развитие различных отраслей промышленности характеризуется высокой скоростью модернизации, происходящей прежде всего за счет внедрения новых технологий. Процесс технологической трансформации в организационных системах является не случайным, а основанным на результатах анализа конкурентной среды и технологических трендов [1, с. 108; 2].

Патентная аналитика является инструментом, который способен дать ответы на вопросы о конкурентоспособности применяемых в организационной системе технологий, конкурентной среде, тенденциях развития технологической области, а также выявить наиболее значимые и перспективные для науки и рынка технические решения [3–5]. В последнее десятилетие для анализа больших объемов патентных данных применяются подходы патентного ландшафта (ПЛ), являющегося информационно-аналитическим продуктом, отображающим характерные черты исследуемого технологического направления и создаваемым посредством анализа статистических и технических данных, получаемых из патентных документов, который отличается комбинированием применяемых методов анализа и анализируемых компонент патентных данных, сопровождаемых визуализированными аналитическими представлениями, а также тем, что патентное семейство принимается в качестве основного и неделимого носителя патентных данных при проведении аналитики.

Существуют разные подходы к подготовке патентных ландшафтов, одни из которых представляют собой поверхностный обзор статистических данных, получаемых из патентных документов, например аналитика, генерируемая патентной поисковой системой Google Patents [6]. Другие предусматривают более глубокую обработку массива статистических данных с применением более сложных методов анализа и более эффективных методов визуализации аналитических представлений [7; 8; 9, с. 55–76]. Так, в первой в полноценно сформированных рекомендациях по подготовке патентных ландшафтов было предложено использование множества методов, предполагающих разносторонний анализ патентной информации [10, с. 44–104]. В России патентный ландшафт принимается в качестве одного из видов отчетов о патентных исследованиях, регламентируемых ГОСТ Р 15.011-2024 [11, с. 4].

При этом все эти подходы ограничиваются анализом преимущественно библиографических патентных данных, игнорируя суть технических решений, стоящих за номерами патентных документов. Это связано с необходимостью привлечения внешних экспертов, имеющих компетенции в соответствующих областях наук, а также высокими трудозатратами на ручной анализ текстов большого числа патентных документов, что существенно повышает себестоимость готового аналитического продукта. В этих условиях научно-исследовательские организационные системы обладают конкурентным преимуществом, так как в их штате уже есть компетентные эксперты-технологи, которые могут быть привлечены к анализу текстов патентных документов в рамках исполнения их должностных обязанностей.

Цель исследования – разработка метода подготовки патентного ландшафта в научно-исследовательской организации, состоящего из: 1) рекомендаций по интеграции в структуру научно-исследовательской организации подразделения, специализирующегося на проведении патентной аналитики; 2) алгоритма подготовки патентного ландшафта, дополненного блоком экспертного анализа; 3) методом оптимизации затрат на подготовку патентного ландшафта.

Материал и методы исследования

При разработке модели научно-исследовательской организации использована иерархическая модель данных. При разработке модели процесса подготовки патентного ландшафта применена методология функционального моделирования и графическая нотация idef0. При разработке метода оптимизации затрат на процесс подготовки патентного ландшафта была применена теория графов, а также метод математического моделирования.

Результаты исследования и их обсуждение

Подготовка патентного ландшафта в научно-исследовательской организационной системе осуществляется с привлечением множества специалистов, обладающих необходимыми компетенциями в сфере патентной аналитики или исследуемой области техники. По Д. А. Новикову, организационной системой является объединение людей, совместно реализующих некоторую программу или цель и действующих на основе определенных процедур и правил. В рамках его подхода организационная система отличается от коллектива наличием процедур и правил, регламентирующих совместную деятельность членов организации (механизма функционирования) [12, с. 4–5; 13, с. 24–25].

На основе этого подхода автором сформулировано следующее понятие организационной системы, осуществляющей подготовку патентного ландшафта: «объединение квалифицированных специалистов (патентных аналитиков и экспертов-технологов), совместно вовлеченных в процесс подготовки патентного ландшафта и действующих на основе метода его подготовки».

Структура научно-исследовательской организации в общем виде состоит из следующих блоков:

− управленческий блок, состоящий из дирекции и ученого совета;

− административный блок, состоящий из юридического и планового отделов, а также бухгалтерии;

− блок НИОКР, состоящий из множеств лабораторий и кафедр;

− блок вспомогательных подразделений, состоящий из отдела комплексной безопасности, отдела по охране труда, административно-хозяйственного отдела и отдела информационных технологий.

В рамках предлагаемого метода автором предлагается выделение дополнительного блока – интеллектуальной собственности, состоящего из отдела управления интеллектуальной собственностью (который зачастую входит в отдел комплексной безопасности) и отдела патентной аналитики. Выделение этих двух отделов осуществляется на основе специфики сферы их деятельности – интеллектуальной собственности. Специалисты, осуществляющие работу по обеспечению правовой охраны результатов интеллектуальной деятельности организационной системы, должны обладать навыками поиска релевантных патентных документов и обработки массивов статистических данных, что позволяет привлекать их к патентной аналитике. Итоговый вид предлагаемой организационной структуры представлен на рис. 1. По типу управления данную организационную структуру можно отнести к линейному виду, который является универсальным и наиболее эффективным из всех выделяемых [12, с. 377].

Предлагаемый к интеграции в организационную систему отдел патентной аналитики состоит из руководителя отдела (b) и множества подчиненных ему патентных аналитиков ($N^a = \{a_k\}$, где a_k – k-й патентный аналитик).

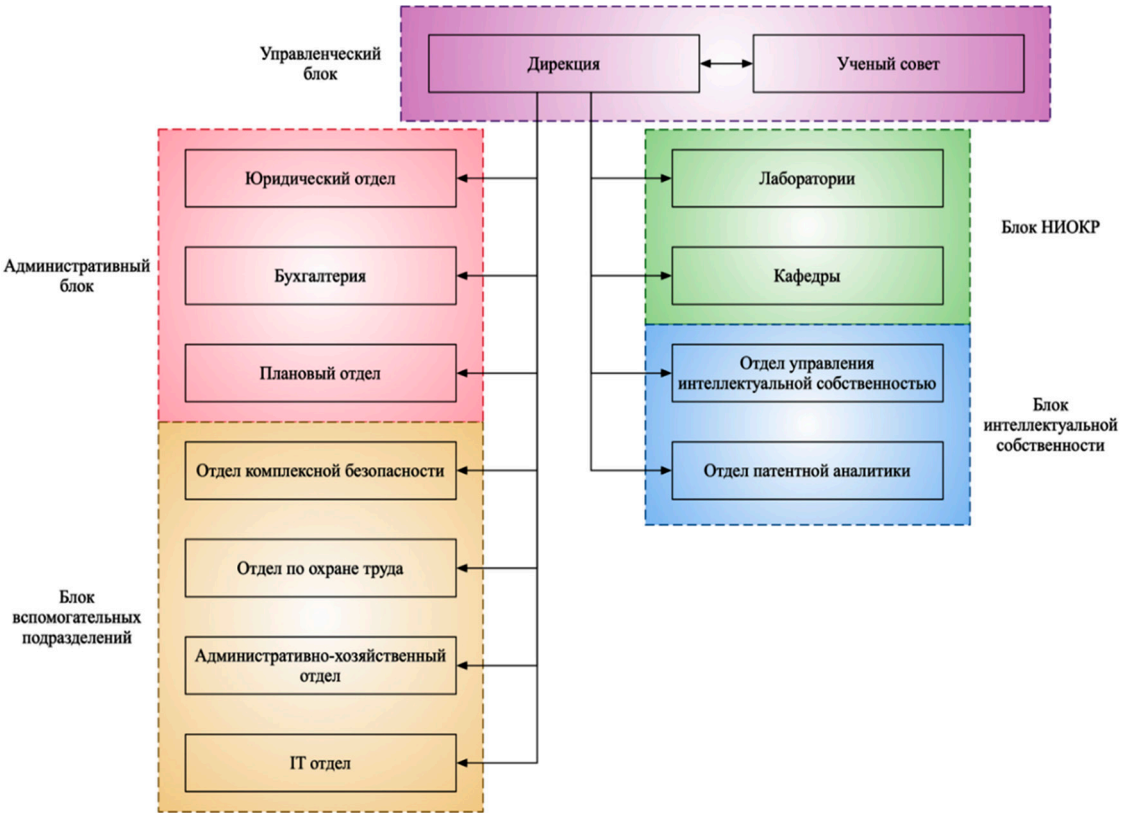


Рис. 1. Организационная структура научно-исследовательской организации
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Для реализации этапа экспертного анализа предлагается привлечение множества экспертов ($N^e = \{e_k | K(e_k)\}$, где e_k – k-й эксперт) из лабораторий и/или кафедр, обладающих компетенциями в области техники, релевантной предметной области исследования (K).

На рис. 2 представлена модель процесса подготовки патентного ландшафта, состоящая из шести основных этапов.

1. Формализация технического задания (x_1), в результате которой обращение заказчика интерпретируется и формализуется в виде технического задания (r^c), с учетом и на основе которого будет осуществляться вся дальнейшая подготовка патентного ландшафта.

2. Формирование поисковой стратегии (x_2), в результате которой определяется и систематизируется комплекс компонентов, необходимый для эффективного проведения поиска патентной информации из массива патентных данных (D). Поисковая стратегия обозначена как первая компонента патентного ландшафта (Y_1^{PL}).

3. Формирование патентной коллекции (x_3), в результате которого из массива патентных данных D отбирается множество патентных семейств, соответствующих комплексу критериев (K) (то есть релевантных предметной области исследования), обозначенных в техническом задании (r^c), которое образует патентную коллекцию (C^K). Патентная коллекция является локальной базой патентных данных, сформированной в результате отбора множества патентных семейств из массива патентных данных по индивидуальному комплексу критериев для подготовки патентного ландшафта. Ее можно формализировать в следующем виде:

$$C^K = \left\{F_l | K\left(F_l\right), F_l \in D\right\}_{l \in \mathbb{N}^*}, \qquad (1)$$

где F_l – l-е патентное семейство.

4. Формальный анализ статистических данных (x_4), представляющий совокупность методов, применяемых к различным компонентам патентной информации (к массиву статистических данных), позволяющих получить результаты (Y_2^{PL}) в виде полезных для заказчика умозаключений, сопровождаемых визуализированными аналитическими представлениями.

5. Экспертный анализ технической информации (x_5), представляющий собой совокупность методов получения экспертного мнения о патентных семействах, вошедших в патентную коллекцию (C^K), критериев их оценки, а также методов интерпретации и обработки результатов экспертной оценки, что позволяет получить полезные для заказчика результаты экспертного анализа (Y_3^{PL}). Проведение экспертного анализа осуществляется по методике, описанной в работе автора [14]. Экспертный анализ осуществляется по следующему алгоритму:

– на основе опроса экспертов осуществляется отбор критериев оценки ($K_i^e, i = \overline{1,n}$) и диапазон оценок ($v \in \{0, m\}, v \in \mathbb{N}$);

– на основе опроса экспертов с применением метода шкалирования и метода анализа иерархий (метод Саати) осуществляется определение долей значимости критериев оценки ($w_i \in K_i^e$, при $\Sigma w_i = 1$);

– каждым экспертом (e_k) оценивается каждое патентное семейство ($F_l \in C^K$), на основе чего формируются промежуточные результаты оценки ($V_l^k = \{v_{i,k}^l\}$);

– осуществляется расчет итоговой оценки для каждого патентного семейства (V_l) по формуле

$$V_l = \frac{\sum_k \sum_i w_i v_{i,k}^l}{\left|N^e\right|}, \qquad (2)$$

где $|N^e|$ – количество экспертов, привлеченных к оценке, выраженное через мощность их множества.

Патентные семейства могут быть проранжированы по результатам оценки, что позволяет выявить наиболее перспективные технические решения.

6. Формирование отчета о патентном ландшафте (x_6) – завершающий этап процесса подготовки патентного ландшафта, включающий в себя подготовку и оформление дополнительной информации о патентном ландшафте (Y_6^{PL}), выбор наиболее актуальных и информативных результатов формального (Y_2^{PL}) и экспертного (Y_3^{PL}) анализа, а также их укладки в отчет о патентном ландшафте, который является завершенным аналитическим продуктом.

В соответствии с методологией функционального моделирования и графической нотации idef0 процессы обозначены прямоугольниками. Стрелками, входящими в них слева, обозначаются входящие ресурсы. Стрелками, выходящими из них справа, обозначается результат реализации процесса. Стрелками, входящими в них сверху, обозначается управляющее воздействие. Стрелками, входящими в них снизу, обозначаются участники процесса и средства его реализации. Таким образом, патентный ландшафт (PL^K) можно формализировать в следующем виде:

$$PL^K = Y_1^{PL}, Y_2^{PL}, Y_3^{PL}, Y_4^{PL}. \qquad (3)$$

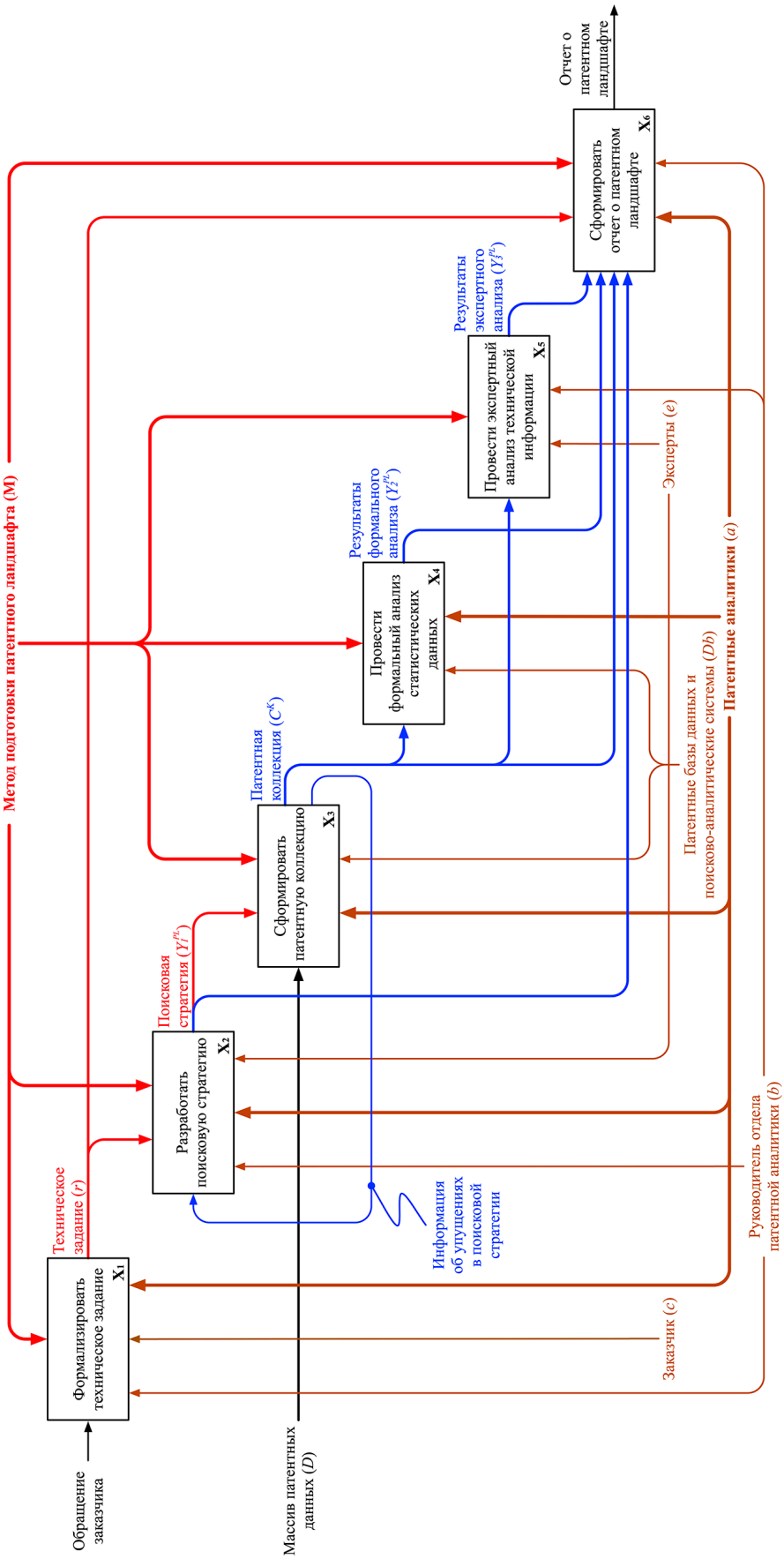


Рис. 2. Модель процесса подготовки патентного ландшафта
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

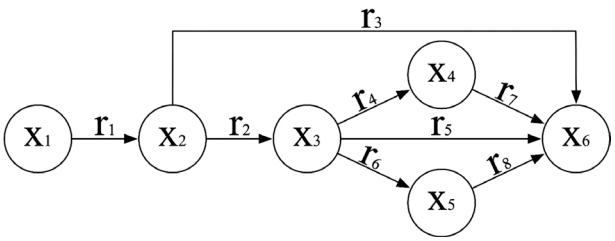


Рис. 3. Граф процесса подготовки патентного ландшафта
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Таблица 1

Свойства вершин графа *PL*(*X,R*)

x_i	I_i	N_i	T_i	L_i	S_i	O_i
x_1	Обращение заказчика	$N_1 = N^a \cup \{b\} \cup \{c\}$	T_1	L_1	S_1	$O_1 = r^c$
x_2	$I_2 \equiv O_1$	$N_2 = N^a \cup \{b\} \cup N^e$	T_2	L_2	S_2	$O_2 = Y_1^{PL}$
x_3	$I_3 = O_2, D$	$N_3 = N^a$	T_3	L_3	S_3	$O_3 = C^K$
x_4	$I_4 \equiv O_3$	$N_4 = N^a$	T_4	L_4	S_4	$O_4 = Y_2^{PL}$
x_5	$I_5 \equiv O_3$	$N_5 = \{b\} \cup N^e$	Tx_5	L_5	S_5	$O_5 = Y_3^{PL}$
x_6	$I_6 = O_2, O_3, O_4, O_5$	$N_6 = \{b\} \cup N^a$	T_6	L_6	S_6	$O_6 = Y_4^{PL} \rightarrow PL^K$

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Для оптимизации затрат на подготовку патентного ландшафта следует учитывать следующие факторы: последовательность этапов и входящие ресурсы, состав участников, реализующих каждый этап, времязатраты и трудозатраты на реализацию этапа, из которых можно рассчитать себестоимость этапа. Для систематизации этих данных на рис. 3 представлен граф процесса подготовки патентного ландшафта, который формализирован в следующем виде:

$$PL(X,R) = X, R, \quad (4)$$

где *PL*(*X,R*) – граф процесса подготовки патентного ландшафта; *X* – множество этапов процесса подготовки патентного ландшафта; *R* – множество взаимосвязей между этапами процесса подготовки патентного ландшафта.

Вершинами графа являются этапы процесса $x_i \in X(PL)$, каждый из которых обладает рядом свойств, исходя из которых каждый этап процесса патентного ландшафта можно представить в следующем виде:

$$x_i = I_i, N_i, T_i, L_i, S_i, O_i, \quad (5)$$

где I_i – входящий ресурс для *i*-го этапа; N_i – множество специалистов, реализующих *i*-й этап; T_i – продолжительность реализации *i*-го этапа, в часах (ч); L_i – трудозатраты на реализацию *i*-го этапа, в человеко-часах (ч.-ч); S_i – себестоимость реализации *i*-го этапа; O_i – результат реализации *i*-го этапа.

Ребрами графа являются взаимосвязи между этапами процесса $r_k \in R(PL)$, каждая из которых обладает рядом свойств, исходя из которых каждую взаимосвязь между этапами процесса подготовки патентного ландшафта можно представить в виде кортежа:

$$r_k = x_m, x_n, (O_m \rightarrow I_n), \quad (6)$$

где x_m – начальная вершина графа, характеризующая более ранний этап из связываемых ребром r_k; x_n – конечная вершина графа, характеризующая более поздний этап из связываемых ребром r_k; O_m – результат реализации этапа x_m; I_n – входящий ресурс для реализации этапа x_n.

Таким образом свойства ребра графа характеризуют то, какие два этапа процесса подготовки патентного ландшафта оно связывает, а также какие результаты реализации предшествующего этапа становятся входящим ресурсом для реализации последующего этапа.

Свойства вершин графа $PL(X,R)$ представлены в табл. 1.

В состав специалистов N_i включаются все задействованные участники процесса подготовки патентного ландшафта (N^a – множество патентных аналитиков, N^e – множество экспертов, b – руководитель отдела патентной аналитики, а также сам заказчик «c»). Функции T_i и L_i задаются как максимальные значения результатов хронометража предыдущих работ по подготовке патентных ландшафтов в соответствующей организационной системе.

Свойства ребер графа $PL(X,R)$ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Свойства ребер графа $PL(X,R)$

r_k	x_m	x_n	$O(x_m)\rightarrow I(x_n)$
r_1	x_1	x_2	$O(x_1)\rightarrow I(x_2)$
r_2	x_2	x_3	$O(x_2)\rightarrow I(x_3)$
r_3	x_2	x_6	$O(x_2)\rightarrow I(x_6)$
r_4	x_3	x_4	$O(x_3)\rightarrow I(x_4)$
r_5	x_3	x_6	$O(x_3)\rightarrow I(x_6)$
r_6	x_3	x_5	$O(x_3)\rightarrow I(x_5)$
r_7	x_4	x_6	$O(x_4)\rightarrow I(x_6)$
r_8	x_5	x_6	$O(x_5)\rightarrow I(x_6)$

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Себестоимость патентного ландшафта (S^{PL}) вычисляется по формуле (7), исходя из расходов на каждый этап подготовки ПЛ, а также расходов на оплату доступа к патентным базам данных и поисково-аналитическим системам (Db) на все время реализации этапов 2, 3 и 4.

$$S^{PL} = \sum_{i=1}^{6} S_i + \sum_{f=1}^{|Db|} \left(P_f^{Db} \times T^r \right), \qquad (7)$$

где S_i^{PL} – себестоимость i-го этапа процесса подготовки патентного ландшафта (x_i);

P_f^{Db} – цена доступа к f-й патентной базе данных или поисково-аналитической системе;

$|Db|$ – мощность множества патентных баз данных или поисково-аналитических систем, используемых при подготовке патентного ландшафта, характеризующая их количество;

T^r – продолжительность подготовки патентного ландшафта, установленная в техническом задании (r^c) (в месяцах).

Себестоимость i-го этапа процесса подготовки патентного ландшафта рассчитывается по формуле

$$S_i^{PL} = \sum_k W^k L_i, \qquad (8)$$

где W^k – ставка оплаты труда за 1 ч k-го вида специалиста; L_i – трудозатраты на реализацию i-го этапа процесса подготовки патентного ландшафта.

Продолжительность процесса подготовки патентного ландшафта (T^{PL}) указывается в часах (ч) и рассчитывается по формуле

$$T^{PL} = \sum_{i=1}^{6} T_i - min\left[T_4, T_5\right], \qquad (9)$$

где T_i – продолжительность реализации i-го этапа процесса подготовки патентного ландшафта (x_i).

На основе этого автором была сформулирована оптимизационная задача:

$$\begin{cases} S^{PL}\left(\left|N^a\right|\right) \rightarrow min \\ T^{PL} \le T^r \\ \left|N^a\right| \ge 5 \end{cases}, \qquad (10)$$

где S^{PL} – себестоимость подготовки патентного ландшафта;

$|N^a|$ – мощность множества привлекаемых к работе патентных аналитиков, характеризующая их количество;

T^{PL} – продолжительность подготовки патентного ландшафта;

T^r – продолжительность подготовки патентного ландшафта, установленная в техническом задании (r^c).

В соответствии с этой оптимизационной задачей находится такое число патентных аналитиков, при котором себестоимость подготовки патентного ландшафта будет минимальной, при соблюдении ограничения по времени, закладываемого в техническом задании. Также эта оптимизационная задача дополнена ограничением на минимальное число привлекаемых патентных аналитиков, обеспечивающее, по мнению автора, объективность интерпретации результатов анализа статистических данных.

Решение оптимизационной задачи может осуществляться переборным алгоритмом [15, с. 28]. Расчеты себестоимости S^{PL} и продолжительности T^{PL} подготовки патентного ландшафта осуществляются с задаваемыми параметрами для различных значений $|N^a|$, из результатов которых выбирается $min(S^{PL})$. В случае существования нескольких вариантов с равной минимальной себестоимостью из них выбирается наиболее быстрый вари-

ант: $min(T^{PL})$. При существовании нескольких вариантов с равной минимальной себестоимостью и равными минимальными продолжительностями процесса подготовки ПЛ из них выбирается вариант с наибольшим числом патентных аналитиков $max(|N^a|)$, что обеспечивает большую объективность результатов патентной аналитики.

При решении этой оптимизационной задачи предполагается, что все аналитики (a_k), привлекаемые к процессу подготовки патентного ландшафта, обладают одинаковой продуктивностью и заработной платой ($W(a_m) = \ldots = W(a_n)$).

Заключение

На основе теории управления организационными системами, а также практики подготовки патентных ландшафтов автором была предложена структура научно-исследовательской организации, дополненная блоком интеллектуальной собственности. Благодаря наличию в штате научно-исследовательской организации компетентных экспертов, автор дополнил метод подготовки патентного ландшафта этапом экспертного анализа, результаты реализации которого повышают информативность аналитического продукта, что, в свою очередь, повышает конкурентоспособность организационной системы.

Дополненный метод подготовки патентного ландшафта формализирован в виде графа технологического процесса, сопровождаемого информацией о время- и трудозатратах на реализацию каждого этапа, на основе чего можно вычислить себестоимость патентного ландшафта. На основе этой формализации была сформулирована оптимизационная задача и описан метод ее решения.

Решение этой оптимизационной задачи позволяет в краткосрочной перспективе сократить себестоимость подготовки патентного ландшафта и тем самым повысить конкурентоспособность организационной системы на рынке патентной аналитики. В долгосрочной перспективе решение этой задачи позволяет определить оптимальное число патентных аналитиков, которых целесообразно держать в штате, исходя из среднемесячного числа подготавливаемых патентных ландшафтов.

Список литературы

1. Нижегородцев Р. М., Никитенко С. М., Шевцов Д. С. Инновационные фирмы в современной российской экономике // Инновации. Предпринимательство. Инвестиции. М.: Сибирская издательская группа, 2010. 311 с. EDN: QUHCTZ. ISBN 978-5-904496-02-9.

2. Никитенко С. М., Никифорова Л. Е. Концепция инновационного развития региона на основе методологии проектного управления (на примере Кемеровской области) // Сибирская финансовая школа. 2011. № 5 (88). С. 96–103. EDN: OWSTTR.

3. Королев М. К., Гоосен Е. В., Никитенко С. М., Месяц М. А. Патентный ландшафт как инструмент выявления перспективных технологических направлений развития отраслей экономики // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2025): труды Восемнадцатой международной конференции (г. Москва, 24–26 сентября 2025 г.). М.: ФГБУН Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова Российской академии наук, 2025. С. 203–209. EDN: GPFAXB.

4. Королев М. К. Управление процессами технологической модернизации организационных систем на основе патентной аналитики // Инновации. 2024. № 5 (301). С. 70–74. EDN: JAWDMT.

5. Королев М. К., Никитенко С. М., Гоосен Е. В. Выявление потенциальных производственных цепочек переработки угля на основе патентной аналитики // Химия в интересах устойчивого развития. 2023. Т. 31. № 5. С. 616–622. DOI: 10.15372/KhUR2023506.

6. Поисковая система патентной информации Google Patents // Google, LLC. Маунтин-Вью. 2006. [Электронный ресурс]. URL: https://patents.google.com/ (дата обращения: 08.04.2026).

7. Приказ Министерства экономического развития Российской Федерации от 23.01.2017 № 8 «Об утверждении Методических рекомендаций по подготовке отчетов о патентном обзоре (патентный ландшафт)». [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/456040849 (дата обращения: 08.04.2026).

8. Ена О. В., Попов Н. В. Методология разработки патентных ландшафтов проектного офиса ФИПС // Станкоинструмент. 2019. № 1 (014). С. 28–35. DOI: 10.22184/2499-9407.2019.14.01.28.35.

9. Гохберг Л. М., Стрельцова Е. А., Нестеренко А. В. Патентные ландшафты: разработка и использование для анализа технологических трендов. М.: Высшая школа экономики, 2024. 108 с. DOI: 10.17323/978-5-7598-3017-7.

10. Trippe, Anthony. Guidelines for Preparing Patent Landscape Reports. World Intellectual Property Organization, 2015. 129 p. [Электронный ресурс]. URL: http://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_946.pdf (дата обращения: 08.04.2026). ISBN 978-92-805-2529-8.

11. ГОСТ Р 15.011-2024 Интеллектуальная собственность. Патентные исследования. Содержание и порядок проведения. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1305006216 (дата обращения: 12.05.2026).

12. Новиков Д. А. Теория управления организационными системами. М.: Образовательная автономная некоммерческая организация высшего образования «Московский психолого-социальный университет», 2005. 584 с. ISBN 5-89502-766-0.

13. Новиков Д. А. Теория управления организационными системами. 4-е изд., испр. и доп. М.: ЛЕНАНД, 2022. 500 с. ISBN 978-5-9710-9459-3.

14. Гоосен Е. В., Каган Е. С., Королев М. К., Никитенко С. М. Методика оценки приоритетности технологий в угольной отрасли // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 2. С. 36–44. DOI: 10.17513/snt.40301.

15. Хлебников М. В., Балашов М. В., Тремба А. А. Оптимизация и управление. М.: URSS, 2024. 448 с. ISBN 978-5-00237-041-2.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 519.876.2:004.896
DOI 10.17513/snt.40826

CC BY 4.0

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВАКУАЦИИ ПЕШЕХОДНЫХ ПОТОКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Наумова Н. А. ORCID ID 0000-0003-1944-1642,
Чубырь Н. О. ORCID ID 0000-0003-3535-0361

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный университет», Краснодар, Российская Федерация,
e-mail: Nataly_Naumova@mail.ru

В статье рассмотрена проблема управления эвакуационными потоками в условиях массовых мероприятий и чрезвычайных ситуаций. Целью исследования является разработка математической модели эвакуации пешеходных потоков, позволяющей управлять процессом эвакуации в режиме реального времени с применением технологий искусственного интеллекта. Применена методология, включающая в себя сбор и обработку видеоданных в режиме реального времени, автоматическую кластеризацию пешеходов с использованием алгоритма DBSCAN, формирование динамической матрицы корреспонденций между группами людей и выходами с использованием вероятностного подхода, максимизирующего энтропию системы; прогнозирование основных показателей на основе стохастической модели массового обслуживания с эрланговским входным потоком. Ключевым преимуществом разработки является интеграция методов искусственного интеллекта для адаптивного анализа потока, что позволяет учитывать изменяющуюся плотность, состав групп и поведенческие паттерны. Предложенная модель позволяет обеспечить автоматическую выработку рекомендаций по эвакуации и их трансляцию через системы оповещения. Предложенный подход позволяет повысить точность прогнозирования загрузки выходов, минимизировать время эвакуации и равномерно распределить потоки, что существенно увеличивает уровень безопасности на массовых мероприятиях и в критических ситуациях по сравнению с традиционными статическими методами.

Ключевые слова: математическое моделирование, искусственный интеллект, пешеходные потоки, эвакуация, случайный процесс

SIMULATION OF PEDESTRIAN EVACUATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Naumova N. A. ORCID ID 0000-0003-1944-1642,
Chubyr N. O. ORCID ID 0000-0003-3535-0361

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kuban State University", Krasnodar, Russian Federation,
e-mail: Nataly_Naumova@mail.ru

This article examines the problem of managing evacuation flows during mass events and emergency situations. The aim of the study is to develop a mathematical model for pedestrian evacuation, allowing for real-time management of the evacuation process using artificial intelligence technologies The methodology employed includes collecting and processing real-time video data, automatic pedestrian clustering using the DBSCAN algorithm, generating a dynamic matrix of correspondences between groups of people and exits using a probabilistic approach that maximizes the entropy of the system, and forecasting key performance indicators based on a stochastic queuing model with an Erlang input flow. A key advantage of the development is the integration of AI methods for adaptive flow analysis, which allows for accounting for changing density, group composition, and behavioral patterns. The proposed model enables the automatic generation of evacuation recommendations and their dissemination through public address systems. The proposed approach allows for increased accuracy in predicting exit occupancy, minimizing evacuation time, and evenly distributing flows, which significantly increases safety at mass events and in critical situations compared to traditional static methods.

Keywords: mathematical modeling, artificial intelligence, pedestrian flows, evacuation, random process

Введение

Обеспечение безопасной и эффективной эвакуации людей из зданий и сооружений при возникновении чрезвычайных ситуаций остается одной из наиболее актуальных задач в области гражданской обороны, пожарной безопасности и организации массовых мероприятий [1]. Несмотря на значительный прогресс в строительных технологиях и нормировании, трагические инциденты, связанные с давкой и неорганизованным движением людей при эвакуации, продолжают происходить по всему миру. Это свидетельствует о недостаточности традиционных, зачастую статических, подходов к планированию эвакуационных путей и управлению потоками, которые не учитывают динамическую природу поведения людей в стрессовых условиях.

Математическое моделирование потоков людей имеет уже полувековую историю. Существует большое количество математических моделей пешеходных потоков, отличающихся как по степени детализации параметров, так и по целям их использования. По степени детализации их разделяют на макроскопические, мезоскопические и микроскопические, что спроецировано в большей степени с имеющей более длительную историю теорией транспортных потоков [2, с. 16–28].

Микроскопические модели, используя высокую степень детализации, различают отдельных людей и их взаимодействие. Микроскопические модели, такие как широко известная модель социальных сил (Social Force Model), клеточные автоматы (CA) или агентные модели (Agent-Based Models), описывают траектории каждого человека, однако их вычислительная сложность и трудность калибровки параметров для больших скоплений людей ограничивают их применение для оперативного управления в реальном времени [3]. Макроскопические модели, с другой стороны, моделируют пешеходный поток в целом и могут использоваться в ситуациях, когда взаимодействие людей не изучается подробно [4]. Мезоскопические (или гибридные) модели пытаются совместить преимущества обоих подходов, рассматривая группы пешеходов как отдельные сущности. Стохастические модели массового обслуживания (СМО) используются для моделирования очередей на выходах и турникетах [5]. Мезоскопическое моделирование обычно заключается в упрощении динамики с меньшими требованиями к данным. Оно сочетает микроскопические аспекты (может работать с отдельными пешеходами) и макроскопические аспекты, такие как динамика потока. К мезоскопическим относят, например, модели на основе теории массового обслуживания. В работах И. А. Корелина с помощью нестационарных систем массового обслуживания описывается движение потока людей через контрольно-пропускные пункты.

Значительный вклад в исследование и математическое моделирование движения людских потоков во время эвакуации внес российский ученый В. В. Холщевников и его ученики. Они связали аналитически плотность и скорость для пешеходных потоков в различных условиях аналогично зависимости для транспортных потоков [6]. Работы по выявлению таких зависимостей были продолжены учеником Холщевникова Д. А. Самошиным для неоднородных потоков и потоков, образованных людьми со сниженной мобильностью [7].

Прорыв в данной области связан с интеграцией технологий искусственного интеллекта (ИИ) и систем компьютерного зрения, которые позволяют перейти от гипотетического моделирования к управлению на основе данных, получаемых в реальном времени. Развитие технологий, привлечение к обработке данных искусственного интеллекта делает возможным разработку более сложных моделей, учитывающих большее количество данных и факторов. Так, например, математическое моделирование движения людей в процессе эвакуации на основании непрерывно-дискретного подхода и компьютерная реализация указанного подхода рассматриваются в работах Е. С. Кирик.

Алгоритмы машинного обучения способны автоматически анализировать видеопоток, детектировать и отслеживать людей, выявлять группы на основе их пространственного расположения и взаимодействия, а также оценивать ключевые параметры потока: плотность, скорость и распределение по направлениям. Это открывает возможности для создания принципиально новых адаптивных систем, способных динамически перестраивать сценарии эвакуации и выдавать персоналу и посетителям актуальные рекомендации, что позволяет преодолеть разрыв между детальным микроскопическим моделированием и требованиями к скорости вычислений для работы в режиме реального времени.

Ключевым недостатком большинства существующих решений является их статичность и зависимость от априорных данных. Они плохо адаптируются к быстро меняющейся обстановке, не учитывают реального состава толпы (наличие детей, пожилых людей, лиц с ограниченными возможностями) и сложных поведенческих паттернов, возникающих в условиях неопределенности и стресса. В результате прогнозы, выполненные по таким моделям, могут существенно расходиться с реальностью, что снижает их практическую ценность для систем поддержки принятия решений.

Цель исследования – разработка математической модели эвакуации пешеходных потоков, позволяющей управлять процессом эвакуации в режиме реального времени с применением технологий искусственного интеллекта.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие *задачи*: определить входные параметры модели, методы сбора и обработки данных с видеодетекторов в реальном времени; разработать метод формирования матрицы корреспонденций для пешеходных потоков; разработать методы определения метрик качества организации эвакуации.

Материалы и методы исследования

Использование современных технологий искусственного интеллекта позволяет получить модель, которая сочетает в себе точность математического моделирования, гибкость ИИ-алгоритмов и практическую направленность на решение задач управления пешеходными потоками в режиме реального времени, что делает ее перспективным инструментом для обеспечения безопасности на массовых мероприятиях и в критических ситуациях.

Исходными параметрами для прогнозирования характеристик качества организации процесса эвакуации из мест проведения массовых мероприятий являются данные об активности пешеходов, полученные с камер видеонаблюдения. Для сбора и предварительной обработки данных видеопотока со стационарных камер наблюдения с целью детекции объектов интереса могут использоваться сверточные нейронные сети (CNN). К примеру, модели, основанные на YOLO архитектуре, способны детектировать, классифицировать, отслеживать и реидентифицировать объекты интереса.

Для прогнозирования скоплений людей могут использоваться рекуррентные нейронные сети (RNN) и их улучшенные версии – LSTM и GRU, особенно при наличии временной составляющей в данных. В задачах пространственно-временного анализа подойдут графовые нейросети (Graph Neural Networks, GNN), а также модели типа Spatio-Temporal Graph Convolutional Networks (ST-GCN). С их помощью можно выявлять устойчивые шаблоны движения, предсказывать увеличение плотности в определенных зонах и формировать кластеры с учетом пространственной структуры зоны проведения массового мероприятия.

Для моделирования движения пешеходов во время эвакуации из мест проведения массовых мероприятий предлагается использовать мезоскопическую детализацию, опирающуюся на теорию случайных процессов и, в частности, теорию массового обслуживания.

В данной работе предлагается следующий подход к разработке комплексной математической модели для моделирования эвакуации пешеходных потоков, основанной на поэтапном применении технологий искусственного интеллекта:

− использование сквозного конвейера обработки данных: от сбора видеоинформации с помощью детекторов до определения показателей качества организации движения людских потоков;

− применение алгоритмов кластеризации для автоматического выделения групп пешеходов на основе их пространственно-поведенческих характеристик с учетом состава группы [8];

− формирование и непрерывная актуализация в реальном времени динамической матрицы корреспонденций «локация – выход» с использованием вероятностного подхода, максимизирующего энтропию системы;

− использование стохастической модели массового обслуживания с эрланговским входным потоком [9, с. 92–110] для прогнозирования ключевых показателей эффективности (длины очереди, времени ожидания, загрузки выходов) [10, с. 10–12], что позволяет более адекватно описывать плотные пешеходные потоки.

Благодаря данным видеонаблюдения оказывается возможным периодическое обновление матрицы корреспонденций и прогнозирование характеристик потоков людей у выходов из зоны проведения мероприятия.

Предлагаемый подход к моделированию предоставляет методический фундамент для создания интеллектуальных систем управления безопасностью на объектах с массовым пребыванием людей, способных повысить надежность и скорость эвакуации за счет адаптивного и обоснованного распределения людских потоков. Он позволит обеспечить переход от статических расчетов к адаптивным системам управления в реальном времени.

Результаты исследования и их обсуждение

Общие характеристики математической модели движения пешеходных потоков при эвакуации. Научная новизна исследования состоит в разработке мезоскопической математической модели формирования пешеходных потоков, отличающейся от существующих тем, что она основана на аналитических расчетах по актуализируемым в реальном времени данным и позволяет прогнозировать загруженность выходов при эвакуации с краткосрочной задержкой реагирования. Своевременная информация о степени загруженности эвакуационных выходов позволит системе регулировать плотность и направление потоков.

Математическая модель состоит из следующих блоков:

1) сбор и обработка статистических данных о пешеходном потоке в режиме реального времени (выбранные характеристики обрабатываются с применением ИИ по данным, полученным с видеодетекторов);

2) кластеризация пешеходов согласно выбранным характеристикам пешеходов и выбранной метрике;

3) формирование матрицы корреспонденций «локация кластера – выход»;

4) прогнозирование характеристик, требующихся для определения метрик стохастической модели;

5) определение метрик стохастической модели: длина очереди, время ожидания в очереди.

Ниже подробно обсуждается каждый из блоков.

1. Сбор и обработка статистических данных о пешеходном потоке

Сбор и обработка видеоданных проводится в реальном времени с помощью систем компьютерного зрения [3]. Современные подходы активно интегрируют методы ИИ для анализа видеоданных, кластеризации и прогнозирования. Например, применение сверточных нейронных сетей (CNN) для детектирования пешеходов.

Для данной площадки (или помещения) вводится система декартовых координат *OXY* на плоскости. С помощью компьютерного зрения определяются количество людей в данной локации, координаты $(x_i;y_i)$ индивидуумов во введенной системе координат, скорость и плотность потока у выходов из локаций, фиксируются признаки социального взаимодействия (например, повороты головы, тактильные контакты).

2. Кластеризация пешеходов согласно выбранным характеристикам пешеходов и выбранной метрике

Поведение пешеходов в группах (кластерах) отличается от поведения индивидуального пешехода. Как правило, все члены группы передвигаются с одинаковой скоростью к одному выходу. Кластеризация проводится на основании коммуникаций и расстояний между клетками. То есть в функции расстояний используется частота коммуникаций между «клетками».

Каждому кластеру присваивается тип, учитывающий состав кластера, влияющий на скорость передвижения:

1) A – в составе мужчины;
2) B – в составе женщины;
3) C – смешанный состав;
4) D – в составе есть ребенок;
5) E – в составе есть инвалид.

В зависимости от типа кластера прогнозируется впоследствии скорость передвижения [8; 11], а также рекомендации по управлению потоками при эвакуации. Цель – автоматически выделить группы (кластеры) людей на основе их пространственной близости и поведения в реальном времени для оптимизации управления эвакуацией.

Входные данные: координаты людей $(x_i;y_i)$ в системе координат помещения; опционально определяются векторы скорости, направления движения, признаки социального взаимодействия (например, частота поворотов головы).

Параметры DBSCAN:

− ε – максимальное расстояние между двумя людьми для включения в один кластер;

− *minPts* – минимальное количество людей, образующих плотную группу.

Алгоритм кластеризации:

1. Предобработка данных: нормализация координат и признаков (при необходимости).

2. Формирование матрицы расстояний между людьми (евклидово расстояние в метрах).

3. Инициализация: все люди помечаются как непосещенные. Создается пустой список кластеров.

4. Основной цикл: для каждой точки P_i определяются соседи в радиусе ε от P_i; определяется шум (возможно, одиночный человек или артефакт); создается и обновляется кластер *C*.

Для основного цикла используется функция *ExpandCluster* (P_i, *N, C, ε, minPts).*

5. Постобработка: удаление кластеров с числом людей меньше пороговых значений; расчет характеристики кластеров (центроид, размер, скорость и направление движения), визуализация кластеров на плане помещения.

6. Выходные данные: список кластеров с их характеристиками; помеченные точки шума (одиночные люди); матрица принадлежности людей к кластерам.

В качестве параметров можно взять, например, $\varepsilon = 1{,}5$ м (максимальное расстояние для учета в одной группе), *minPt*s = 2 (минимум 2 чел. для образования кластера), а также при наличии данных о скорости можно добавить весовую метрику расстояния с учетом движения.

3. Формирование матрицы корреспонденций «локация кластера – выход»

Исходными данными для формирования матрицы корреспонденций являются следующие:

m – количество выходов с площадки проведения мероприятия;

n – количество зон, на которые разбита площадка проведения мероприятия;

s_i, $i \in S$ – априорное (предполагаемое) общее количество пешеходов, выходящих из локации № *i* в течение всего периода;

d_j, $j \in D$ – предполагаемое (априорное) общее количество пешеходов, подходящих к выходу № *j* течение всего периода;

N – общее число посетителей.

Предполагается, что пешеходы, отнесенные к одному кластеру, направляются к одному и тому же выходу. Кроме того, должны выполняться следующие условия, которые называют условиями баланса системы:

$$\sum_{j=1}^{m}\rho_{ij}=s_i,\quad \sum_{i=1}^{n}\rho_{ij}=d_j,\quad \sum_{i=1}^{n}s_i=\sum_{j=1}^{m}d_j=N.$$

Введем также следующие обозначения:

ρ_{ij} – количество пешеходов (назовем их «корреспонденциями»), выходящими из локации № i к выходу № j течение всего периода.

По априорным исходным данным составим опорную матрицу корреспонденций

$$ODMatPed_0=\left\|\rho_{ij}\right\|_{m\times n},$$

которую впоследствии будем корректировать для текущего момента, то есть строить матрицу $ODMatPed(t)$, используя обработку данных видео-мониторинга, полученную с помощью технологий ИИ.

Будем использовать вероятностный подход [12, с. 24–46], называемый методом максимизации энтропии. Теоретически пешеходы из каждой локации (их количество равно n) могут покинуть площадку проведения мероприятия через любой из m выходов. Будем считать, что на их выбор (предпочтение) влияют следующие факторы:

1) $F1$ – расстояние до выхода;

2) $F2$ – загруженность выхода;

3) $F3$ – загруженность прохода к данному выходу.

Количественно предпочтения пешеходов отражаются на вероятности P_{ij} выбора пешеходами из локации № i выхода № j:

$$P_{ij}=\frac{1}{n}\left(k_1\frac{Dist_j}{Dist}+k_2\frac{Que_j}{Que}+k_3\frac{Dens_j}{Dens}\right),$$

где коэффициенты предпочтений такие, что

$$k_1+k_2+k_3=1$$

(можно взять $k_1=\frac{2}{3},k_2=\frac{1}{6},k_3=\frac{1}{6}$);

$Dist_j$ – расстояние от локации № i до выхода № j, $Dist=\sum_{j=1}^{m}Dist_j$;

Que_j – количество людей в зоне ожидания у выхода № j, $Que=\sum_{j=1}^{m}Que_j$;

$Dens_j$ – плотность потока на проходе к выходу № j, $Dens=\sum_{j=1}^{m}Dens_j$.

Если обозначить через P_ODM_l вероятность одной из реализаций выбора пар «локация – выход» и считать, что вероятности P_{ij} не зависят друг от друга, то получим следующее равенство:

$$P_ODM_l=\prod_{i=1}^{n}\prod_{j=1}^{m}P_{jj}^{\rho_{ij}}.$$

Отметим, что предположение о независимости вероятностей P_{ij} дает возможность значительно упростить аналитические выкладки при построении модели. На самом деле значения вероятностей зависят от факторов $F2$ и $F3$, которые динамически изменяются в процессе эвакуации. Однако эта проблема решается за счет организации обратной связи с видеодетекторами.

Используя законы комбинаторики, количество всевозможных реализаций выбора пар «локация – выход» равно количеству перестановок с повторениями:

$$K_ODM=N!\Big/\left(\prod_{i=1}^{n}\prod_{j=1}^{m}\rho_{ij}!\right).$$

Значит, целевая функция для выбора наиболее вероятного состояния системы имеет вид

$$P_{ODM}=N!\left(\prod_{i=1}^{n}\prod_{j=1}^{m}\frac{P_{ij}^{\rho_{ij}}}{\rho_{ij}!}\right)\rightarrow\max.$$

При ограничениях:

$$\sum_{j=1}^{m}\rho_{ij}=s_i\quad\text{и}\quad\sum_{i=1}^{n}\rho_{ij}=d_j.$$

Удобнее исследовать функцию, полученную логарифмированием функции $P_{ODM}(\rho_{ij})$:

$$Z=\ln\left(P_{ODM}\right)=\ln N!\left(\prod_{i=1}^{n}\prod_{j=1}^{m}\frac{P_{ij}^{\rho_{ij}}}{\rho_{ij}!}\right)=lnN!+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\left(\rho_{ij}lnP_{ij}-ln\rho_{ij}!\right).\qquad(1)$$

Так как в нашем случае N – *const*, то получаем следующую задачу:

$$Z=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\left(\rho_{ij}lnP_{ij}-ln\rho_{ij}!\right)\rightarrow max.$$

При ограничениях:

$$\sum_{j=1}^{m}\rho_{ij}=s_i \quad \text{и} \quad \sum_{i=1}^{n}\rho_{ij}=d_j. \tag{2}$$

Переменными задачи являются корреспонденции ρ_{ij} при определенных для текущего момента вероятностях P_{ij}, значениях s_i и d_j, а также общем объеме N числа всех корреспонденций на текущий момент. Переменные задачи ρ_{ij} – целочисленные, а значит, при малых значениях N решение возможно получить обычным перебором всех вариантов.

При больших значениях числа корреспонденций ρ_{ij} можно применить к (1) формулу Стирлинга:

$$lnk!\approx k\cdot lnk-k.$$

В этом случае целевая функция примет более простой вид:

$$Z=N\cdot lnN+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\left(\rho_{ij}\left(lnP_{ij}-ln\rho_{ij}\right)\right)\to max. \tag{3}$$

Будем считать, что переменные ρ_{ij} уже не целочисленные, а могут принимать положительные действительные значения. Стационарная точка целевой функции (3) имеет координаты $\rho_{ij}=P_{ij}\cdot e^{-1}<1$, что не удовлетворяет ограничениям (2). Значит, решение задачи достигается на границе области. В этом случае удобнее поступить следующим образом,

Для нахождения условного экстремума функции (3) при ограничениях (2) составим функцию Лагранжа и будем считать, что переменные ρ_{ij} могут принимать положительные действительные значения:

$$Z=N\cdot lnN+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\left(\rho_{ij}\left(lnP_{ij}-ln\rho_{ij}\right)\right)+\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\left(s_i-\sum_{j=1}^{m}\rho_{ij}\right)+\sum_{j=1}^{m}\mu_j\left(d_j-\sum_{i=1}^{n}\rho_{ij}\right)\to max. \tag{4}$$

Точка экстремума функции (4) должна удовлетворять следующей системе уравнений:

$$\frac{\partial Z}{\partial\rho_{ij}}=lnP_{ij}-ln\rho_{ij}-1-\lambda_i-\mu_j=0$$

для $i\in\{1,2,\ldots,n\}, j\in\{1,2,\ldots,m\}$,

$$\sum_{j=1}^{m}\rho_{ij}=s_i, \qquad \sum_{i=1}^{n}\rho_{ij}=d_j$$

Выражение ρ_{ij} через множители Лагранжа:

$$\rho_{ij}=P_{ij}\cdot e^{-1-\lambda_i-\mu_j}. \tag{5}$$

После подстановки (5) в равенства (2) получим систему уравнений относительно λ_i и μ_j:

$$\sum_{j=1}^{m}P_{ij}\cdot e^{-1-\lambda_i-\mu_j}=s_i,$$

$$\sum_{i=1}^{n}P_{ij}\cdot e^{-1-\lambda_i-\mu_j}=d_j.$$

$$i\in\{1,2,\ldots,n\}, j\in\{1,2,\ldots,m\}.$$

Систему $(m+n)$ нелинейных уравнений можно решить любыми численными методами, например методом последовательных приближений [13, с. 172–211]. В результате после подстановки в формулу (5) и округления до ближайшего целого числа получим распределение корреспонденций и матрицу $ODMatPed_0$.

Если ввести обозначения

$$a_i=e^{-\lambda_i},\ b_j=e^{-\mu_j},$$

то можно выразить новые переменные следующим образом:

$$a_i=\frac{s_i}{\sum_{j=1}^{m}P_{ij}\cdot b_j},$$

$$b_j=\frac{d_j}{\sum_{j=1}^{m}P_{ij}\cdot a_i}.$$

В этом случае значения корреспонденций будут иметь вид

$$\rho_{ij}=a_i b_j P_{ij}.$$

В таком же виде получается решение двусторонней модели гравитационного типа в транспортном моделировании [14]. Численные значения калибровочных коэффициентов a_i и b_j находят обычно методом балансировки Фернесса, который быстро сходится к решению системы.

Впоследствии матрица корреспонденций обновляется в режиме реального времени по данным с видеодетектора через заданные малые промежутки времени. Обновлению подлежат следующие входные параметры:

s_i; $\sum_{i=1}^{n} s_i = N$; Que_j; Que; $Dens_j$, $Dens$, P_{ij}.

Кроме того рассчитываются новые значения d_j: $d_j = \sum_{i=1}^{n} P_{ij} s_i$.

Также для обновления матрицы корреспонденций можно применять экстраполяционные методы, например метод Фратара.

4. Прогнозирование характеристик, требующихся для определения метрик модели

Матрица корреспонденций содержит информацию о количестве пешеходов, которые должны пройти от данной локации к определенному выходу, что позволяет делать прогноз интенсивности пешеходного потока к конкретному выходу через заданный промежуток времени.

Общее количество пешеходов, которые предполагают направиться к выходу № j, равно $\sum_{i=1}^{n} \rho_{ij} = d_j$.

Введем обозначения:

S_{ij} – расстояние от локации № i до выхода № j (в метрах);

v_{ij} – скорость передвижения (в м/с);

$T_{ij} = S_{ij} / v_{ij}$ – среднее время движения от локаций № i до выхода № j.

Скорость передвижения v_{ij} может быть спрогнозирована по данным о составе пешеходного потока, то есть по преобладающему типу кластеров в потоке. Исследования о зависимости скорости и плотности людского потока от его состава представлены в работах [6; 7], разработаны соответствующие методики и таблицы. В среднем скорость свободного движения пешеходов в потоке принимают равной v_{ij} = 1,66 м/с. В предлагаемой модели значение скорости можно получить по данным видеодетектора.

Если по данным мониторинга определена плотность D_i на выходе из локации № i, то можно оценить плотность потока (чел/м^2), образованного пешеходами, направляющимися от локации № i к выходу № j следующим образом:

$$D_{ij} = \frac{\rho_{ij}}{s_i} D_i .$$

Можно считать, что приближенное значение ожидаемой через время

$$\Delta T = \underbrace{\max}_{i} \left\{ T_{ij} \right\}$$

плотности потока (чел /м^2), образованного пешеходами у выхода № j следующее:

$$D_j = \sum_{i=1}^{n} D_{ij} .$$

Зависимость между интенсивностью, скоростью и плотностью потока:

$$N_{ij} = v_{ij} \cdot D_{ij} \text{ (чел/с).}$$

Значение параметра k рассчитываем по статистическим данным [15; 16], полученным с помощью видеодетекторов на подходах к каждому выходу. Тогда второй параметр Эрланга для применения модели СМО равен

$$\lambda = k \cdot \sum_{i=1}^{n} N_{ij} ,.$$

Параметры распределения Эрланга λ и k используются для прогнозирования характеристик очереди у выходов с площадки мероприятия [15].

5. Определение метрик стохастической модели

При прохождении турникетов для выхода из зоны проведения мероприятия авторами предлагается использовать модель системы массового обслуживания с переменной плотностью, считая поток посетителей распределенным по закону Эрланга [15]. Выбор обусловлен тем, что этот закон позволяет аппроксимировать потоки различной плотности. При значении параметра k = 6 закон Эрланга уже близок к нормальному закону распределения. А по данным различных исследований, нормальный закон распределения хорошо аппроксимирует плотные потоки, каковыми являются потоки людей на выходе при прохождении турникетов [16]. При имеющейся зоне ожидания возможно обеспечить работу СМО на предельно допустимой интенсивности входящего потока, формируя ординарный поток из зоны ожидания в зону работы СМО.

Если турникетов нет, то при расчетах предлагается считать СМО многоканальной, где число каналов равно

$$M = \frac{w_door}{w_cell} ,$$

где w_door – ширина прохода,

w_cell – средняя ширина полосы, необходимой для прохождения одного пешехода.

Итак, распределение интервалов по времени между подряд идущими пешеходами подчинено закону Эрланга порядка k. Значение параметра $\lambda = \lambda(t)$ зависит от времени и периодически обновляется согласно описанной выше модели. Обслуживание заявок (проход через турникет одного посетителя) распределено по показательному закону с параметром μ. Имеется M турникетов (обслуживающих приборов). Мест в очереди – ограниченное числом посетителей мероприятия количество, которое будем обозначать N_Q.

Для определения неизвестных вероятностей необходимо решить систему дифференциальных уравнений, например, численным методом Рунге – Кутты четвертого порядка:

$$\begin{cases} \left(p_s(t)\right)'_t = -\left(\lambda + s\mu\right)p_s(t) + \left(s+1\right))\mu \cdot p_{s+1} + \lambda\, p_{s-1}^{(k)}, \left(s = 1, 2, ..., M\right) \\ \left(p_{M+i}(t)\right)'_t = -\left(\lambda + M\mu\right)p_{M+i}(t) + \lambda p_{M+i-1}^{(k)}(t) + M\mu p_{M+i-1}(t), \left(i = 1,2,3,..., N_Q - 1\right) \\ \left(p_{M+N_Q}(t)\right)' = -M\mu\, p_{M+N_Q}(t) + \lambda\, p_{M+N_Q-1}^{(k)}(t) \\ \left(p_s^{(j)}(t)\right)'_t = -\lambda p_s^{(j)}(t) + \lambda p_s^{(j-1)}(t), \left(j = 1,2,...,k\right) \end{cases}.$$

При моделировании нестационарного потока посетителей в случае, когда интенсивность потока меняется с течением времени, поток представлен в виде кусочно-непрерывной функции. Для этого вся временная ось разбивается на K интервалов $[t_{i-1}; t_i]$. На каждом таком интервале интенсивность поступления заявок считается постоянной. Для стационарных значений параметров Эрланга на i-м интервале приняты обозначения $\bar{\lambda}_i$ и k_i.

Начальные условия для системы дифференциальных уравнений имеют вид

$$p_g^{(0)}(0) = 1,\ \ p_m^{(j)} = 0 \qquad (6)$$

($m = 0, 1, 2, .., g\text{-}1, g+1, , \ldots; j = 1,\ldots, k_i$).

Номер g вероятности $p_g^{(0)}(0)$, отличной от нуля в начале нового временного интервала $[t_{i-1}; t_i]$, определяется из условия $g = [M(X(t))]$ – целая часть от математического ожидания числа заявок $X(t)$ в системе на предыдущем временном интервале $[t_{i-2}; t_{i-1}]$. Основной результат решения системы – определение вероятности нахождения в СМО s заявок для каждого интервала $[t_{i-1}; t_i]$:

$$\left(r_s\right)_i = p_s + \sum_{j=1}^{k_i} p_s^{(j)}\ .$$

При решении системы численным методом $(r_s)_i$ – сеточные функции.

Можно записать зависимость параметров распределения от времени с помощью функции Хэвисайда:

$$\theta\left(t-a\right) = \begin{cases} 0, t < a, \\ 1, t \ge a\ . \end{cases}$$

Таким образом, получаем

$$\lambda(t) = \sum_{i=0}^{K}\left(\theta\left(t-t_i\right) - \theta\left(t-t_{i+1}\right)\right)\bar{\lambda}_i\,; \quad (7)$$

$$k(t) = \sum_{i=0}^{K}\left(\theta\left(t-t_i\right) - \theta\left(t-t_{i+1}\right)\right)k_i\,; \quad (8)$$

$$r_s(t) = \sum_{i=0}^{K}\left(\theta\left(t-t_i\right) - \theta\left(t-t_{i+1}\right)\right)\left(r_s\right)_i\,. \quad (9)$$

Для вычисления характеристик качества функционирования СМО применяются формулы

$L_q(t) = \sum_{n=M}^{N_Q}\left(n-M\right)r_n(t)$ – зависимость длины очереди от времени;

$W_q(t) = \sum_{n=M}^{N_Q}\left(n-M+1\right)\frac{r_n(t)}{M\mu}$ – зависимость ожидания в очереди от времени.

В зависимости от значений характеристик $L_q(t)$ и $W_q(t)$ для каждого из выходов делается вывод о его степени загруженности и вырабатываются рекомендации о перераспределении потоков людей. Информация в режиме реального времени может выводиться на информационные табло.

6. Примеры расчетов с помощью разработанной модели

Пример 1. Рассмотрим пример расчета матрицы корреспонденций для двух локаций (зон) и двух выходов, что соответствует актовому залу КубГУ.

Результаты численного решения

t (мин)	$\lambda(t)$	$P_0(t)$	$P_1(t)$	$P_2(t)$	$P_3(t)$	$L_q(t)$	$W_q(t)$
0,0	0,3	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,3	0,86	0,12	0,01	0,00	0,02	0,02
1,0	0,3	0,78	0,18	0,03	0,01	0,06	0,07
1,5	0,3	0,73	0,20	0,05	0,01	0,09	0,10
2,0	0,3	0,71	0,21	0,06	0,02	0,11	0,12
2,5	0,8	0,55	0,28	0,11	0,06	0,23	0,29
3,0	0,8	0,44	0,29	0,16	0,11	0,37	0,47
3,5	0,8	0,38	0,29	0,19	0,15	0,49	0,61
4,0	0,8	0,36	0,28	0,19	0,17	0,54	0,67
4,5	0,8	0,36	0,27	0,19	0,18	0,55	0,69
5,0	0,8	0,36	0,29	0,22	0,13	0,48	0,60

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Входные параметры:
$s_1 = 30$ – количество пешеходов в локации 1;
$s_2 = 50$ – количество пешеходов в локации 2;
$d_1 = 40$ – количество пешеходов, направляющихся к выходу 1;
$d_2 = 40$ – количество пешеходов в локации, направляющихся к выходу 2;
$N = s_1 + s_2 = d_1 + d_2 = 80$ – общее количество людей в помещении.

Коэффициенты предпочтения для каждой пары (вероятности выбора пары «локация – выход»):
$P_{11} = 0{,}35$ – вероятность выбора выхода 1 из локации 1;
$P_{12} = 0{,}15$ – вероятность выбора выхода 2 из локации 1;
$P_{21} = 0{,}2$ – вероятность выбора выхода 1 из локации 2;
$P_{22} = 0{,}3$ – вероятность выбора выхода 2 из локации 2;

$$P_{11} + P_{12} + P_{21} + P_{22} = 1.$$

Получаем следующую систему для определения корреспонденций:

$$\begin{cases} P_{11} \cdot e^{-1-\lambda_1-\mu_1} + P_{12} \cdot e^{-1-\lambda_1-\mu_2} = 30 \\ P_{21} \cdot e^{-1-\lambda_2-\mu_1} + P_{22} \cdot e^{-1-\lambda_2-\mu_2} = 50 \\ P_{11} \cdot e^{-1-\lambda_1-\mu_1} + P_{21} \cdot e^{-1-\lambda_2-\mu_1} = 40 \\ P_{12} \cdot e^{-1-\lambda_1-\mu_2} + P_{22} \cdot e^{-1-\lambda_2-\mu_2} = 40. \end{cases}$$

Система содержит четыре неизвестных λ_1, λ_2, μ_1, μ_2,. Неизвестные корреспонденции определяются после нахождения значений неизвестных по следующей формуле:

$$\rho_{ij} = P_{ij} \cdot e^{-1-\lambda_i-\mu_j}.$$

Начальные значения:

$$\rho_{11} = 21, \rho_{12} = 9, \rho_{21} = 20, \rho_{22} = 30.$$

Проверим баланс по выходам:

$$\rho_{11} + \rho_{21} = 41 \neq 40; \rho_{12} + \rho_{22} = 39 \neq 40.$$

Для решения применим метод балансировки Фернесса. Получены следующие значения, для которых уже выполняются условия баланса:

$$\rho_{11} = 20{,}5, \rho_{12} = 9{,}5, \rho_{21} = 19{,}5, \rho_{22} = 30{,}5.$$

Округленное до целых значений решение следующее:

$$\rho_{11} = 21, \rho_{12} = 9, \rho_{21} = 20, \rho_{22} = 30.$$

Таким образом, матрица корреспонденций имеет вид

$$ODMatPed = \begin{pmatrix} 21 & 9 \\ 19 & 31 \end{pmatrix}.$$

Пример 2. Рассмотрим пример, иллюстрирующий определение вероятностей состояний системы массового обслуживания $\boldsymbol{E}_6 / \boldsymbol{M} / 1/2$:

$M = 1$ (один канал);
$N_q = 2$ (макс. 2 в очереди);
$s = 0, 1, 2, 3$ – виды состояний СМО по числу заявок;
$k = 6$ (фазы Эрланга).

Пусть $\mu = 1$, $\lambda(t)$ меняется ступенчато, то есть при $0 \le t < 2$: $\lambda = 0{,}3$ (низкая нагрузка), при $2 \le t < 5$: $\lambda = 0{,}8$, при $t > 5$: $\lambda = 1{,}2$ (высокая нагрузка). Начальные условия

$$P_0(0) = 1,\ P_1(0) = P_2(0) = P_3(0) = 0.$$

Результаты численного решения задачи приведены в таблице.

Данные, полученные с помощью перечисленных программных решений, могут быть интегрированы в предлагаемую модель

для обновления параметров в реальном времени, повышая точность прогнозов и адаптивность системы управления эвакуацией.

Заключение

Одной из ключевых особенностей разработанной математической модели является использование технологий искусственного интеллекта для обновления параметров, необходимых для аналитических расчетов характеристик качества организации движения пешеходов через эвакуационные выходы. Это выгодно отличает предлагаемую модель от статических аналогов, которые полагаются на априорные данные и не учитывают текущую ситуацию, а также составляет научную новизну модели.

Предложенный метод формирования матрицы корреспонденций позволяет в режиме реального времени определять параметры распределения Эрланга для прогнозирования характеристик очереди у выходов с площадки мероприятия. Разработанный метод учитывает нестационарность случайного потока, что увеличивает точность расчетов. Разработанная модель позволяет прогнозировать загруженность выходов с площадки проведения массового мероприятия и формулировать в динамическом режиме рекомендации по равномерному распределению нагрузки на выходы.

Перспективы дальнейших исследований видятся в верификации модели на полноценных натурных экспериментах, а также учете более сложных факторов (например, паники, архитектурных препятствий), а также в интеграции с системами «умного города» для создания комплексных решений по управлению городской мобильностью и безопасностью.

Список литературы

1. Мельников Р. В. Моделирование пешеходных потоков при подготовке к проведению мега-событий // Инженерный вестник Дона. 2017. № 2 (45). С. 72. URL: www.ivdon.ru/back_media/uploads/article/pdf/IVD_139_Melnikov.pdf_b6780043e7.pdf (дата обращения: 31.03.2026).

2. Наумова Н. А., Зырянов В. В., Наумов Р. А. Автоматизированное управление транспортными потоками средствами мезоскопического моделирования: монография. Краснодар: ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2018. 266 с. ISBN 978-5-8333-0803-5.

3. Mingtao Wang, Xin Zhou, Yuanyuan Chen. Acomprehensive survey of crowd density estimation and counting // IET Image Processing. 2025. Vol. 19. Is. 1. DOI: 10.1049/ipr2.13328.

4. Hughes R. L. A continuum theory for the flow of pedestrians. R. L. Hughes // Transportation Research Part B: Methodological. 2002. Vol. 36. Is. 6. P. 507–535. DOI: 10.1016/S0191-2615(01)00015-7.

5. Zhang Z. and Jia L. Optimal guidance strategy for crowd evacuation with multiple exits: A hybrid multiscale modeling approach // Applied Mathematical Modelling 2021. Vol. 90. P. 488–504. DOI: 10.1016/j.apm.2020.08.075.

6. Холщевников В. В., Шишов И. А. Моделирование свободного движения людских потоков // Вестник ТГАСУ. 2011. № 2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-svobodnogo-dvizheniya-lyudskih-potokov (дата обращения: 31.03.2026).

7. Самошин Д. А., Истратов Р. Н., Шаранова М. М., Кочетыгов В. А., Томин С. В., Фролов А. Г. Исследование времени начала эвакуации людей в жилых многоэтажных зданиях без систем оповещения о пожаре // Пожаровзрывобезопасность. 2022. № 31 (4). С. 38–55. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.38-55.

8. Ester M., Kriegel H.-P., Sander J., Xu X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise // Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'96). AAAI Press, 1996. P. 226–231.

9. Гнеденко Б. В., Коваленко И. Н. Введение в теорию массового обслуживания. 4-е изд., испр. М.: ЛКИ, 2021. 400 с. ISBN 978-5-382-02044-0.

10. Дудин А. Н., Медведев Г. А., Меленец Ю. В. Практикум на ЭВМ по теории массового обслуживания: учеб. пособие. Мн.: Университетское, 2000. 109 с. ISBN 985-09-0300-7.

11. Naumova N. A. Determination of parameters of high density pedestrian flow upon formed traffic in certain direction // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. 2020. Vol. 8 (9). P. 6560–6567. DOI: 10.30534/ijeter/2020/262892020.

12. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учеб. пособие для вузов. М.: Юстиция, 2018. 448 с. ISBN 978-5-4365-1903-6.

13. Fox W. P., West R. D. Numerical Methods and Analysis with Mathematical Modelling. Chapman and Hall/CRC. 2024. 423 p. ISBN 9781032703671.

14. Gasnikov A. V., Gasnikova E. V., Nesterov Yu. E. Dual methods for finding equilibriums in mixed models of flow distribution in large transportation networks // Computational mathematics and mathematical physics.2018. Vol. 58. Is. 9. P. 1395–1403. DOI: 10.1134/S0965542518090075.

15. Наумова Н. А., Коваленко Ю. С. Численные методы моделирования потока посетителей при проведении массовых мероприятий // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 11. С. 68–74. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id = 40212 (дата обращения: 02.04.2026). DOI: 10.17513/snt.40212.

16. Поршнев С. В., Корелин И. А. Математическое моделирование информационных контрольно-пропускных систем, обоснование выбора аппроксимации интенсивности поступления заявок // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 7. С. 324–329.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование. Исследование поддержано грантом на организацию подготовки студентов по программам высшего образования ведущих специалистов в области искусственного интеллекта, предоставленным Аналитическим центром при Правительстве Российской Федерации № 70-2025-000735 от 29 мая 2025 г. ИГК 000000Ц330325Р2Ж0002.

Financing. The research was supported by a grant for the organization of training of students in higher education programs for leading specialists in the field of artificial intelligence, provided by the Analytical Center under the Government of the Russian Federation No. 70-2025-000735 dated May 29, 2025. IGK 000000Ts330325R2Zh0002.

УДК 519.237.5:369.04:369.5:338.27
DOI 10.17513/snt.40827

CC BY 4.0

СРЕДНЕСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБЪЕМА ФИНАНСИРОВАНИЯ СОЦИАЛЬНОГО И ПЕНСИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Носков С. И., Медведев А. П.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», Иркутск, Российская Федерация, e-mail: sergey.noskov.57@mail.ru

Обеспечение финансовой устойчивости социальной системы в значительной степени зависит от достоверности прогнозных оценок объемов поступлений в пенсионные и социальные фонды. Цель исследования – разработка сценарного подхода к среднесрочному прогнозированию совокупного годового объема финансирования отделения Социального (Пенсионного) фонда России по Иркутской области на период 2023–2027 гг. на основе однородной вложенной кусочно-линейной регрессионной модели первого типа со вторым порядком вложенности. В работе использованы официальные статистические данные за 2012–2022 гг. Модель включает две группы независимых переменных: структурно-демографические показатели (численность застрахованных лиц и пенсионеров) и операционно-финансовые факторы (количество получателей пенсий по старости, страхователей-работодателей, самозанятых, получателей пособий и работающих пенсионеров). Специфика модели позволяет идентифицировать лимитирующие факторы, определяющие итоговый объем финансирования в каждом наблюдении. Для формирования прогнозных оценок использован сценарный подход, включающий пессимистичный, нейтральный и оптимистичный варианты развития событий. Для каждого сценария рассчитаны прогнозные значения объема финансирования и построены векторы срабатываний модели. Анализ векторов срабатывания показал, что структура лимитирующих факторов претерпевает изменения: в пессимистичном и нейтральном сценариях на начальном этапе доминирует численность работающих пенсионеров, тогда как в оптимистичном сценарии и в более поздние годы остальных сценариев ограничение смещается на количество получателей страховых пенсий по старости. Сравнение прогнозных значений с фактическими данными за 2023–2025 гг. выявило систематическое превышение реальных объемов финансирования над оптимистичным прогнозом, обусловленное более высокими темпами индексации пенсий, демографическими сдвигами и изменением структуры отчетности после объединения Пенсионного фонда и Фонда социального страхования. Полученные результаты легли в основу рекомендаций по краткосрочным и долгосрочным мерам управления пенсионной системой.

Ключевые слова: регрессионная модель, вложенная кусочно-линейная регрессия, пенсионный фонд, лимитирующий фактор, прогнозирование

MEDIUM-TERM FORECASTING OF SOCIAL AND PENSION FINANCING

Noskov S. I., Medvedev A. P.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Irkutsk State Transport University", Irkutsk, Russian Federation, e-mail: sergey.noskov.57@mail.ru

Ensuring the financial stability of the social system largely depends on the reliability of forecast estimates of the volume of receipts to pension and social funds. The purpose of the study is to develop a scenario approach to the medium–term forecasting of the total annual volume of financing of the department of the Social (Pension) Fund of Russia in the Irkutsk region for the period 2023–2027 based on a homogeneous nested piecewise linear regression model of the first type with the second order of nesting. The work uses official statistical data for 2012-2022. The model includes two groups of independent variables: structural and demographic indicators (the number of insured persons and pensioners) and operational and financial factors (the number of old-age pension recipients, employer policyholders, the self-employed, benefit recipients and working pensioners). The specifics of the model make it possible to identify the limiting factors that determine the final amount of funding in each observation. A scenario approach was used to form forward-looking estimates, including pessimistic, neutral and optimistic scenarios. For each scenario, the projected values of the amount of financing are calculated and the vectors of model triggers are constructed. The analysis of the response vectors showed that the structure of the limiting factors is undergoing changes: in the pessimistic and neutral scenarios, the number of working pensioners dominates at the initial stage, while in the optimistic scenario and in later years of the remaining scenarios, the restriction shifts to the number of recipients of old-age insurance pensions. Comparison of forecast values with actual data for 2023–2025 It revealed a systematic excess of real funding over the optimistic forecast, due to higher rates of pension indexation, demographic shifts and changes in the reporting structure after the merger of the Pension Fund and the Social Insurance Fund. The results obtained formed the basis for recommendations on short- and long-term pension system management measures.

Keywords: regression model, embedded piecewise linear regression, pension fund, limiting factor, forecasting

Введение

Социальное и пенсионное обеспечение являются фундаментальными элементами социальной стабильности любого государства. Задача точной оценки и прогнозирования объемов финансирования этих систем относится к числу наиболее сложных в экономике ввиду необходимости учета множества взаимовлияющих факторов с возможными нелинейными взаимодействиями. Применение классических линейных регрессионных моделей, как отмечено в работе [1], может давать результаты, противоречащие экономическому смыслу, такие как, например, присутствие в модели отрицательных коэффициентов при заведомо позитивных факторах. Как справедливо отмечается в [2], на функционирование пенсионной системы РФ влияет множество факторов, имеющих различные весовые коэффициенты. Неравномерности в данных, постоянно изменяющаяся структура пенсионного фонда и динамика поведения отдельных величин [3] еще более усложняют процесс моделирования. Отдельные работы посвящены проблеме моделирования пенсионного обеспечения на фоне увеличения такого фактора, как продолжительность жизни [4, 5]. Все это послужило основой тому, что линейные регрессионные модели не всегда позволяют получить корректные с содержательной точки зрения результаты, а это, в свою очередь, обусловливает необходимость поиска и применения более адекватных нелинейных модельных конструкций. В зарубежной и отечественной литературе представлены различные подходы к моделированию и прогнозированию пенсионных систем. Значительное место в них занимают эконометрические [6], актуарные методы [7, 8]. Вместе с тем в последние годы наблюдается рост интереса к применению нейросетевого инструментария [9], который является относительно новым для задач моделирования пенсионных систем и позволяет эффективно учитывать нелинейные взаимосвязи в данных. Отдельно следует выделить класс макроэкономических моделей, позволяющих учитывать комплексное влияние демографических и внешнеэкономических факторов на сбалансированность пенсионной системы [10]. Альтернативным направлением, активно развиваемым в зарубежной научной школе, является применение аппарата стохастического программирования к задачам управления активами и обязательствами пенсионных фондов. Так, предложенная, например, в [11] модель включает в себя детерминированные и стохастические ограничения, в том числе вероятностное ограничение на уровень финансирования, что делает ее репрезентативной для анализа устойчивости подобного рода распределительных систем с элементами накопления.

В настоящем исследовании для прогнозирования объема финансирования пенсионного обеспечения используется однородная вложенная кусочно-линейная регрессия первого типа со вторым порядком вложенности. Основное допущение модели, как это было показано ранее в [12], состоит в том, что итоговый объем финансирования лимитируется наиболее дефицитным фактором (или группой факторов). Различие весовых коэффициентов для каждого фактора в модели позволяет в перспективе проследить обратную связь, выражающуюся в эволюции набора активных ограничений и соответствующем изменении компонент вектора срабатывания переменных в зависимости от реализуемого сценария развития. Это, в свою очередь, соответствует содержательному смыслу функционирования пенсионной системы.

Цель исследования – разработка сценарного подхода к среднесрочному прогнозированию на период с 2023 по 2027 г. с использованием построенной ранее модели, а также анализ полученных прогнозов и их сопоставление с фактическими данными за 2023–2025 гг.

Материалы и методы исследования

В качестве данных для исследования были использованы официальные статистические данные Социального (Пенсионного) фонда России по Иркутской области[1] [12] за 2012–2022 гг. (табл. 1).

В таблице: y – суммарный годовой объем финансирования отделения пенсионного фонда, трлн. руб.; x_1 – количество получателей страховых пенсий по старости, млн чел.; x_2 – количество страхователей-работодателей, млн чел.; x_3 – количество самозанятых граждан, млн чел.; x_4 – количество получателей пособий единовременной выплаты, млн чел.; x_5 – количество застрахованных лиц, млн чел.; x_6 – количество пенсионеров, млн чел.; x_7 – количество работающих пенсионеров, млн чел.

Рассмотрим вопрос построения прогнозного сценария, эффективного в рассматриваемых условиях. Поставленная задача решается на основе модели, параметры и структура которой были идентифицированы ранее в работе [12].

[1] Официальный сайт Социального фонда России. [Электронный ресурс]. URL: sfr.gov.ru/info/statistics/ (дата обращения: 05.04.2026).

Таблица 1

Исходные данные

Год	y	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
2012	0,103585512	0,586742	0,074342	0,066763	0,26071	2,817212	0,742123	0,262122
2013	0,105592312	0,588847	0,074933	0,060879	0,259816	2,820378	0,744887	0,261254
2014	0,106664679	0,592881	0,075988	0,061085	0,258216	2,822129	0,749655	0,263855
2015	0,119298402	0,601038	0,076735	0,061545	0,253036	2,825329	0,750825	0,265854
2016	0,125050089	0,607843	0,073124	0,06144	0,249644	2,851081	0,751863	0,269367
2017	0,134056965	0,611725	0,069998	0,063195	0,246574	2,869847	0,759958	0,161518
2018	0,135003448	0,61616	0,066077	0,064445	0,243367	2,888652	0,763728	0,171851
2019	0,140648848	0,607712	0,061404	0,064749	0,239171	2,894298	0,753849	0,164782
2020	0,147558809	0,596188	0,057703	0,072395	0,233945	2,895499	0,742732	0,155951
2021	0,158311048	0,575763	0,055652	0,109447	0,226483	2,8966	0,722231	0,150093
2022	0,167750348	0,567932	0,046879	0,149731	0,224753	2,8982	0,716026	0,139996

Примечание: составлена авторами на основе источника [12].

В настоящем исследовании акцент смещен с идентификации параметров модели на ее практическое применение для среднесрочного прогнозирования. В качестве модели выбрана однородная вложенная кусочно-линейная регрессия первого типа, доказавшая ранее высокий уровень адекватности и хорошие интерпретационные свойства:

$$y = min\left(min\left(2,0466x^5, 7,769x^6\right), min\left(0,2766x^1, 3,3512x^2, 2,0949x^3, 0,699x^4, 1,1222x^7\right)\right).$$

Приведенная модель одновременно показывает и масштаб системных нагрузок, и наиболее вероятные ограничители бюджета. Так, например, высокий коэффициент 7,769 при x_6 указывает на значимость демографической нагрузки как системного фактора, задающего масштаб финансовых потоков, но в рамках операции минимума такой фактор редко становится лимитирующим из-за своей большой величины. Напротив, низкий коэффициент 0,2766 при x_1 делает его естественным кандидатом на роль «узкого места» при прогнозировании: даже при значительной численности получателей страховых пенсий произведение остается малым и ограничивает общий объем финансирования.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим один из подходов к решению указанной задачи. Целесообразно разработать три варианта прогнозов – пессимистичный, оптимистичный и нейтральный, как это показано в [13], и затем сравнить полученные данные с официальной статистикой Социального фонда РФ на пересекающихся периодах (2023–2025 гг.). Первый основывается на предположении о наихудшем развитии событий, второй – о наилучшем. Третий вариант базируется на гипотезе о том, что тенденции, наблюдавшиеся на ретроспективном интервале (2012–2022 гг.), сохранятся и в будущем. Следует отметить, что применение стандартных методов экстраполяции, в частности построение линейных трендов для прогнозирования значений независимых переменных, в контексте данной задачи представляется методологически некорректным. Динамика таких показателей, как численность самозанятых или количество получателей страховых пенсий, подвержена влиянию разнонаправленных внешних факторов (изменения в законодательстве, «демографические ямы»), что обусловливает наличие структурных сдвигов во временных рядах и нарушает гипотезу о постоянстве трендовой компоненты. В связи с этим для среднесрочного прогнозирования (на 2023–2028 гг.) значения независимых переменных модели будем задавать на основе экспертных оценок, а затем рассчитывать значение выходной переменной для каждого потенциального наблюдения. Данный подход был реализован авторами при помощи специализированного программного комплекса [14].

В табл. 2–4, а также на рисунке приведены прогнозные значения показателей для трех сценариев по заданным экспертами значениям независимых переменных. Приведем также вектор срабатываний [15] $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n)$ для каждого прогнозного периода с целью оценки динамики изменения номеров лимитирующих факторов. Этот вектор указывает на номер независимой переменной, на которой сработал (реализовался) минимум в каждом из наблюдений.

Таблица 2

Пессимистичный сценарий

Год	y	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
2023	0,16833	0,6211	0,0582	0,1455	0,2619	2,813	0,679	0,15
2024	0,171697	0,63	0,0675	0,1552	0,2716	2,8227	0,6693	0,153
2025	0,172681	0,6243	0,0772	0,1649	0,2813	2,8324	0,6596	0,156
2026	0,174867	0,6322	0,0854	0,1746	0,291	2,8421	0,6499	0,158
2027	0,175226	0,6335	0,098	0,1843	0,3007	2,8518	0,6402	0,159

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 3

Нейтральный сценарий

Год	y	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
2023	0,170574	0,6305	0,0582	0,1455	0,2619	2,813	0,679	0,152
2024	0,171697	0,6311	0,0679	0,1552	0,2716	2,8227	0,6693	0,153
2025	0,175063	0,6341	0,0776	0,1649	0,2813	2,8324	0,6596	0,156
2026	0,175669	0,6351	0,0873	0,1746	0,291	2,8421	0,6499	0,158
2027	0,177328	0,6411	0,097	0,1843	0,3007	2,8518	0,6402	0,16

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 4

Оптимистичный сценарий

Год	y	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
2023	0,181616	0,6566	0,06	0,1521	0,2619	2,9112	0,7	0,165
2024	0,19055	0,6889	0,065	0,1625	0,2811	2,9151	0,69	0,175
2025	0,20095	0,7265	0,064	0,1718	0,2912	2,9215	0,68	0,185
2026	0,203439	0,7355	0,066	0,1826	0,305	2,9311	0,67	0,187
2027	0,205929	0,7445	0,68	0,1914	0,3112	2,9402	0,66	0,191

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Как было показано ранее, для периода наблюдений 2012–2022 гг. он имеет следующий вид:

$$\lambda = (3,3,3,3,3,3,3,3,3,5,1).$$

$$\lambda_i = (7,7,1,1,1).$$

$$\lambda_i = (7,7,7,1,1).$$

$$\lambda_i = (1,1,1,1,1).$$

В связи с объединением Пенсионного фонда России (ПФР) и Фонда социального страхования (ФСС) в 2023 г. изменилась структура официальной статистической отчетности. Вследствие этого оказалось существенно затруднено выделение показателей, характеризующих исключительно деятельность бывшего ПФР. В сложившихся условиях представляется целесообразным оценить совокупный объем финансирования по направлениям, представляющим исследовательский интерес. Сравним модельные значения показателей с наблюдаемыми статистическими данными за 2023–2025 гг. (табл. 5, рисунок) и определим тип наблюдаемого сценария.

Превышение фактических объемов финансирования пенсионной составляющей (порядка 10 %) над оптимистичным прогнозом, построенным по данным 2012–2022 гг., может быть объяснено прежде всего более высокими темпами индексации пенсий и социальных выплат в 2023–2025 гг. по сравнению с заложенными в сценарий, а также вследствие демографических тенденций и расширения льготных категорий.

Таблица 5

Наблюдаемый и вероятные сценарии

Год	Фактический y (трлн руб.)	Оптимистичный сценарий	Нейтральный сценарий	Пессимистичный сценарий
2023	0,1801	0,181616	0,170574	0,16833
2024	0,2031	0,19055	0,171697	0,171697
2025	0,2266	0,20095	0,175063	0,172681

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

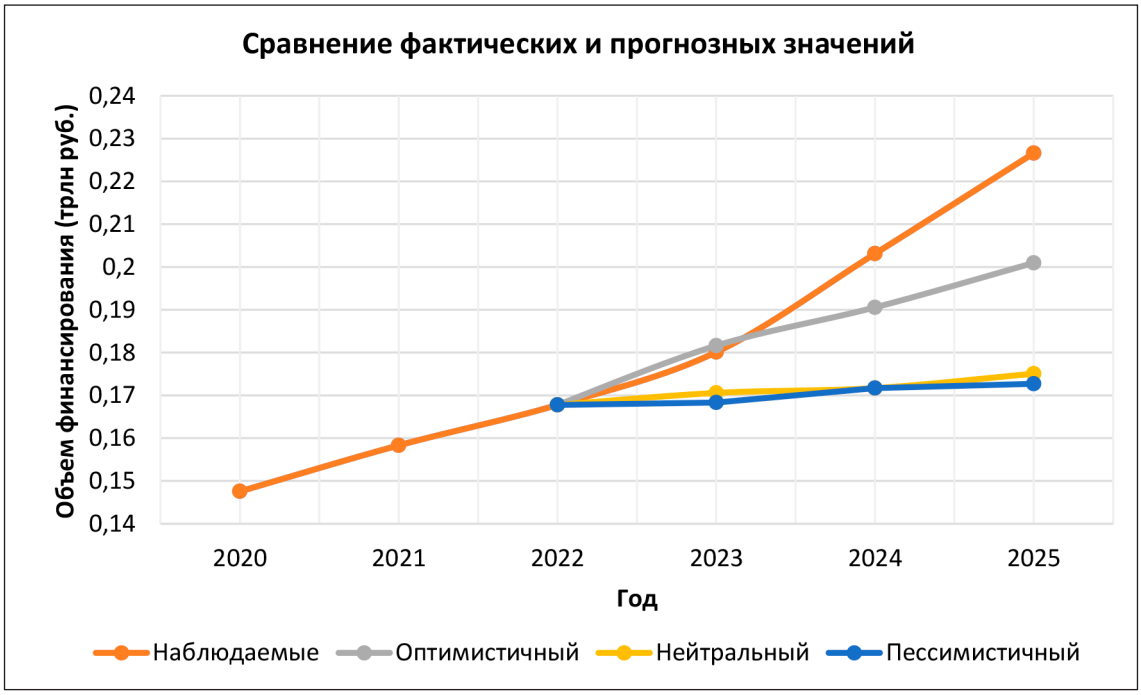


График наблюдаемых и расчетных значений для каждого сценария
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Кроме того, объединение ПФР и ФСС в 2023 г. изменило структуру отчетности, и, несмотря на попытки выделить чистую пенсионную часть, некоторые виды ранее не учитывавшихся выплат могли быть переклассифицированы, искусственно увеличивая соответствующий показатель. Свою роль сыграли также региональные особенности Иркутской области (миграция, возрастная структура), а также единовременные выплаты и доплаты, не предусмотренные прогнозной моделью. В совокупности эти факторы привели к тому, что реальные значения систематически превосходят даже оптимистичные прогнозные оценки.

Выводы

1. Адекватность модели. Построенная ранее модель (1) имеет среднюю относительную ошибку аппроксимации 7,90 %, что является вполне приемлемым показателем. Данное исследование также подтверждает ее пригодность и для случаев сценарного прогнозирования.

2. Выявленная ранее двухуровневая структура, состоящая из структурно-демографического каркаса (переменные x_5, x_6) и операционно-финансового контура (переменные x_1, x_2, x_3, x_4, x_7), согласуется с другими работами и позволяет в перспективе проводить оценку влияния долгосрочных и краткосрочных факторов.

3. Лимитирующие факторы. В оптимистичном сценарии с 2025 г. ограничение смещается на количество получателей страховых пенсий по старости (x_1), что свидетельствует о потенциальной возможности смены «узкого места» при успешной реализации мер по стимулированию самозанятости. В других сценариях указанный

фактор также присутствует, но не всегда является лидирующим.

4. Сопоставление с фактическими данными. Сравнение прогнозов с официальной статистикой за 2023–2025 гг. показало, что фактические значения систематически превышают оптимистичный прогноз (около 10 %). Это объясняется более высокими темпами индексации пенсий, демографическими изменениями, а также изменением структуры отчетности после объединения ПФР и ФСС в 2023 г.

5. Практические рекомендации. На основе анализа лимитирующих факторов предложены меры по управлению пенсионной системой: в краткосрочной перспективе – усиление администрирования и стимулирования уплаты взносов самозанятыми; в долгосрочной – реализация демографической политики, направленной на оптимизацию соотношения работающих и пенсионеров.

Таким образом, в настоящем исследовании решена задача среднесрочного прогнозирования объема финансирования отделения Социального (Пенсионного) фонда России по Иркутской области на основе однородной вложенной кусочно-линейной регрессии первого типа. Использован сценарный подход, включающий три варианта развития событий: пессимистичный, нейтральный и оптимистичный. Для каждого сценария рассчитаны прогнозные значения выходной переменной y (трлн руб.) на период с 2023 по 2027 г.

Перспективным направлением дальнейшего исследования является возможность расширения модели за счет включения в нее макроэкономических показателей (например, инфляции, уровня безработицы в регионе), а также проведение верификации модели на данных других регионов.

Список литературы

1. Носков С. И., Медведев А. П. Реализация конкурса регрессионных моделей при оценке объема финансирования социального и пенсионного обеспечения // Инженерный вестник Дона. 2024. № 4. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_32N4y24_Noskov.pdf_92162022df.pdf (дата обращения: 05.04.2026).

2. Семерикова М. С., Волкова Т. Г. Прогнозирование доходов бюджета ПФР с использованием эконометрических моделей // Социально-экономическое управление: теория и практика. 2019. № 4 (39). С. 52–55. URL: https://istu.ru/storage/documents/izdat/seu/2019-4/Семерикова,%20Волкова.pdf (дата обращения: 09.04.2026).

3. Амирханова Р. А. Динамика российской пенсионной системы: возможности и ограничения (методы обработки и анализа развития пенсионной системы) // Статистика и Экономика. 2020. Т.17. № 5. С. 16–26. DOI: 10.21686/2500-3925-2020-5-16-26.

4. Mircea I., Covrig M., Serban R. Some Mathematical Models for Longevity Risk in the Annuity Market and Pension Funds // Procedia Economics and Finance. 2014. Vol. 15. P. 115–122. DOI: 10.1016/S2212-5671(14)00455-9.

5. Bikker J., Broeders D., Hollanders D., Ponds E. Pension Funds' Asset Allocation and Participant Age: A Test of the Life-Cycle Model // Journal of Risk and Insurance. 2012. Vol. 79. Is. 3. P. 595–895. URL: https://www.jstor.org/stable/23250863 (дата обращения: 12.05.2026).

6. Третьякова О. В., Буданова Ю. В. Сравнительный анализ методов прогнозирования финансовых результатов // Экономика и бизнес: теория и практика. 2019. № 5–1. С. 205–209. DOI: 10.24411/2411-0450-2019-10709.

7. Соловьев А. К. Актуарный прогноз долгосрочного развития пенсионной системы России // Социальная политика и социальное партнерство. 2012. № 6. С. 25–35. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17973287.

8. Батаев А. В. Прогноз дефицита пенсионного фонда России на основе актуарного моделирования // Молодой ученый. 2015. № 7 (87). С. 349–355. URL: https://moluch.ru/archive/87/16507 (дата обращения: 10.04.2026).

9. Гаврилюк В. И. Нейросетевой инструментарий для прогнозирования доходности ПИФов // Вестник РЭА им. Г. В. Плеханова. 2013. № 4 (58). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/neyrosetevoy-instrumentariy-dlya-prognozirovaniya-dohodnosti-pifov (дата обращения: 09.04.2026).

10. Потапенко В. В. Модель пенсионной системы России и прогнозные расчеты на ее основе // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2010. № 8. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/model-pensionnoy-sistemy-rossii-i-prognoznye-raschety-na-ee-osnove (дата обращения: 10.04.2026).

11. El Goumi B., El Khomssi M., Fikri M. Model for the management of pension fund with deterministic and stochastic parameters // 2016 3rd International Conference on Logistics Operations Management (GOL). 2016. P. 1–5. DOI: 10.1109/GOL.2016.7731665.

12. Носков С. И., Медведев А. П. Моделирование объема финансирования пенсионного обеспечения с применением вложенной однородной кусочно-линейной регрессии // Современные наукоемкие технологии. 2026. № 2. С. 56–62. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40671 (дата обращения: 09.04.2026). DOI: 10.17513/snt.40671.

13. Базилевский М. П., Врублевский И. П., Носков С. И., Яковчук И. С. Среднесрочное прогнозирование эксплуатационных показателей функционирования Красноярской железной дороги // Фундаментальные исследования. 2016. № 10–3. С. 471–476. URL: https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40879 (дата обращения: 16.04.2026).

14. Носков С. И., Медведев А. П. Программа группировки переменных и идентификации параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессии первого типа. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025669430. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения». Бюллетень № 8. 2025. [Электронный ресурс]. URL: https://fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=PrEVM&id=E342E7FD-C503-405E-9088-9F20BE4C8FFD (дата обращения: 17.04.2026).

15. Носков С. И., Беляев С. В. Способ корректировки вектора срабатываний при построении кусочно-линейных регрессионных моделей // Информатика и системы управления. 2025. № 1 (83). С. 126–134. URL: https://ics.togudv.ru/media/2025/N83_13.pdf (дата обращения: 09.04.2026). DOI: 10.22250/18142400_2025_83_1_126.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 004.89:681.5:625.7/.8
DOI 10.17513/snt.40828

CC BY 4.0

МУЛЬТИАГЕНТНЫЙ ПОДХОД К АВТОМАТИЗАЦИИ СКВОЗНОГО ПРОЦЕССА ОЦЕНКИ ДОРОЖНЫХ УСЛОВИЙ И РАСЧЕТА БЕЗОПАСНЫХ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ

Остроух А. В. ORCID ID 0000-0002-8887-6132,
Подберёзкин А. А. ORCID ID 0009-0001-6192-5029,
Пронин Ц. Б., Поспелов П. И.,
Котов А. А. ORCID ID 0000-0002-6855-0688

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», Москва, Российская Федерация, e-mail: ostroukh@mail.ru

В статье исследуется применение парадигмы мультиагентных систем для автоматизации сложной инженерной задачи оценки дорожных условий и расчета безопасных скоростей движения. Целью исследования является разработка мультиагентного подхода к декомпозиции данной задачи на кооперированные автономные подпроцессы с целью повышения отказоустойчивости, масштабируемости и производительности расчетных комплексов. Актуальность работы обусловлена необходимостью преодоления ограничений традиционной монолитной архитектуры при обработке больших объемов разнородных данных и параллельном выполнении множества вычислительных операций. Методология исследования базируется на агентно-ориентированной парадигме с разделением ролей специализированных агентов и организации их взаимодействия через протоколы запрос – ответ, публикация – подписка и аукцион для распределения задач. Предлагаемая архитектура включает агент-парсер для извлечения данных из документов, агент-валидатор для проверки соответствия нормативным требованиям, агент-расчетчик на основе классических методов расчета скорости движения автомобилей и агент-визуализатор для формирования выходных данных. Особое внимание уделяется вопросам отказоустойчивости и оптимального распределения вычислительных ресурсов. В результате создан действующий прототип мультиагентной системы, демонстрирующий возможность параллельной обработки данных, автоматического восстановления при сбоях отдельных агентов и масштабирования при увеличении объема входных данных. Разработанный подход позволяет повысить интегральную надежность расчетного комплекса и сократить общее время выполнения сквозного процесса за счет параллелизации операций на этапах парсинга, валидации и визуализации.

Ключевые слова: мультиагентная система, распределенное управление, автоматизация инженерных расчетов, кооперация агентов, оркестрация, отказоустойчивость, масштабирование, оценка дорожных условий, безопасность движения

MULTI-AGENT APPROACH TO AUTOMATING THE END-TO-END PROCESS OF ROAD CONDITION ASSESSMENT AND SAFE SPEED CALCULATION

Ostroukh A. V. ORCID ID 0000-0002-8887-6132,
Podberezkin A. A. ORCID ID 0009-0001-6192-5029,
Pronin Ts. B., Pospelov P. I.,
Kotov A. A. ORCID ID 0000-0002-6855-0688

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)", Moscow, Russian Federation, e-mail: ostroukh@mail.ru

The article explores the application of the multi-agent system paradigm for automating the complex engineering task of road condition assessment and safe speed calculation. The aim of the study is to develop a multi-agent approach to decomposing this task into cooperative autonomous subprocesses in order to improve fault tolerance, scalability, and performance of calculation complexes. The relevance of the work is due to the need to overcome the limitations of traditional monolithic architecture when processing large volumes of heterogeneous data and parallel execution of multiple computational operations. The research methodology is based on the agent-oriented paradigm with role separation of specialized agents and organization of their interaction through request-response, publish-subscribe, and auction protocols for task distribution. The proposed architecture includes a parser agent for extracting data from documents, a validator agent for checking compliance with regulatory requirements, a calculator agent based on classical methods of vehicle speed calculation, and a visualizer agent for generating output data. Special attention is paid to issues of fault tolerance and optimal distribution of computing resources. As a result, a functioning prototype of a multi-agent system was created, demonstrating the capability of parallel data processing, automatic recovery from failures of individual agents, and scalability with increasing input data volume. The developed approach allows increasing the integral reliability of the calculation complex and reducing the total execution time of the end-to-end process due to parallelization of operations at the stages of parsing, validation, and visualization.

Keywords: multi-agent system, distributed control, automation of engineering calculations, agent cooperation, fault tolerance, orchestration, scalability, road condition assessment, traffic safety

Введение

Современные задачи транспортного моделирования и оценки дорожных условий характеризуются высокой сложностью, необходимостью обработки разнородных данных и выполнением множества взаимосвязанных вычислительных операций. Традиционные подходы к автоматизации, основанные на монолитной архитектуре, обладают рядом существенных ограничений: низкая отказоустойчивость (сбой в одном модуле останавливает весь процесс), сложность масштабирования при росте объемов данных и неоптимальное использование вычислительных ресурсов [1, 2].

Развитие методов искусственного интеллекта открывает новые возможности для построения распределенных интеллектуальных систем [3, 4]. Особый интерес представляет парадигма *мультиагентных систем,* в рамках которой сложная задача декомпозируется на множество автономных, кооперирующихся агентов, каждый из которых специализируется на решении конкретной подзадачи [5]. Такой подход позволяет реализовать распределенное автоматизированное управление процессом, повысить отказоустойчивость и гибкость системы [6].

Цель исследования – разработка мультиагентного подхода к автоматизации сквозного процесса оценки дорожных условий и расчета безопасных скоростей движения.

Научная новизна работы заключается в создании архитектуры кооперирующихся интеллектуальных агентов с разделением ролей, исследовании протоколов их взаимодействия и разработке методов разрешения конфликтов при параллельном выполнении задач с формализацией (аксиоматизацией) проектных решений и правил взаимодействия. Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания отказоустойчивых, масштабируемых систем автоматизации для решения комплексных инженерных задач в условиях растущих объемов данных и требований к скорости вычислений [7, 8].

Материал и методы исследования

В основе методологии проектирования лежит *агентно-ориентированная парадигма,* предполагающая декомпозицию сложной задачи на множество автономных, слабо связанных компонентов – агентов, взаимодействующих через специализированные протоколы, в том числе в задачах поддержки принятия решений [9, 10].

Архитектура мультиагентной системы

Разработанная система включает четыре типа специализированных агентов, каждый из которых отвечает за конкретную функцию в сквозном процессе (рис. 1).

Агент-парсер (Parser Agent) отвечает за извлечение структурированных данных из разнородных источников – проектных документов, файлов CSV/Excel, PDF-файлов с пикетажными отметками, баз данных параметров транспортных средств. Агент способен работать параллельно с несколькими входными потоками данных. На этапе предварительной типизации входных файлов агент может выполнять классификацию проектной документации по типам с учетом синтаксических связей и графовых представлений текста [11].

Агент-валидатор (Validator Agent) выполняет проверку корректности и физической реализуемости извлеченных данных. Валидация включает контроль соответствия ГОСТам, проверку допустимых диапазонов значений (например, перепадов высот между пикетами не более 20 м) и логическую согласованность параметров (связь между уклонами и радиусами кривых).

Агент-расчетчик (Calculator Agent) реализует детерминированное ядро моделирования на основе теории расчета скорости движения автомобилей применительно к проектированию автомобильных дорог и уравнений динамики транспортного средства. Агент может масштабироваться горизонтально – при увеличении объема расчетов запускаются дополнительные экземпляры агента, распределяющие нагрузку.

Агент-визуализатор (Visualizer Agent) отвечает за формирование выходных данных: построение графиков скоростных режимов, формирование таблиц результатов, генерацию аналитических отчетов и подготовку данных для экспорта в форматы PDF, Excel, JSON.

Протоколы взаимодействия агентов

Взаимодействие агентов организовано на основе асинхронной передачи сообщений через брокер (RabbitMQ). При промышленной эксплуатации требуется защищенный контур обмена сообщениями и регламентированный доступ к сервисам управления и брокеру сообщений (аутентификация/авторизация, контроль целостности), что соответствует подходам к защищенным цифровым платформам информационно-управляющих систем транспорта [12]. Используются следующие типы протоколов:

– *протокол запрос – ответ* – для синхронного взаимодействия (агент запрашивает данные у другого агента и ожидает ответа);

– *протокол публикация – подписка* – для оповещения о завершении этапов (агент публикует событие, подписчики реагируют);

– *протокол аукцион* – для распределения задач между несколькими экземплярами однотипных агентов (агенты «торгуются» за право выполнения задачи на основе текущей загрузки) [13].

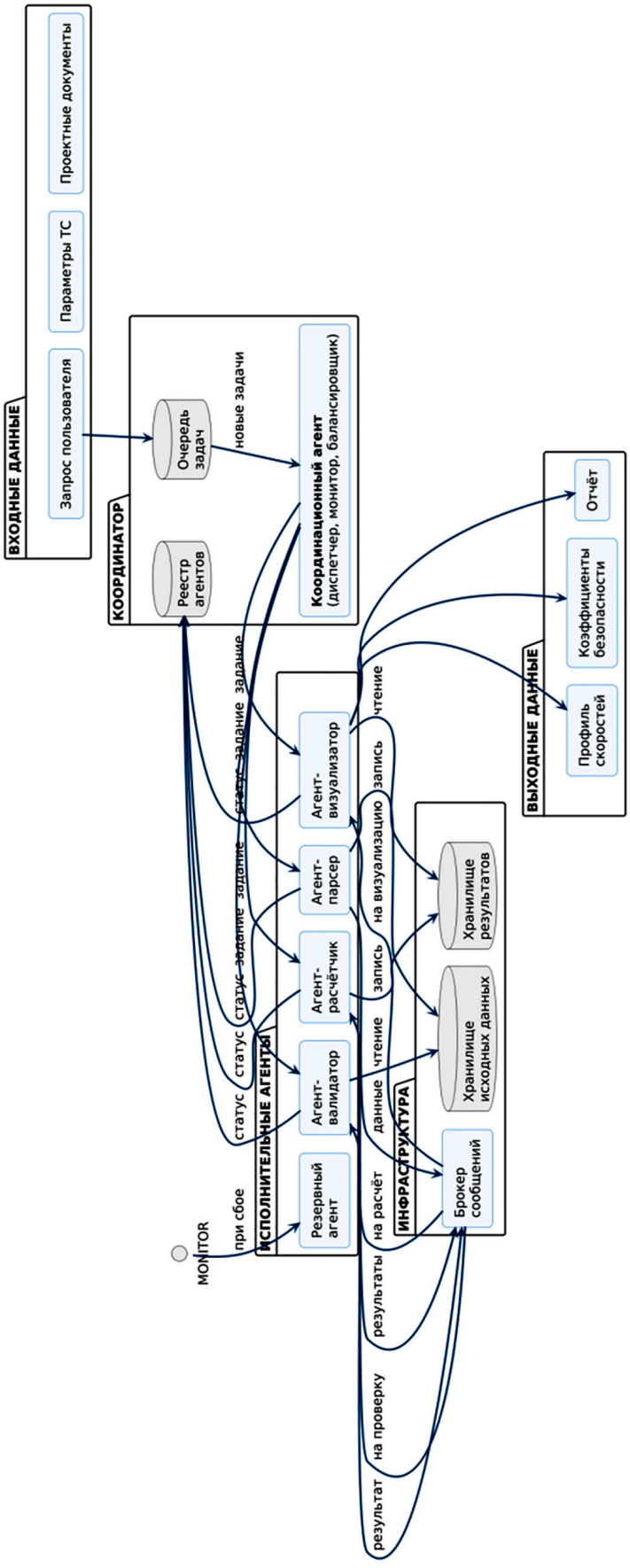


Рис. 1. Архитектура мультиагентной системы для оценки дорожных условий и расчета безопасных скоростей
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Механизмы оркестрации

Управление последовательностью выполнения задач осуществляется *координационным агентом,* который:

– инициирует рабочий процесс при поступлении новой задачи;

– отслеживает статусы выполнения;

– обрабатывает исключительные ситуации;

– при необходимости перезапускает отказавшие агенты или перенаправляет задачи на резервные экземпляры.

Методы разрешения конфликтов

При параллельном выполнении задач возможны конфликтные ситуации:

– *конфликт данных* – два агента одновременно пытаются модифицировать один ресурс (разрешается через механизм блокировок с таймаутом);

– *конфликт результатов* – агенты-расчетчики выдают противоречивые результаты (запускается процедура голосования или повторный расчет с привлечением дополнительного агента-арбитра);

– *конфликт ресурсов* – недостаток вычислительных мощностей для всех агентов (используется приоритизация задач).

Результаты исследования и их обсуждение

В результате работы создан действующий прототип мультиагентной системы MAS-TRANS (Multi-Agent System for Transport). Ключевые *технические характеристики* системы:

– количество одновременно работающих агентов: до 50 экземпляров;

– типы агентов: 4 базовых (парсер, валидатор, расчетчик, визуализатор) + координационный агент;

– среднее время реакции агента: < 100 мс;

– пропускная способность: до 100 задач в минуту.

Таблица 1

Сравнение отказоустойчивости мультиагентной и монолитной архитектур

Показатель	Монолитная архитектура	Мультиагентная система	Улучшение
Вероятность успешного завершения при отказе одного модуля	0 %	100 % (автоперезапуск)	–
Вероятность успешного завершения при отказе двух модулей	0 %	87 %	–
Среднее время восстановления после сбоя	5 мин (ручной перезапуск)	2,4 с (автоматический)	в 125 раз
Коэффициент готовности (availability)	0,94	0,998	+6,2 %
Интегральный показатель надежности	1,0 (базовый)	3,2	в 3,2 раза

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

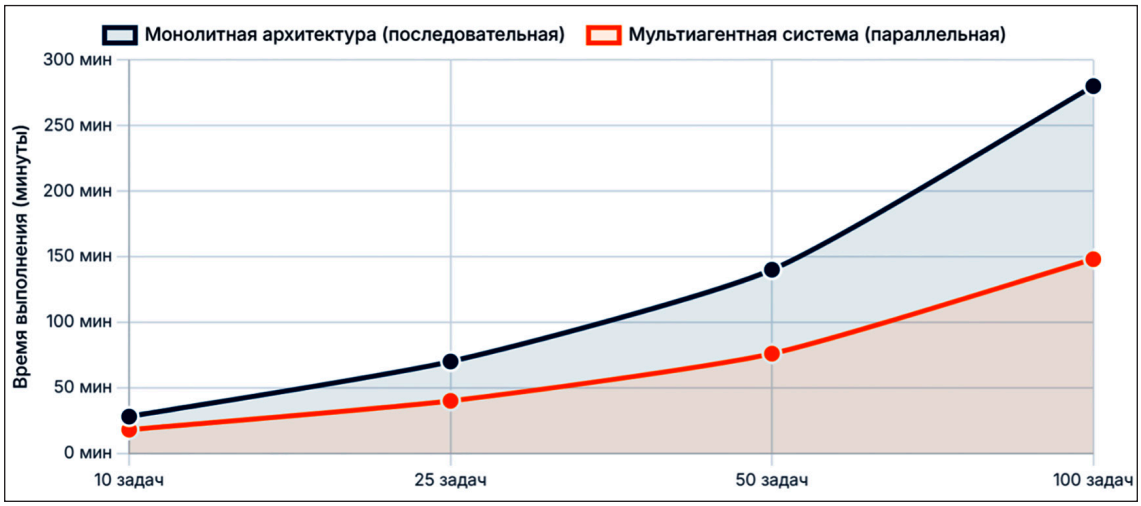


Рис. 2. Зависимость времени выполнения от количества параллельных задач
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 2

Сравнение времени выполнения сквозного процесса

Количество задач	Монолитная архитектура (последовательная)	Мультиагентная система (параллельная)	Сокращение времени
10 задач	28 мин	18 мин	36 %
25 задач	70 мин	40 мин	43 %
50 задач	140 мин	76 мин	46 %
100 задач	280 мин	148 мин	47 %

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 3

Эффективность использования вычислительных ресурсов

Показатель	Без балансировки (round-robin)	С балансировкой (аукцион)
Средняя загрузка CPU	42 %	78 %
Пиковая загрузка CPU	100 % (перегрузка)	89 %
Количество отказов по таймауту	23	2
Среднее время ожидания задачи	5,2 с	1,8 с

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Оценка отказоустойчивости

Для оценки надежности системы проводилось стресс-тестирование с имитацией отказов отдельных агентов (табл. 1). Сравнение выполнялось с монолитной архитектурой, где любой сбой приводит к остановке всего процесса.

Оценка производительности и масштабирования

Для оценки эффективности параллельной обработки проводилось тестирование на наборе из 100 различных проектных документов (рис. 2). Результаты тестирования представлены в табл. 2.

Среднее сокращение времени выполнения сквозного процесса составило 47 % за счет параллелизации операций на этапах парсинга, валидации и визуализации.

Оценка распределения вычислительных ресурсов

Тестирование механизма аукциона для распределения задач показало следующую эффективность (табл. 3).

Использование протокола аукциона позволило повысить эффективность использования вычислительных ресурсов на 86 % и сократить время ожидания задач в 2,9 раза.

Результат функционирования проиллюстрирован на примере кейса: на вход системы поступает пакет из 50 проектных документов (рис. 3). Координационный агент инициирует рабочий процесс, запуская 10 экземпляров агентов-парсеров параллельно. После завершения парсинга данные передаются пяти агентам-валидаторам. При обнаружении ошибки в одном документе (некорректный формат) соответствующий агент-парсер перезапускается автоматически, не влияя на обработку остальных документов. После успешной валидации запускаются 20 агентов-расчетчиков, распределяющих нагрузку через протокол аукциона. Результаты агрегируются и передаются агенту-визуализатору для формирования итогового отчета. Весь процесс занимает 76 мин (против 140 мин при последовательной обработке).

Предложенный мультиагентный подход демонстрирует существенные преимущества перед традиционной монолитной архитектурой при автоматизации сложных инженерных задач. Основные *преимущества* включают:

– *отказоустойчивость* – выход из строя одного агента не останавливает весь процесс; система автоматически восстанавливается или перенаправляет задачи на резервные экземпляры;

– *масштабируемость* – возможность горизонтального масштабирования путем добавления новых экземпляров агентов под растущую нагрузку;

– *оптимизация ресурсов* – интеллектуальное распределение задач между агентами позволяет максимально эффективно использовать доступные вычислительные мощности;

– *гибкость* – возможность добавления новых типов агентов без изменения существующей архитектуры.

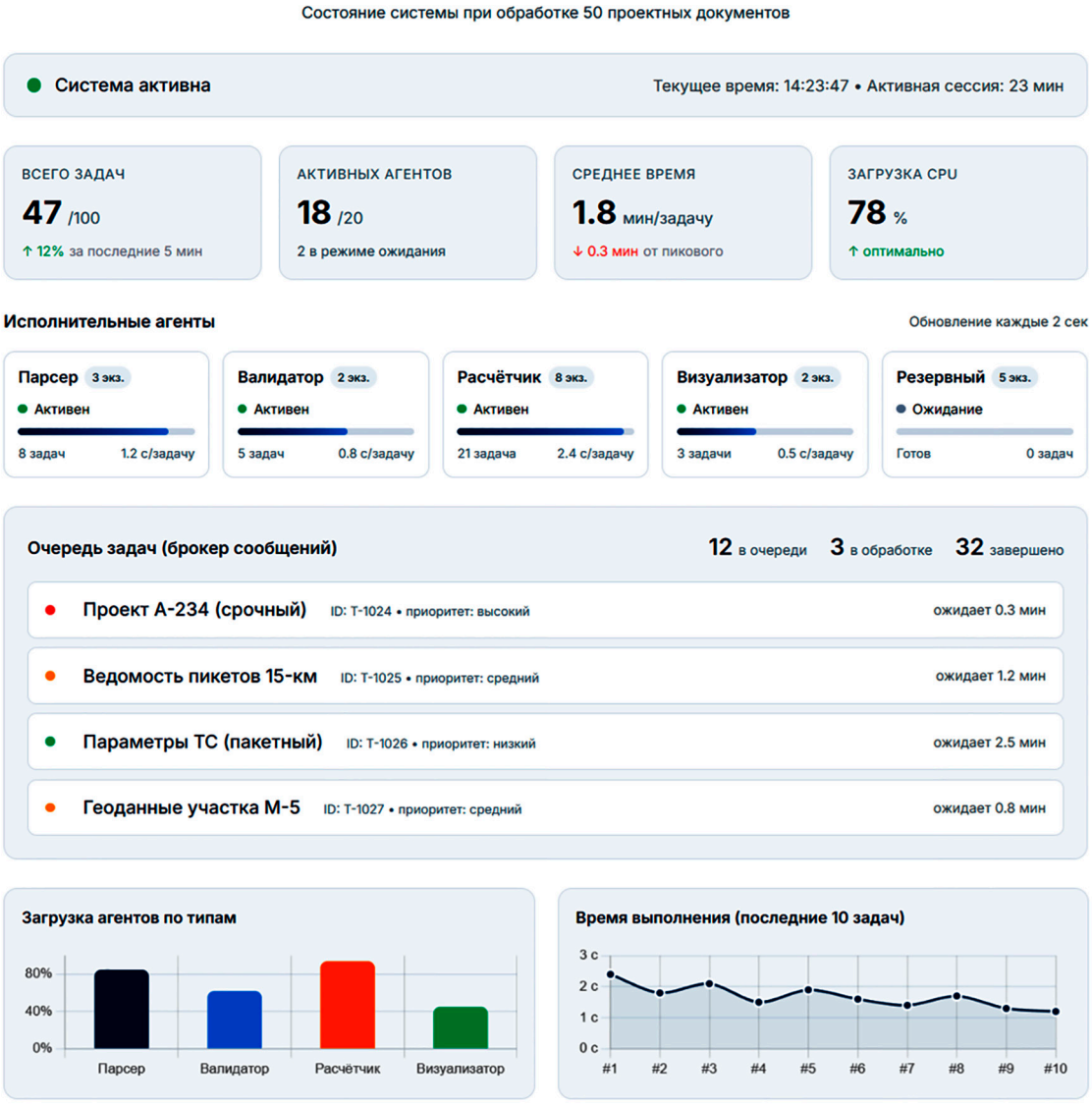


Рис. 3. Мониторинг работы мультиагентной системы в реальном времени
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

В отличие от процессных систем с жестко заданной последовательностью операций (например, Apache Airflow), предложенная мультиагентная система обладает автономностью и способностью к самоорганизации. Агенты не просто выполняют предопределенные шаги, а принимают решения о распределении задач, разрешении конфликтов и восстановлении после сбоев на основе локальной информации и протоколов взаимодействия.

Выявленные *проблемы и ограничения* включают следующие аспекты.

Сложность отладки. Распределенный характер системы и асинхронное взаимодействие агентов затрудняют трассировку выполнения отдельных задач и выявление причин ошибок. Требуется разработка специализированных инструментов мониторинга и логирования.

Накладные расходы на коммуникацию. При большом количестве агентов (более 100) возрастает нагрузка на брокер сообщений, что может приводить к задержкам. Оптимальная конфигурация требует балансировки между степенью параллелизма и накладными расходами [14, 15].

Согласованность данных. При параллельном выполнении задач необходимо обеспечивать консистентность общих данных (например, при одновременной записи в одно хранилище). Используемые механизмы блокировок могут снижать производительность.

Перспективы развития связаны с углублением интеллектуальности агентов и расширением сферы применения подхода.

Планируется:

− внедрение *самообучающихся агентов,* способных адаптировать свое поведение на основе анализа предыдущих выполнений;

− разработка *агентов-предсказателей,* прогнозирующих возможные сбои и заранее перераспределяющих нагрузку;

− интеграция с *облачными платформами* для эластичного масштабирования в реальном времени;

− создание *федеративной мультиагентной системы,* объединяющей вычислительные ресурсы нескольких организаций для решения сверхсложных задач.

Реализация этих направлений позволит перейти к полностью автономным, самоорганизующимся системам автоматизации, способным адаптироваться к изменяющимся условиям и самостоятельно оптимизировать свою работу без вмешательства человека.

Заключение

В статье представлен мультиагентный подход к автоматизации сквозного процесса оценки дорожных условий и расчета безопасных скоростей движения. Разработана архитектура системы, включающая специализированных агентов с разделением ролей (парсер, валидатор, расчетчик, визуализатор) и координационного агента, управляющего взаимодействием.

Ключевыми результатами являются:

1. Архитектура мультиагентной системы с протоколами взаимодействия (запрос – ответ, публикация – подписка, аукцион) и механизмами разрешения конфликтов.

2. Действующий прототип, демонстрирующий повышение интегральной надежности в 3,2 раза по сравнению с монолитной архитектурой за счет автоматического восстановления после сбоев.

3. Сокращение общего времени выполнения сквозного процесса на 47 % благодаря параллелизации операций и интеллектуальному распределению вычислительных ресурсов через протокол аукциона.

Исследование подтверждает эффективность применения парадигмы мультиагентных систем для декомпозиции сложных инженерных задач на кооперированные автономные подпроцессы. Такой подход повышает отказоустойчивость, позволяет оптимально распределять вычислительные ресурсы и создает основу для построения самоорганизующихся систем автоматизации следующего поколения.

Дальнейшая работа будет направлена на внедрение самообучающихся агентов, способных адаптировать свое поведение на основе анализа предыдущих выполнений, и интеграцию разработанной системы в единую AI-Native платформу проектирования. При интеграции в виде цифровой платформы требуется формализованная оценка ее эффективности.

Список литературы

1. Андриянов О. И. Влияние цифровизации и искусственного интеллекта на развитие устойчивых городских транспортных систем // Управление в современных системах. 2024. № 4 (44). С. 4–13. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_80523645_27064187.pdf (дата обращения: 10.05.2026). DOI: 10.24412/2311-1313-44-4-13. EDN: YLMTUS.

2. Подберёзкин А. А., Борзенков А. М., Остроух А. В., Пронин Ц. Б., Тетченко О. А. Исследование применения компьютерного зрения и генетического алгоритма кластеризации для мониторинга состояния дорожного покрытия // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 12. С. 139–144. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_88836556_63595101.pdf (дата обращения: 10.05.2026). DOI: 10.17513/snt.40615. EDN: BNRLNC.

3. Андриенко В. А., Кияев В. И., Котова С. А. Умные дороги: Использование интеллектуальных систем и мультиагентных технологий // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 2 (42). С. 5–19. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_82520669_17147653.pdf (дата обращения: 10.05.2026). DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-5-19. EDN: PPPJTS.

4. Лебедев А. Р., Рогавичене Л. И. Интеграция интеллектуальных транспортных систем и моделей управления в условиях цифровизации мегаполиса // Современные проблемы инновационной экономики. 2025. № 12 (12). С. 210–215. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_88780410_75095040.pdf (дата обращения: 10.05.2026). DOI: 10.52899/978-5-88303-740-4_210. EDN: NDCVYC.

5. Макаров О. Н., Абдуряхимова Э. Б. Современные транспортные мультиагентные системы: Влияние на культурный капитал, экономику и цифровую трансформацию // Наука Красноярья. 2024. Т. 13. № 2. С. 55–71. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_68499492_46413857.pdf (дата обращения: 10.05.2026). DOI: 10.12731/2070-7568-2024-13-2-246. EDN: TKKKBS.

6. Макаров О. Н., Абдуряхимова Э. Б., Дьякова П. С. Обоснование принятия решений в транспортной политике на основе мультиагентного подхода (на примере транспортной стратегии России) // Наука Красноярья. 2024. Т. 13. № 3. С. 131–150. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_75139900_49636971.pdf (дата обращения: 10.05.2026). DOI: 10.12731/2070-7568-2024-13-3-253. EDN: LOQXLC.

7. Поспелов П. И., Косцов А. В., Мартяхин Д. С., Кортиев А. Л., Комарова Т. К. Исследование границ уровней удобства движения при передвижениях на автомобиле на улично-дорожной сети города средней крупности // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. № 2 (72). С. 183–191. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_82864435_79251992.pdf (дата обращения: 10.05.2026). DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.16. EDN: LVKRRO.

8. Зотов М. Л. Мультиагентная система с нечеткой интеграцией для автономного движения в умном городе // Вестник науки. 2026. Т. 5. № 3 (96). С. 521–542. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_89150164_33474709.pdf (дата обращения: 10.05.2026). EDN: HEXZZA.

9. Уваев М. Ю., Шиков А. Н. Применение агентно-ориентированного моделирования системы поддержки принятия решений на предприятии // Автоматизация. Современные технологии. 2025. Т. 79. № 11. С. 504–508. URL: https://

www.elibrary.ru/item.asp?id=83179444 (дата обращения: 13.05.2026). DOI: 10.36652/0869-4931-2025-79-11-504-508. EDN: RYLWTK.

10. Смирнов А. В., Левашова Т. В., Пономарев А. В. Поддержка принятия решений на основе человеко-машинного коллективного интеллекта: современное состояние и коллективная модель // Информационно-управляющие системы. 2020. № 2 (105). С. 60–70. DOI: 10.31799/1684-8853-2020-2-60-70. EDN: IMLZXK.

11. Сак А. Н. Использование синтаксических связей для классификации строительных документов с помощью методов машинного обучения // Экономика строительства. 2025. № 5. С. 508–511. EDN: YKBEFA.

12. Минаев В. А., Толпыгин А. С. Цифровая платформа для защищенных информационно-управляющих систем беспилотного транспорта // Информация и безопасность. 2024. Т. 27. № 3. С. 309–318. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_76014176_22378518.pdf (дата обращения: 13.05.2026). DOI: 10.36622/1682-7813.2024.27.3.001. EDN: UXJRGD.

13. Подберёзкин А. А. Исследование неопределенности в многоагентном мониторинге дорожного покрытия // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2026. Т. 14. № 2 (53). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_89023687_63667886.pdf (дата обращения: 13.05.2026). DOI: 10.26102/2310-6018/2026.53.2.009. EDN: ZQKINV.

14. Усман Д., Фурсов С. Б., Подберёзкин А. А., Рощин А. И., Лаушкин А. В. Применение цифрового решения в процессе планирования и организации региональных маршрутов // Грузовик. 2024. № 2. С. 49–54. DOI: 10.36652/1684-1298-2024-2-49-54. EDN: NGSFKV.

15. Бессонова Е. А., Тронина И. А., Бабичев А. О. Цифровые платформы как инструмент развития цифровой инновационной экосистемы экономики региона // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. 2025. Т. 15. № 5. С. 82–94. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_84517072_95164315.pdf (дата обращения: 13.05.2026). DOI: 10.21869/2223-1552-2025-15-5-82-94. EDN: IWFXVQ.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSFM-2025-0004), что не повлияло на объективность представленных результатов и выводов.

Financing: The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FSFM-2025-0004), which did not affect the objectivity of the presented results and conclusions.

УДК 004.855:159.942.5:159.9.072:615.851:004.77
DOI 10.17513/snt.40829

CC BY 4.0

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПАЦИЕНТОВ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ПСИХОЛОГИЧЕСКОМ КОНСУЛЬТИРОВАНИИ

Путинцева А. А. ORCID ID 0009-0007-2592-0670,
Андреева В. Д. ORCID ID 0009-0000-2051-5368,
Эбрахим А. ORCID ID 0000-0003-0059-0613,
Хасанов И. И. ORCID ID 0000-0002-3422-1237

Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего образования «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», Москва, Российская Федерация, e-mail: aehbrakhim@fa.ru

Распознавание эмоций по выражению лица рассматривается как дополнительный инструмент поддержки специалиста при дистанционном психологическом консультировании, однако перенос моделей из лабораторных условий в реальный видеопоток сопровождается существенной потерей устойчивости. Цель исследования – разработать и апробировать подход к оценке эмоционального состояния пациента в сценарии дистанционного психологического консультирования, объединяющий экспериментальное сравнение конфигураций моделей распознавания эмоций с практической реализацией модульного программного прототипа. Использованы два набора данных – Emotion-2 и адаптированная под задачу распознавания эмоций версия FairFace – и четыре конфигурации моделей детекции и классификации с единой схемой обучения, на основе которых спроектирован модульный программный прототип для анализа видеосессий. Определено, что наилучшее соотношение точности и вычислительной эффективности обеспечивает сбалансированная конфигурация одноэтапного детектора. Показано, что высокая точность на валидационной выборке не гарантирует устойчивой работы на реальном видеопотоке из-за шума разметки, дисбаланса классов, чувствительности к условиям освещения, ракурсу и частичным перекрытиям лица. В составе прототипа реализованы модули захвата видеопотока, предобработки изображения, детекции и классификации эмоций, временной агрегации предсказаний, событийной логики и визуализации, адаптированные к сценарию дистанционного консультирования. Полученные результаты показывают, что практическая ценность подобных систем определяется не только архитектурными решениями, но и качеством обучающих данных, применением временного сглаживания и адаптацией прикладной логики под конкретный сценарий использования.

Ключевые слова: распознавание эмоций, машинное обучение, компьютерное зрение, видеоаналитика, нейронные сети, дистанционное консультирование

APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS TO ASSESS THE EMOTIONAL STATE OF PATIENTS IN REMOTE PSYCHOLOGICAL COUNSELING

Putintseva A. A. ORCID ID 0009-0007-2592-0670,
Andreeva V. D. ORCID ID 0009-0000-2051-5368,
Ebrakhim A. ORCID ID 0000-0003-0059-0613,
Khasanov I. I. ORCID ID 0000-0002-3422-1237

Federal State Educational Budgetary Institution of Higher Education "Financial University under the Government of the Russian Federation", Moscow, Russian Federation, e-mail: aehbrakhim@fa.ru

Facial expression recognition is considered an additional decision-support tool for specialists in remote psychological counseling; however, transferring models from controlled laboratory conditions to real video streams is accompanied by a substantial loss of robustness. The aim of the study is to develop and validate an approach to assessing the emotional state of a patient in a remote psychological counseling scenario, combining an experimental comparison of emotion recognition model configurations with a practical implementation of a modular software prototype. Two datasets were used – Emotion-2 and a version of FairFace adapted for emotion recognition – along with four model configurations for detection and classification under a unified training scheme, on the basis of which a modular software prototype for video session analysis was designed. It was determined that the best balance between accuracy and computational efficiency is provided by a balanced configuration of a single-stage detector. It was shown that high accuracy on the validation set does not guarantee stable performance on real video streams due to annotation noise, class imbalance, and sensitivity to lighting conditions, camera angle, and partial face occlusions. The prototype incorporates modules for video stream capture, image preprocessing, emotion detection and classification, temporal prediction aggregation, event logic, and visualization, all adapted to the remote counseling scenario. The findings demonstrate that the practical value of such systems is determined not only by architectural choices, but also by training data quality, the application of temporal smoothing, and the adaptation of application logic to a specific use case.

Keywords: emotion recognition, machine learning, computer vision, video analytics, neural networks, remote counseling

Введение

Автоматическое распознавание эмоций по выражению лица относится к числу наиболее заметных направлений аффективных вычислений и компьютерного зрения. Для сферы дистанционного психологического консультирования такие системы представляют практический интерес как вспомогательный аналитический инструмент, позволяющий учитывать не только вербальные, но и визуальные сигналы пациента [1, 2].

Вместе с тем накопленные результаты показывают, что высокая точность на тестовых выборках далеко не всегда переносится на реальные видеосессии. На практике качество распознавания снижается из-за различий между лабораторными и прикладными условиями, ограничений исходных датасетов и нестабильности покадровых предсказаний [1, 3]. Именно этот разрыв между формальными метриками и практической пригодностью особенно важен в задачах консультирования, где интерпретация эмоциональной динамики требует устойчивого и воспроизводимого сигнала.

В представленной статье существенно переработан и расширен материал конференционной публикации за счет включения прикладной реализации из отчета о научно-исследовательской работе. В отличие от исходного варианта, внимание сосредоточено не только на сравнении моделей, но и на том, как экспериментальные выводы трансформируются в архитектуру прототипа программной системы и в рекомендации для ее практического применения.

Цель исследования – разработка и апробация подхода к оценке эмоционального состояния пациента в сценарии дистанционного психологического консультирования, объединяющего экспериментальное сравнение конфигураций моделей распознавания эмоций с практической реализацией модульного программного прототипа.

Материал и методы исследования

Видеопоток представлен последовательностью кадров I_t, $t = 1,\ldots,T$, где $I_t \in \mathbb{R}^{H\times W\times 3}$ – RGB-кадр в момент t. Задача распознавания эмоций по изображению лица формализуется как построение отображения $f_\theta : I_t \to (b_i, c_i, s_i)$, $i = 1,\ldots, N_t$, где $b_i \in \mathbb{R}^4$ – координаты ограничивающей рамки лица, $c_i \in C$ – предсказанный класс эмоции из множества $C = c_1,\ldots,c_K$, $s_i \in [0,1]$ – уверенность модели, N_t – число обнаруженных лиц, θ – обучаемые параметры модели.

Параметры θ оцениваются минимизацией композиционной функции потерь

$$\theta^* = \arg\min_{\grave{e}} \left(\lambda_{loc} \cdot L_{\text{loc}} + \lambda_{\text{cls}} \cdot L_{\text{cls}} + \lambda_{\text{obj}} \cdot L_{\text{obj}} \right),$$

объединяющей слагаемые локализации лица, классификации эмоции и оценки уверенности. В сценарии дистанционного консультирования итоговое решение принимается не по отдельному кадру, а по агрегированной во времени последовательности предсказаний внутри скользящего окна (см. Алгоритм 1).

Экспериментальная часть работы опиралась на два набора данных. Первый набор, Emotion-2, содержит изображения лиц с аннотациями для одностадийной детекции и классификации эмоций. Второй набор представляет собой адаптированную под задачу распознавания эмоций версию FairFace. Использование двух наборов позволило сопоставить поведение моделей на относительно согласованных данных и на данных с выраженными признаками шумной разметки и межклассовой близости [4–6].

Адаптация FairFace к эмоциональным классам позволила увеличить объем обучающих данных, однако одновременно внесла систематические ограничения. Существенная часть изображений характеризуется слабовыраженной мимикой, классы распределены неравномерно, а категории neutral, sad и confused часто различаются только тонкими мимическими признаками [1, 6]. Поэтому на этапе подготовки данных использовались взвешивание классов, аугментации изображений и нормализация входа [7, 8].

Для сравнительного анализа были выбраны четыре конфигурации моделей: YOLOv12n, YOLOv12s, YOLOv12m и RF-DETR-medium. Такой набор позволил сопоставить компактную, сбалансированную и более емкую конфигурации одноэтапного детектора с трансформерным подходом к детекции объектов [9, 10].

Все четыре конфигурации обучались по общей схеме в режиме быстрой адаптации: 10 эпох, размер батча – 16, входное разрешение 640×640 пикселей. В качестве оптимизатора применялся SGD с моментом, весовым затуханием и косинусным расписанием скорости обучения. Из аугментаций использовался стандартный для YOLO набор – mosaic, аффинные преобразования, HSV-сдвиги, горизонтальный флип. Данные делились на обучающую и валидационную выборки в пропорции 80/20 со стратификацией по классам, случайное зерно фиксировалось для воспроизводимости.

В качестве метрик качества использовались mAP@0.5, mAP@0.5–0.95, Precision и Recall – этот набор отражает и качество локализации лица, и корректность классификации эмоции. Отдельно рассматривались межклассовые ошибки: для прикладного сценария важна не суммарная точность сама по себе, а характер систематических перепутываний между близкими эмоциями.

Практическая часть исследования была построена как проектирование прототипа программной системы для анализа эмоций в видеосессии. При разработке структуры прототипа учитывались требования к работе в реальном времени, необходимость стабилизации покадровых предсказаний и возможность адаптации решения к разным прикладным сценариям, включая телемедицинское консультирование и мониторинг в сервисной среде [1, 11, 12].

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты сравнения моделей на датасете Emotion-2 приведены в табл. 1. Наилучшее сочетание точности и вычислительной эффективности продемонстрировала модель YOLOv12s. Именно она показала максимальное значение mAP@0.5 при более выгодном соотношении качества и ресурсов по сравнению как с компактной версией YOLOv12n, так и с более тяжелой конфигурацией YOLOv12m.

Полученные данные подтверждают, что простое увеличение числа параметров не гарантирует роста практического качества. Более крупная модель YOLOv12m не показала существенного выигрыша относительно YOLOv12s, что согласуется с литературными наблюдениями о высокой чувствительности задач распознавания эмоций к качеству данных и к особенностям обучающей выборки [1, 3, 13]. Для условий ограниченного вычислительного бюджета более рациональным оказывается выбор модели с лучшим балансом скорости и устойчивости, а не с максимальной емкостью.

Дополнительный анализ на адаптированном FairFace показал выраженную неоднородность качества по отдельным эмоциям. Результаты оценки модели по метрикам Precision и Recall представлены в табл. 2. Наиболее уверенно модель распознает положительное эмоциональное состояние, тогда как классы Confused и Angry характеризуются заметно большим числом ошибок. Это связано одновременно с дефицитом примеров для некоторых категорий и с мимической близостью ряда состояний [1, 6].

Таблица 1

Сравнительные результаты моделей на датасете Emotion-2

Модель	mAP@0.5	mAP@0.5–0.95	Precision	Recall
YOLOv12n	0,945	0,920	0,890	0,910
YOLOv12s	0,960	0,955	0,930	0,940
YOLOv12m	0,958	0,950	0,920	0,930
RF-DETR-medium	0,940	0,920	0,900	0,900

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 2

Производительность модели YOLOv12s по классам на адаптированном FairFace

Класс эмоции	Precision, %	Recall, %
Happy	99,6	100,0
Neutral	96,3	97,5
Angry	87,3	81,8
Confused	75,4	87,5
Sad	88,1	85,2
Macro avg	89,3	90,4
Weighted avg	90,4	90,6

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Для расширения статистического анализа результатов поклассовые значения precision и recall были дополнены макро- и взвешенными средними оценками. Macro avg характеризует качество распознавания при равном вкладе каждого эмоционального класса, тогда как weighted avg учитывает их относительную представленность в выборке. Для модели YOLOv12s macro precision и macro recall составили 89,3 и 90,4 %, а weighted precision и weighted recall – 90,4 и 90,6 % соответственно. Близость макро- и взвешенных оценок показывает, что интегральные результаты модели не определяются исключительно преобладающими классами. Вместе с тем поклассовые значения указывают на неравномерность распознавания отдельных эмо-

ций: минимальное значение precision наблюдается для класса Confused, а минимальное значение recall – для класса Angry.

Наиболее принципиальный вывод экспериментальной части состоит в том, что высокая точность на валидационной выборке не обеспечивает автоматически надежную работу на реальном видеопотоке. При переносе модели в прикладной сценарий становятся критичными освещение, ракурс, частичные перекрытия лица и кратковременные покадровые колебания меток. Подобный разрыв между лабораторной оценкой и практикой неоднократно подчеркивался в работах по распознаванию эмоций и по оценке применимости моделей машинного обучения [1, 3].

Именно поэтому второй частью исследования стала практическая реализация прототипа программной системы. Архитектура прототипа показана на рис. 1. В ее составе выделены модуль захвата видеопотока, модуль предобработки изображений, ядро детекции и классификации на основе YOLOv12s, модуль временной агрегации, событийная логика и визуализация результатов. Такая структура позволяет отделить вычислительное ядро от прикладной логики и при необходимости адаптировать систему под другой контекст использования.

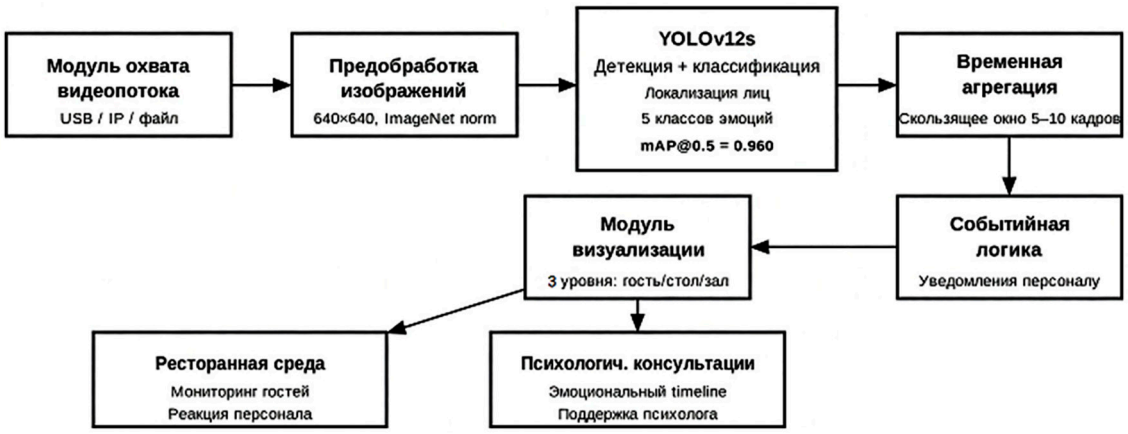


Рис. 1. Архитектура прототипа программной системы распознавания эмоций
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

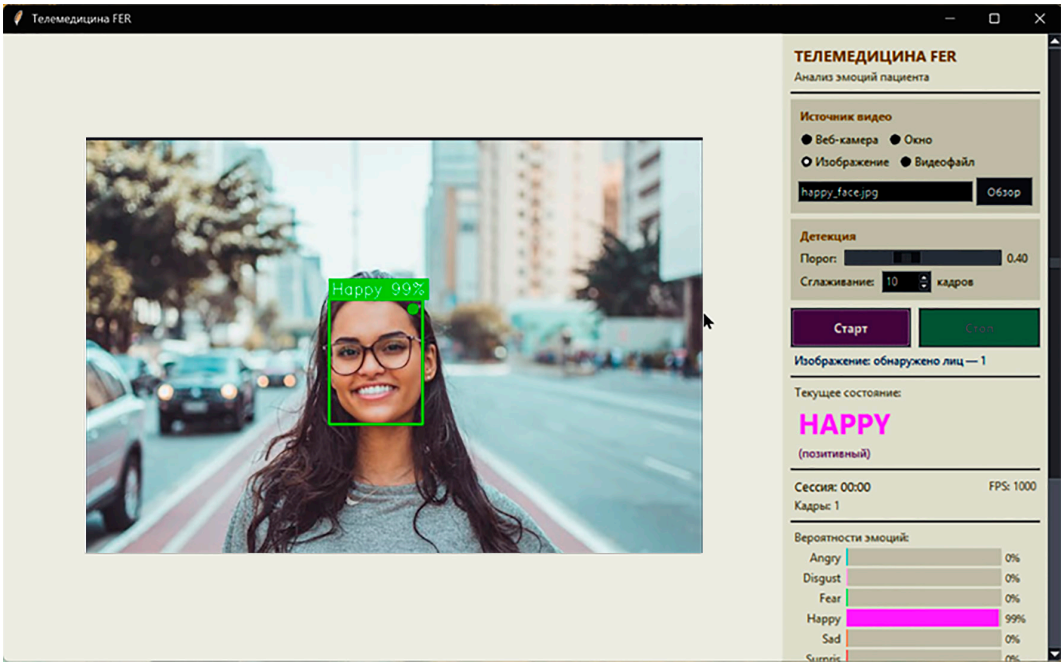


Рис. 2. Интерфейс прототипа для сценария дистанционного психологического консультирования
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Для сценария дистанционного психологического консультирования решающим оказался модуль временной агрегации предсказаний. Его назначение состоит в усреднении результатов по скользящему окну из нескольких соседних кадров, что снижает влияние случайных колебаний и делает визуализируемую динамику эмоционального состояния более интерпретируемой для специалиста [11, 12]. Без этого слоя даже достаточно точная модель может генерировать шумный сигнал, непригодный для прикладного анализа.

Алгоритм 1. Временная агрегация предсказаний эмоций.

Вход: поток кадровых предсказаний (c_t, s_t); размер окна W; порог уверенности τ; число подтверждающих кадров R.

Выход: стабилизированная эмоция $\hat{c}_t$ и агрегированная уверенность $\hat{s}_t$.

1. Инициализировать кольцевой буфер B размера W.

2. Для каждого нового кадра t:

2.1. если $s_t \geq \tau$ – добавить (c_t, s_t) в B;

2.2. если B пуст, сохранить предыдущее стабилизированное значение;

2.3. для каждого класса $c \in C$ вычислить:

$$w_c = \sum_{(c_k, s_k) \in B, c_k = c} s_k ;$$

2.3. определить:

$$\hat{c}_t = \arg\max_c w_c ; \quad \hat{s}_t = \frac{w_{\hat{c}_t}}{\sum_c w_c} ;$$

2.4. если значение $\hat{c}_t$ удерживается R кадров подряд – зафиксировать событие смены эмоционального состояния.

Интерфейс прототипа для телемедицинского применения приведен на рис. 2. Пользователь получает не только текущую распознанную эмоцию, но и значение уверенности, параметры сглаживания, число обнаруженных лиц и наглядное представление распределения вероятностей по классам. Такая организация интерфейса соответствует задаче поддержки принятия решения, а не автоматической подмены специалиста.

Дополнительно прототип апробирован в ресторанном сценарии – для мониторинга эмоционального фона посетителей. Этот контекст не относится к основному предмету статьи, но позволил оценить универсальность выбранной архитектуры: одна и та же программная основа применяется в разных прикладных задачах за счет смены правил агрегации и визуализации. Прогоны на видеозаписях и в условиях, близких к реальным, показали работоспособность основных модулей и возможность обработки видеопотока в реальном времени на потребительском GPU. Вместе с тем выявились ограничения, заметные именно при внедрении: снижение качества при неравномерном освещении, ухудшение распознавания при отклонении головы от фронтального положения, ошибки на частично перекрытых лицах и нестабильность результата без сглаживания. Прикладная ценность системы, таким образом, складывается не только из метрик детектора – заметную роль играют качество постобработки и интерфейс интерпретации результата.

Из сопоставления экспериментальной и прикладной частей работы вытекает несколько практических выводов. При ограниченном бюджете на обучение и инференс модель YOLOv12s дает разумный компромисс между точностью и расходом ресурсов. При разработке системы предпочтительнее опираться на специализированные эмоциональные датасеты – или комбинировать несколько профильных наборов, чем ограничиваться адаптацией неспециализированных данных [5, 6]. В сценариях видеоконсультирования имеет смысл подключать временную фильтрацию предсказаний, пороги уверенности и механизмы подавления частых переключений между близкими эмоциями [1, 11, 14].

Среди направлений дальнейшего развития – переход от анализа отдельных кадров к более полному учету временной динамики и к мультимодальной обработке. Существенный потенциал в этой области показывают трансформерные архитектуры [15, 16] и методы совместного использования визуальных и иных сигналов [12, 14], хотя их практическая эффективность по-прежнему зависит от качества и репрезентативности обучающих данных.

Заключение

По результатам сравнения среди рассмотренных конфигураций YOLOv12s обеспечивает лучший баланс между точностью распознавания и вычислительной эффективностью и в этом смысле предпочтительнее остальных для задачи оценки эмоционального состояния пациента при дистанционном психологическом консультировании. При этом эксперименты на двух наборах данных подтвердили, что высокие валидационные метрики не гарантируют устойчивой работы на реальном видеопотоке: практическое качество заметно снижают шумная разметка, близость эмоциональных классов, вариации освещения, ракурс и частичные окклюзии лица.

Практическая реализация модульного прототипа подтвердила техническую

реализуемость предложенного подхода для сценария дистанционного психологического консультирования. Ключевым элементом, обеспечивающим надежность системы в условиях реального видеопотока, оказался модуль временной агрегации предсказаний, позволяющий сгладить покадровые колебания и сформировать интерпретируемый сигнал для специалиста. Полученные результаты свидетельствуют о том, что практическая ценность подобных систем определяется не только архитектурными решениями и метриками детектора, но и качеством обучающих данных, продуманностью механизмов постобработки и соответствием прикладной логики конкретному сценарию использования.

Перспективы дальнейшего развития системы связаны с применением специализированных датасетов эмоций, тонкой адаптацией модели под прикладной домен, расширением мультимодального анализа и совершенствованием механизмов постобработки результатов, в том числе переходом от анализа одиночных кадров к учету временной динамики эмоционального состояния.

Список литературы

1. Li S., Deng W. Deep Facial Expression Recognition: A Survey // IEEE Transactions on Affective Computing. 2022. Vol. 13. Is. 3. P. 1195–1215. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9039580 (дата обращения: 02.04.2026). DOI: 10.1109/TAFFC.2020.2981446.

2. Picard R. W. Affective Computing. Cambridge, MA: MIT Press, 1997. 306 p. ISBN 978-0-262-16170-1.

3. Hutchinson B., Rostamzadeh N., Greer C., Heller K., Prabhakaran V. Evaluation Gaps in Machine Learning Practice // Proceedings of the 2022 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency. 2022. P. 1859–1876. DOI: 10.1145/3531146.3533233.

4. Goodfellow I. J., Erhan D., Carrier P. L., Courville A., Mirza M., Hamner B., Cukierski W., Tang Y., Thaler D., Lee D.-H., Zhou Y., Ramaiah C., Feng F., Li R., Wang X., Athanasakis D., Shawe-Taylor J., Milakov M., Park J., Ionescu R., Popescu M., Grozea C., Bergstra J., Xie J., Romaszko L., Xu B., Chuang Z., Bengio Y. Challenges in Representation Learning: A Report on Three Machine Learning Contests // Neural Networks. 2015. Vol. 64. P. 59–63. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0893608014002159?via%3Dihub (дата обращения: 11.04.2026). DOI: 10.1016/j.neunet.2014.09.005.

5. Mollahosseini A., Hasani B., Mahoor M. H. AffectNet: A Database for Facial Expression, Valence, and Arousal Computing in the Wild // IEEE Transactions on Affective Computing. 2019. Vol. 10. Is. 1. P. 18–31. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8013713 (дата обращения: 03.04.2026). DOI: 10.1109/TAFFC.2017.2740923.

6. Karkkainen K., Joo J. FairFace: Face Attribute Dataset for Balanced Race, Gender, and Age for Bias Measurement and Mitigation // Proceedings of the 2021 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). 2021. P. 1547–1557. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9423296 (дата обращения: 08.04.2026). DOI: 10.1109/WACV48630.2021.00159.

7. Singh K., Ahirwal M. K., Pandey M. Subject wise data augmentation based on balancing factor for quaternary emotion recognition through hybrid deep learning model // Biomedical Signal Processing and Control. 2023. Vol. 86. Is. A. Art. 105075. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1746809423005086 (дата обращения: 15.04.2026). DOI: 10.1016/j.bspc.2023.105075.

8. Taskiran S. F., Turkoglu B., Kaya E. et al. A comprehensive evaluation of oversampling techniques for enhancing text classification performance // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Is. 1. Art. 21631. URL: https://www.nature.com/articles/s41598-025-05791-7 (дата обращения: 12.04.2026). DOI: 10.1038/s41598-025-05791-7.

9. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection // Proceedings – IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2016). 2016. P. 779–788. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/7780460 (дата обращения: 04.04.2026). DOI: 10.1109/CVPR.2016.91.

10. Carion N., Massa F., Synnaeve G., Usunier N., Kirillov A., Zagoruyko S. End-to-End Object Detection with Transformers // Computer Vision – ECCV 2020: 16th European Conference, Glasgow, UK, August 23–28, 2020, Proceedings, Part I. 2020. P. 213–229. DOI: 10.1007/978-3-030-58452-8_13.

11. Savchenko A. V. Facial expression and attributes recognition based on multi-task learning of lightweight neural networks // 2021 IEEE 19th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY). 2021. P. 119–124. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9582508 (дата обращения: 13.04.2026). DOI: 10.1109/SISY52375.2021.9582508.

12. Zhao Z., Liu Q. Former-DFER: Dynamic Facial Expression Recognition Transformer // Proceedings of the 29th ACM International Conference on Multimedia (MM ‘21). 2021. P. 1553–1561. DOI: 10.1145/3474085.3475292.

13. Wang K., Peng X., Yang J., Lu S., Qiao Y. Suppressing Uncertainties for Large-Scale Facial Expression Recognition // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2020. P. 6896–6905. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9157210 (дата обращения: 29.03.2026). DOI: 10.1109/CVPR42600.2020.00693.

14. Ma F., Sun B., Li S. Facial Expression Recognition With Visual Transformers and Attentional Selective Fusion // IEEE Transactions on Affective Computing. 2023. Vol. 14. Is. 2. P. 1236–1248. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9585378 (дата обращения: 01.04.2026). DOI: 10.1109/TAFFC.2021.3122146.

15. Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A., Weissenborn D., Zhai X., Unterthiner T., Dehghani M., Minderer M., Heigold G., Gelly S., Uszkoreit J., Houlsby N. An Image Is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale // 9th International Conference on Learning Representations (ICLR 2021). 2021. URL: https://openreview.net/forum?id=YicbFdNTTy (дата обращения: 12.04.2026).

16. Liu Z., Lin Y., Cao Y., Hu H., Wei Y., Zhang Z., Lin S., Guo B. Swin Transformer: Hierarchical Vision Transformer Using Shifted Windows // Proceedings – 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), Montreal, QC, Canada. 2021. P. 9992–10002. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9710580 (дата обращения: 14.04.2026). DOI: 10.1109/ICCV48922.2021.00986.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 004.853:004.891.2:612.821
DOI 10.17513/snt.40830

CC BY 4.0

ДЕКОДИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИИ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ОБУЧАЮЩИХ СИСТЕМ: ОБЗОР ПОДХОДОВ И КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА «НЕЙРОТЬЮТОР»

[1, 2]Рак Д. В. ORCID ID 0009-0006-6210-144X,
[1]Аникин А. В. ORCID ID 0000-0003-0661-4284

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Российская Федерация, e-mail: anton@anikin.name;
[2]Частное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Школа программной инженерии», Волгоград, Российская Федерация

Широкое применение интеллектуальных обучающих систем ограничено зависимостью от стандартных периферийных устройств ввода, что делает их недоступными для лиц с тяжелыми двигательными нарушениями – боковым амиотрофическим склерозом, детским церебральным параличом, синдромом запертого человека. Целью настоящего обзора является систематизация подходов к декодированию сигналов электроэнцефалографии в текст на основе глубоких нейронных сетей и формулирование архитектурных принципов системы «НейроТьютор» – пайплайна интерфейса мозг – компьютер, интегрированного с интеллектуальной обучающей системой. Материалом для исследования послужили рецензируемые публикации преимущественно 2018–2026 гг. (включая фундаментальные работы более раннего периода), индексированные в базах IEEE Xplore, ACL Anthology и PubMed, по направлениям декодирования нейросигналов, мультимодального обучения и онтологического моделирования в образовании; итоговый корпус составил 26 источников. В результате предложена концептуальная архитектура, включающая четыре функциональных модуля: непрерывную регистрацию электроэнцефалограммы, Conformer-энкодер пространственно-временных признаков, кросс-модальный адаптер на основе контрастивного обучения для проекции в пространство эмбеддингов большой языковой модели и педагогический бэкенд на основе онтологий и таксономии Блума. Аналитически обоснована достижимость суммарной задержки 270–525 мс; сформулирована трехфазная программа верификации. В заключение делается вывод о том, что «НейроТьютор» восполняет системный разрыв между технологиями декодирования нейросигналов и педагогической логикой интеллектуальных обучающих систем, открывая путь к созданию доступных образовательных сред для лиц с двигательными нарушениями.

Ключевые слова: интеллектуальные обучающие системы, интерфейс мозг – компьютер, большие языковые модели, электроэнцефалография, декодирование, онтологии, образование

EEG SIGNAL DECODING FOR INTELLIGENT TUTORING SYSTEMS: A REVIEW OF APPROACHES AND THE “NEUROTUTOR” CONCEPTUAL ARCHITECTURE

[1, 2]Rak D. V. ORCID ID 0009-0006-6210-144X,
[1]Anikin A. V. ORCID ID 0000-0003-0661-4284

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Volgograd State Technical University”, Volgograd, Russian Federation, e-mail: anton@anikin.name;
[2]Private educational institution of additional professional education “Software Engineering School”, Volgograd, Russian Federation

The widespread adoption of intelligent tutoring systems is constrained by their dependence on standard peripheral input devices, rendering them inaccessible to individuals with severe motor impairments such as amyotrophic lateral sclerosis, cerebral palsy, and locked-in syndrome. The aim of this review is to systematise existing approaches to EEG signal decoding into text using deep neural networks and to formulate the architectural principles of the “NeuroTutor” system – a brain–computer interface pipeline integrated with an intelligent tutoring system. The study materials comprised peer-reviewed publications primarily from 2018 to 2026 (including earlier foundational works) indexed in IEEE Xplore, ACL Anthology, and PubMed, covering neural signal decoding, multimodal learning, and ontological modelling in education; the final corpus consisted of 27 sources. As a result, a conceptual architecture was proposed comprising four functional modules: continuous electroencephalography acquisition, a Conformer encoder for spatiotemporal feature extraction, a cross-modal adapter based on contrastive learning for projection into the embedding space of a large language model, and a pedagogical backend based on domain ontologies and Bloom’s taxonomy. The achievability of a total latency of 270–525 ms is analytically justified; a three-phase verification programme is formulated. In conclusion, it is argued that “NeuroTutor” bridges the systematic gap between neural signal decoding technologies and the pedagogical logic of intelligent tutoring systems.

Keywords: intelligent tutoring systems, brain – computer interface, large language models, electroencephalography, decoding, ontologies, education

Введение

Интеллектуальные обучающие системы обеспечивают адаптацию учебного контента к когнитивному профилю обучающегося, персонализированную обратную связь и управление темпом освоения материала [1, 2]. Вместе с тем применение таких систем ограничено для лиц с тяжелыми двигательными нарушениями – боковым амиотрофическим склерозом, детским церебральным параличом, последствиями инсульта, синдромом запертого человека, – поскольку все существующие системы предполагают использование стандартных устройств ввода: клавиатуры, манипулятора или систем отслеживания взгляда. По данным ВОЗ, более 70 млн чел. в мире страдают заболеваниями, существенно ограничивающими моторные функции [3]; при наиболее тяжелых формах нарушений подвижность взгляда также утрачена, что полностью исключает пациента из процесса электронного обучения.

Интерфейсы мозг – компьютер транслируют электрическую активность нейронов непосредственно в управляющие команды, минуя нервно-мышечный аппарат [3]. Среди неинвазивных методов регистрации наиболее практичной с клинической точки зрения является электроэнцефалография: метод обеспечивает миллисекундное временно́е разрешение, не требует хирургического вмешательства, относительно недорог и допускает портативное применение в отличие от функциональной магнитно-резонансной томографии.

Развитие больших языковых моделей – Llama 2 [4], семейства GPT и их аналогов – открыло возможность генерации семантически связного текста из компактных векторных представлений. Сочетание декодирования электроэнцефалограммы с генеративными большими языковыми моделями представляет перспективный подход к созданию безмоторного канала коммуникации для пользователей интеллектуальных обучающих систем.

Цель исследования – систематизировать существующие подходы к декодированию сигналов электроэнцефалографии в текст на основе глубоких нейронных сетей и сформулировать архитектурные принципы системы «НейроТьютор» – пайплайна интерфейса мозг – компьютер, интегрированного с интеллектуальной обучающей системой.

В статье представлены: (1) сравнительный анализ современных архитектур декодирования электроэнцефалограммы в текст; (2) формальная спецификация четырехмодульной архитектуры предлагаемой системы; (3) аналитическое обоснование вычислительной сложности и достижимости целевых задержек; (4) трехфазная программа верификации.

Материалы и методы исследования

Настоящий обзор выполнен в соответствии с принципами систематического анализа литературы. Поиск осуществлялся в базах данных IEEE Xplore, ACL Anthology, PubMed и Google Scholar, преимущественно за период с 2018 по 2026 г. (включая фундаментальные работы более раннего периода). Поисковые запросы формировались на основе ключевых терминов: EEG-to-text decoding, brain-computer interface, intelligent tutoring system, neural signal decoding, BCI education, conformer EEG, contrastive EEG-language alignment.

Критерии включения публикаций: (1) рецензируемые научные статьи или препринты с рецензированием; (2) явная ориентация на декодирование нейросигналов в текстовую или семантическую форму; (3) использование электроэнцефалографии как основной или сопоставляемой модальности; (4) количественная оценка качества с помощью стандартных метрик (BLEU, ROUGE, WER, CER). Дополнительно включены работы по смежным областям: интеллектуальные обучающие системы с онтологическим компонентом, нейроэтика и защита данных, методологические основы инклюзивного образования.

В результате первичного отбора было идентифицировано 87 публикаций; после применения критериев включения и исключения дубликатов сформирован корпус из 27 работ, непосредственно задействованных в настоящем обзоре.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Эволюция парадигм декодирования электроэнцефалограммы

Первые системы декодирования электроэнцефалограммы в семантические категории (начало 2010-х гг.) опирались на ручное проектирование признаков и линейные классификаторы [3]. Примером такого подхода служит BCI2000 – универсальная исследовательская платформа, предложенная Г. Шалком и соавт. в 2004 г. и до сих пор служащая эталонной инфраструктурой для широкого круга парадигм интерфейса мозг–компьютер [5]. Системы этого поколения работали с закрытым словарем (несколько десятков команд) и не позволяли генерировать произвольный текст.

В 2017–2021 гг. в исследованиях начали применяться рекуррентные и сверточные нейронные сети; задача оставалась закрытой – классификация слов или слогов из фиксированного набора. Существенным методологическим достижением этого периода стало создание корпуса ZuCo (Zurich Cognitive Language Processing Corpus): первого общедоступного корпуса, совмещающего сигналы электроэнцефалографии высокой плотности (128 каналов, 500 Гц) с данными айтрекинга, полученными при естественном чтении английских предложений [6], что создало условия для обучения декодирования с открытым словарем.

Начиная с 2022 г. доминирующим подходом является сочетание Conformer- или Transformer-энкодера с замороженными или частично дообученными большими языковыми моделями: контрастивное обучение выравнивает представления электроэнцефалограммы с текстовым пространством модели, авторегрессионный декодер генерирует связный текст. Основные архитектуры этого направления рассмотрены в разделе 2.

2. Ключевые архитектуры: сравнительный анализ

Ниже анализируются наиболее значимые системы декодирования электроэнцефалограммы в текст, выявленные в ходе обзора. На рисунке представлена предлагаемая концептуальная архитектура, разработанная в контексте данного сравнительного анализа.

DeWave (NeurIPS 2023) – первая система, реализовавшая перевод сырых волн электроэнцефалограммы без маркеров фиксации взгляда [7]. В ее основе – квантизированный вариационный энкодер (VQ-VAE), формирующий дискретный кодекс, который затем декодируется с помощью BART. Достигнутый результат на ZuCo составил BLEU-1 ≈ 40–43 %.

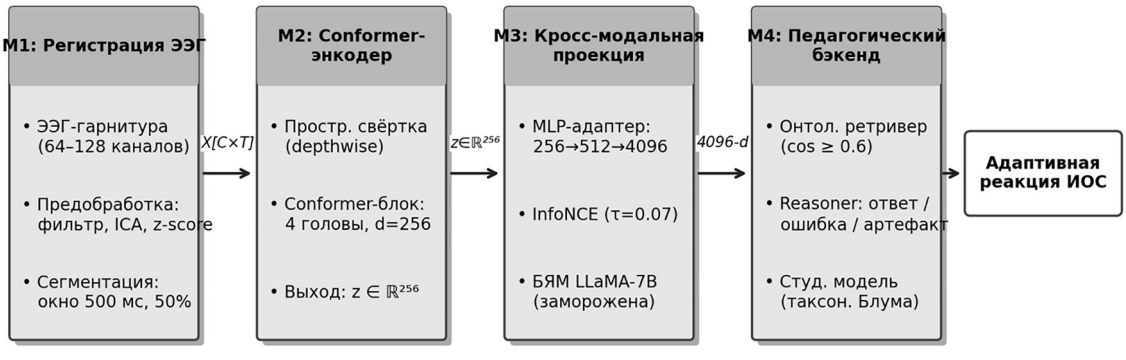
E2T-PTR (ACL 2024) предложила двухэтапный фреймворк: сначала обучается многоканальный авто-кодировщик CET-MAE, объединяющий контрастивное обучение между модальностями и внутримодальную самореконструкцию; затем предобученный модуль интегрируется с BART-декодером [8]. Метод превзошел базовую линию на 8,34 % по ROUGE-1 F1 и на 32,21 % по BLEU-4.

BELT-2 (ICLR 2025) – на сегодняшний день наиболее высокорезультативная система на датасете ZuCo [9]. Q-Conformer формирует многозадачное представление, которое выравнивается с подсловными единицами языка посредством контрастивного обучения. BLEU-1 достиг 52,2 % при многозадачном обучении.

BIT (Brain-to-Text) – межвидовая нейронная фундаментальная модель, переводящая нейрональную активность в связный текст через единую дифференцируемую нейросеть [10]. Transformer-энкодер предобучен на межвидовых данных инвазивных записей и интегрируется с аудио-ориентированными большими языковыми моделями, достигая WER 10,22 % в режиме сквозного обучения на Brain-to-Text Benchmark 2024.

Thought2Text использует LLaMA и Mistral, дообученные на данных электроэнцефалографии, записанных при зрительной стимуляции [11]. Подход демонстрирует принципиальную совместимость энкодера с современными инструктивно-дообученными моделями.

NeuroChat – нейроадаптивный чат-бот (система Braini), совмещающий генеративный искусственный интеллект с данными электроэнцефалографии в реальном времени для персонализации учебного диалога [12]. Система использует электроэнцефалограмму для оценки уровня вовлеченности, но не для декодирования произвольного текста – тем самым представляет смежный, а не конкурирующий подход. Z. Wang и H. Ji впервые реализовали декодирование ЭЭГ с открытым словарем и нулевой классификацией тональности (AAAI 2022) [13].



Концептуальная архитектура «НейроТьютор»
Примечание: составлена авторами по результатам данного исследования

Таблица 1

Сравнение архитектур декодирования электроэнцефалограммы в текст

Система	Тип энкодера	Метод выравнивания	Основная метрика	BLEU-1 (ZuCo)	Реальное время
EEG-to-Text (baseline) [13]	BERT-подобный	MSE-регрессия	BLEU	~40 %	нет
DeWave [7]	Transformer + VQ	Дискретная квантизация	BLEU	~40–43 %	нет
E2T-PTR [8]	BERT + MAE	CEMA (контрастивный)	BLEU, ROUGE	~43 %	нет
BELT-2 [9]	Q-Conformer	BPE-контрастивный	BLEU	~52 %	нет
BIT [10]	Transformer + LLM	Cross-species pretraining	WER	– (ECoG)	потенциально
Thought2 Text [11]	MLP-адаптер	Проекция в LLM	BLEU, BERTScore	–	нет
НейроТьютор (предлагается)	Conformer + MLP	InfoNCE	Сем. ретривал	–	Проектная цель

Примечание: «–» – метрика не оценивалась по протоколу ZuCo или недоступна для прямого сравнения. Источник: составлена по данным [7–11, 13].

NeuroTutor (Elgammal et al., 2025) – система нейрокогнитивного тьюторинга, декодирующая вовлеченность студента в ходе виртуального и роботизированного обучения [14]. В отличие от предлагаемой авторами архитектуры, данная система не ставит задачу декодирования произвольного текста из сигнала электроэнцефалографии, однако подтверждает практическую применимость нейроинтерфейсов в образовательном контексте.

3. Сравнительный анализ архитектур

Базовая классификация с открытым словарем и смежные нейроадаптивные подходы представлены в работах раннего периода [12, 13]. Системы на основе квантизации, маскированного автокодирования и бутстрэпинга образуют первое поколение сквозного декодирования (табл. 1) [7–9]. Современные архитектуры с межвидовым предобучением, интерпретируемыми представлениями и инструктивно-настроенными большими языковыми моделями задают актуальный предел семантического выравнивания [10–11].

4. Общие ограничения существующих подходов

Анализ представленных систем выявляет три системных ограничения.

Когнитивный разрыв. Все системы, обученные на ZuCo (пассивное чтение), оценивались в условиях рецептивного восприятия. Генеративная задача – формулирование произвольного ответа при взаимодействии с интеллектуальной обучающей системой – требует совершенно иных нейронных паттернов, соответствующих внутренней речи. Этот разрыв до сих пор остается главным препятствием для практического применения [15].

Отсутствие реального времени. Ни одна из сравниваемых систем не продемонстрировала устойчивой работы в онлайн-режиме с задержкой, приемлемой для учебного диалога.

Изолированность от педагогического контекста. Ни одна из систем не интегрирована с интеллектуальной обучающей системой: нейроинтерфейс и педагогическая логика рассматриваются как независимые исследовательские направления.

Предлагаемая система разрабатывается как ответ на все три ограничения.

5. Концептуальная архитектура «НейроТьютор»

Предлагаемая система представляет собой концептуальный пайплайн из четырех последовательно связанных модулей, обеспечивающих путь от регистрации сигнала электроэнцефалографии до педагогически осмысленной реакции интеллектуальной обучающей системы.

5.1. Модуль 1: Непрерывная регистрация электроэнцефалограммы (M1)

Технические параметры. Регистрация выполняется с использованием 64–128 электродных систем по стандартной схеме 10–20 с полосой усиления 0,5–45 Гц и частотой дискретизации 500–1000 Гц. Нотч-фильтр 50 Гц применяется для подавления наводки промышленной сети. Целевое сопротивление электродов – менее 5 кОм.

Сегментация. Сигнал обрабатывается скользящим окном длительностью 500 мс с перекрытием 50 % (250 мс). Выбор окна обусловлен нейрофизиологическим обоснованием: большинство когнитивно значимых компонентов, связанных с языковой обработкой (N400, P600), проявляются в диапазоне 400–600 мс после стимула [6].

Предобработка. Стандартный пайплайн включает: (1) повторное выборочное преобразование к 500 Гц; (2) линейное дрейф-удаление; (3) удаление артефактов мигания методом независимого анализа компонент; (4) нормализацию z-score по каналам. Для портативных сухих электродов дополнительно применяется Common Average Reference.

Протокол M1 совместим с форматом ZuCo 2.0 (128 каналов, 500 Гц) [6] и с Inner Speech Dataset (Nieto et al., 2022, 128 каналов) [15], что обеспечивает возможность офлайн-валидации на обоих корпусах без повторной предобработки данных.

5.2. Модуль 2: Conformer-энкодер пространственно-временных признаков (M2)

Conformer сочетает сверточные слои для извлечения локальных временны́х паттернов с механизмом самовнимания для моделирования долгосрочных зависимостей. Эта архитектура была адаптирована для электроэнцефалограммы в работе BELT-2 [9], показав превосходство над чисто трансформерными и чисто сверточными подходами.

Спецификация архитектуры M2:

− Входной слой: матрица X размером [C × T], где C ∈ {64, 128} – число каналов, T – число временны́х точек в окне 500 мс.

− Пространственная свертка: depthwise separable convolution с ядром размером 25 точек вдоль временно́й оси.

− Conformer-блок: 4 головы самовнимания, d_model = 256; feed-forward подсеть с размерностью 1024, активация GELU; нормализация LayerNorm; относительное позиционное кодирование Шоу–Чиу.

− Выходное представление: вектор z ∈ R^256, получаемый усреднением по временно́й оси после последнего Conformer-блока.

Для ускорения обучения рекомендуется предобучение энкодера методом маскированного автокодирования, аналогично подходу E2T-PTR [8].

5.3. Модуль 3: Кросс-модальная проекция в пространство большой языковой модели (M3)

Задача M3 – отобразить 256-мерный вектор представления электроэнцефалограммы в пространство токенных эмбеддингов целевой большой языковой модели, сохраняя семантическую близость к соответствующему текстовому описанию.

Архитектура адаптера: трехслойный многослойный перцептрон: 256 → ReLU → 512 → ReLU → 4096. Выходная размерность 4096 соответствует пространству эмбеддингов Llama 2 (7B) [4]. При использовании других больших языковых моделей размерность последнего слоя настраивается соответственно.

Функция потерь – NT-Xent (контрастивная) [16] с температурным параметром τ = 0,07. Вектор электроэнцефалограммы одного сегмента максимизирует сходство с текстовым эмбеддингом соответствующего предложения и минимизирует – с эмбеддингами всех остальных предложений в батче.

Веса большой языковой модели заморожены в ходе обучения M3 (аналогично BELT-2 [9] и Thought2Text [11]). Только адаптер и prefix-vectors являются обучаемыми параметрами (~2M параметров суммарно).

5.4. Модуль 4: Педагогический бэкенд на основе онтологий (M4)

M4 определяет специфику предлагаемой архитектуры по сравнению с общими системами декодирования и реализует полный цикл педагогической обратной связи. Модуль опирается на трехуровневую онтологию [17, 18]: уровень концептов предметной области, таксономию Блума [19] и модель типизированных педагогических ошибок. Онтологическое моделирование в образовании также развивалось в предшествующих работах, в частности в области представления знаний по таксономии Блума [20] и верификации алгоритмических следов [21].

Механизм косинусного порога уверенности. После получения проецированного вектора из M3 онтологический ретривер вычисляет косинусное сходство между вектором и эмбеддингами всех концептов онтологии. Если косинусное сходство ≥ 0,6 → система классифицирует намерение и передает управление педагогическому движку; если ниже – активируется резервная процедура уточнения через альтернативный интерфейс.

Адаптивная педагогическая стратегия. На основании накопленной истории сессии reasoner обновляет студенческую модель – персонализированный граф концептов с атрибутами «уровень усвоения» и «история ошибок» – по принципу, аналогичному описанному в [17, 18]. Педагогический движок выбирает следующее учебное действие: объяснение на другом уровне

абстракции, дополнительный пример, тест или переход к новой теме.

6. Аналитическая оценка вычислительной сложности

Ключевым практическим требованием к интерфейсу мозг–компьютер для педагогического применения является суммарная задержка – время от момента завершения сегмента электроэнцефалограммы до выдачи реакции интеллектуальной обучающей системы. Литература по психологии учебного диалога указывает, что приемлемое целевое окно составляет 500–2000 мс [12, 22]: задержка свыше 2 секунд нарушает когнитивный поток обучения. Ниже приводится поэтапный аналитический расчет задержки для развертывания на GPU уровня NVIDIA A100 (или эквивалента).

Этап 1. Предобработка сегмента электроэнцефалограммы (M1). Операции: полосовой фильтр (FIR), нормализация, упаковка тензора. При размере окна 500 мс и 128 каналах на GPU: ~5–10 мс.

Этап 2. Conformer-инференс (M2). Архитектура: 4-головое самовнимание, d = 256, 2 Conformer-блока. Число параметров: ~3M. Инференс одного окна 500 мс на GPU: ~15–20 мс (подтверждается сопоставимыми результатами для EEGNet и ShallowConvNet [23]).

Этап 3. Адаптер MLP (M3). Архитектура: 3 полносвязных слоя, суммарно ~2M параметров. На GPU: < 5 мс.

Этап 4. Авторегрессионный декодинг большой языковой моделью (M3). Llama 2 (7B) в режиме инференса генерирует ~30–50 токенов/с на GPU A100. Для педагогического ответа длиной 10–20 токенов это составляет ~200–400 мс. При использовании квантизации INT8 задержка сокращается до ~250 мс.

Этап 5. Онтологический reasoner (M4). Операции: векторный поиск в онтологии объемом ~10 000 концептов (FAISS IndexFlatIP), логический вывод (OWL reasoner). Параллельное выполнение на CPU: ~50–100 мс.

Сводная таблица задержки по компонентам (табл. 2).

Расчет демонстрирует, что суммарная задержка 270–525 мс вписывается в целевое окно 500–2000 мс при использовании квантизированной версии большой языковой модели. Доминирующим источником задержки является авторегрессионный декодинг, что мотивирует дополнительное исследование стратегий семантического ретривала и speculative decoding. В режиме семантического ретривала (без авторегрессионной генерации) суммарная задержка сокращается до ~70–130 мс.

Таблица 2

Оценка задержки компонентов «НейроТьютор»

Компонент	Оценка задержки
Предобработка электроэнцефалограммы (M1)	5–10 мс
Conformer-инференс (M2)	15–20 мс
Адаптер MLP (M3)	< 5 мс
Декодинг большой языковой моделью, 10–20 токенов (M3)	200–400 мс
Онтологический reasoner (M4)	50–100 мс
ИТОГО	~270–525 мс

Примечание: оценки для GPU NVIDIA A100; при квантизации INT8 этап декодинга сокращается до ~250 мс [9, 10, 12]. Данные об инфраструктуре воспроизводимости – по методологии MOABB-бенчмарка [23].

Составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

7. Программа верификации «НейроТьютор»

Характерной особенностью предлагаемой архитектуры является когнитивное несоответствие между имеющимися обучающими данными (рецептивные задачи чтения) и целевым применением (генеративный ответ обучающегося). Это несоответствие представляет собой обоснованную двухэтапную исследовательскую программу, в которой валидация постепенно нарастает по сложности и экологической валидности.

Фаза 1: Офлайн-валидация на корпусе ZuCo (рецептивные задачи)

Цель: оценить способность Conformer-энкодера и адаптера сформировать семантически информативные представления при рецептивном чтении. Данные: ZuCo 2.0 [6] – 18 испытуемых, 739 предложений, 128 каналов, 500 Гц. Ожидаемый результат: точность top-5 ≥ 30 % при семантическом ретривале.

Фаза 2: Офлайн-валидация на датасетах воображаемой речи

Цель: перейти от рецептивных к генеративным нейронным паттернам. Данные: Inner Speech Dataset [15] – 10 испытуемых, более 5600 проб, 128 каналов; MOABB-совместимые датасеты моторного воображения [23, 24]. Ожидаемый результат: значимое превышение случайного базиса при классификации семантических категорий ($p < 0,05$ по критерию Вилкоксона).

Фаза 3: Пилотное испытание в онлайн-режиме

Цель: первичная экологическая валидация в сценарии учебного взаимодействия.

Участники: n = 5–10, включая здоровых добровольцев и, при наличии этического одобрения, участников с ограниченными двигательными возможностями. Оборудование: сухая электродная гарнитура (EMOTIV EPOC+, OpenBCI или аналог). Метрики: точность распознавания намерения, среднее время отклика, субъективная оценка нагрузки (NASA-TLX).

8. Этические ограничения

Применение интерфейса мозг – компьютер в образовательном контексте сопряжено с рядом этических ограничений. Записи электроэнцефалограммы квалифицируются как биометрические персональные данные (ФЗ-152, GDPR ст. 9), что требует минимизации хранимых сырых сигналов, явного отзывного согласия и, при необходимости, федеративного обучения [25]. Декодирующая система не должна принимать необратимых педагогических решений без явного подтверждения: принцип «нейронной автономии» [26] реализуется в предлагаемой системе через двухуровневую процедуру подтверждения при косинусном сходстве ниже порогового значения. Привлечение участников с тяжелыми нарушениями коммуникации требует участия законного представителя и поэтапного протокола согласия с правом выхода.

Заключение

В настоящей статье представлен концептуальный обзор и архитектурные принципы системы «НейроТьютор» – первого предложенного пайплайна, интегрирующего неинвазивное декодирование электроэнцефалограммы с интеллектуальной обучающей системой для обеспечения инклюзивного доступа к персонализированному образованию.

Выполненный сравнительный анализ существующих архитектур декодирования (DeWave, E2T-PTR, BELT-2, BIT, Thought2Text) выявил, что область достигла достаточного уровня зрелости по метрикам семантического качества (BLEU-1 до 52 % на ZuCo), однако ни одна из систем не интегрирована с педагогическим контекстом и не демонстрирует работу в реальном времени.

Предложенная архитектура из четырех модулей (регистрация электроэнцефалограммы → Conformer-энкодер → адаптер с контрастивным обучением (NT-Xent) → онтологический педагогический бэкенд) обеспечивает: (1) формальную спецификацию всех компонентов, достаточную для воспроизведения; (2) аналитически обоснованную задержку 270–525 мс, вписывающуюся в допустимое педагогическое окно; (3) дифференциацию декодирующих артефактов и педагогических ошибок через онтологический reasoner с пороговой логикой.

Когнитивное несоответствие между рецептивными обучающими данными (ZuCo) и генеративной задачей интерфейса рассматривается не как слабость, а как обоснование двухфазной программы офлайн-валидации с последующим пилотным испытанием.

Приоритетными направлениями дальнейших исследований являются: эмпирическая проверка архитектуры на данных воображаемой речи, разработка стратегий доменной адаптации для снижения межсубъектной вариативности, а также оценка готовности к регуляторной сертификации по мере прохождения фаз программы верификации, изложенной в разделе 3.7.

Список литературы

1. Bloom B. S., Engelhart M. D., Furst E. J., Hill W. H., Krathwohl D. R. Taxonomy of Educational Objectives: The Classification of Educational Goals. Handbook I: Cognitive Domain. New York: David McKay, 1956. 207 p.

2. VanLehn K. The relative effectiveness of human tutoring, intelligent tutoring systems, and other tutoring systems // Educational Psychologist. 2011. Vol. 46. Is. 4. P. 197–221. DOI: 10.1080/00461520.2011.611369.

3. Zander T. O., Kothe C. Towards passive brain–computer interfaces: applying brain–computer interface technology to human systems in work and everyday life // Journal of Neural Engineering. 2011. Vol. 8. Is. 2. Art. 025005. DOI: 10.1088/1741-2560/8/2/025005.

4. Touvron H., Martin L., Stone K., Albert P., Almahairi A., Babaei Y., et al. Llama 2: Open Foundation and Fine-Tuned Chat Models // URL: https://ai.meta.com/research/publications/llama-2-open-foundation-and-fine-tuned-chat-models/ (дата обращения: 10.04.2026).

5. Schalk G., McFarland D. J., Hinterberger T., Birbaumer N., Wolpaw J. R. BCI2000: A General-Purpose Brain-Computer Interface (BCI) System // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2004. Vol. 51. Is. 6. P. 1034–1043. DOI: 10.1109/TBME.2004.827072.

6. Hollenstein N., Troendle M., Zhang C., Langer N. ZuCo 2.0: A dataset of physiological recordings during natural reading and annotation // Proceedings of LREC. 2020. P. 138–146. URL: https://aclanthology.org/2020.lrec-1.18 (дата обращения: 10.04.2026).

7. Duan Y., Zhou J., Wang Z., Wang Y.-K., Lin C.-T. DeWave: Discrete Encoding of EEG Waves for EEG to Text Translation // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2023). URL: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2023/hash/1f2fd23309a5b2d2537d063b29ec1b52-Abstract-Conference.html (дата обращения: 10.04.2026).

8. Wang J., Song Z., Ma Z., Qiu X., Zhang M., Zhang Z. Enhancing EEG-to-Text Decoding through Transferable Representations from Pre-trained Contrastive EEG-Text Masked Autoencoder // Proceedings of ACL 2024. 2024. DOI: 10.18653/v1/2024.acl-long.393.

9. Chau C., Duan Y., Chang F., Do T., Wang Y.-K., Lin C.-T. BELT-2: Bootstrapping EEG-to-Language Representation Alignment for Multi-Task Brain Decoding // The Twelfth International Conference on Learning Representations, Vienna Austria May 7th, 2024 to May 11th, 2024. P. 13–20. URL: https://openreview.net/attachment?id=gp5dPMBzMH&name=supplementary_material (дата обращения: 10.04.2026).

10. Zhang Y., He L., Fan C., Liu T., Yu H., Le T., Li J., Linderman S., Duncker L., Willett F. R., Mesgarani N., Paninski L. A cross-species neural foundation model for end-to-end speech decoding // Proceedings of the 14th International Conference on Learning Representations (ICLR 2026). 2026. URL: https://openreview.net/forum?id=Lp1noMpMUG (дата обращения: 10.04.2026).

11. Mishra A., Shukla S., Torres J., Gwizdka J., Roychowdhury S. Thought2Text: Text Generation from EEG Signal using Large Language Models (LLMs) // Findings of the Association for Computational Linguistics: NAACL 2025. Albuquerque, New Mexico: ACL, 2025. P. 3747–3759. DOI: 10.18653/v1/2025.findings-naacl.207. URL: https://aclanthology.org/2025.findings-naacl.207 (дата обращения: 10.04.2026).

12. Baradari D., Kosmyna N., Petrov O., Kaplun R., Maes P. NeuroChat: A neuroadaptive AI chatbot for customizing learning experiences // Proceedings of the 7th ACM Conference on Conversational User Interfaces (CUI 2025). 2025. P. 57:1–57:21. URL: https://dl.acm.org/doi/10.1145/3719160.3736623 (дата обращения: 10.04.2026).

13. Wang Z., Ji H. Open vocabulary electroencephalography-to-text decoding and zero-shot sentiment classification // Proceedings of AAAI. 2022. Vol. 36. P. 5350–5358. DOI: 10.1609/aaai.v36i5.20472.

14. Elgammal S., Alsereidi S., Almansoori M., Alblooshi S., Hireche A., Belkacem A. N. NeuroTutor: Neural Decoding of Student Engagement During Virtual and Robotic Tutoring // IEEE Access. 2025. Vol. 13. P. 123967–123978. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/11071325 (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3585826.

15. Nieto N., Peterson V., Rufiner H. L., Kamienkowski J. E., Spies R. Thinking out loud, an open-access EEG-based BCI dataset for inner speech recognition // Scientific Data. 2022. Vol. 9. Is. 1. Art. 52. DOI: 10.1038/s41597-022-01147-2.

16. Chen T., Kornblith S., Norouzi M., Hinton G. A Simple Framework for Contrastive Learning of Visual Representations // Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning (ICML 2020). PMLR. 2020. Vol. 119. P. 1597–1607. URL: http://proceedings.mlr.press/v119/chen20j.html (дата обращения: 10.04.2026).

17. Clemente J., Ramírez J., de Antonio A. A proposal for student modeling based on ontologies and diagnosis rules // Expert Systems with Applications. 2011. Vol. 38. Is. 7. P. 8066–8078. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.12.146.

18. Yarandi M., Jahankhani H., Tawil A. R. H. Towards adaptive e-learning using decision support systems // International Journal of Emerging Technologies in Learning. 2013. Vol. 8. Is. S1. P. 44–51. DOI: 10.3991/ijet.v8iS1.2350.

19. Anderson L. W., Krathwohl D. R. (eds.) A Taxonomy for Learning, Teaching, and Assessing: A Revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives. New York: Longman, 2001. 352 p. ISBN 0-8013-1903-X.

20. Anikin A., Sychev O. Ontology-Based Modelling for Learning on Bloom's Taxonomy Comprehension Level // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 1014. P. 22–27. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-25719-4_4 (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.1007/978-3-030-25719-4_4.

21. Sychev O., Denisov M., Anikin A. Verifying algorithm traces and fault reason determining // ISWC 2020 Demos and Industry Tracks: From Novel Ideas to Industrial Practice. 2020. Vol. 2721. P. 49–54. URL: https://ceur-ws.org/Vol-2721/paper495.pdf (дата обращения: 10.04.2026).

22. Graesser A. C., Chipman P., Haynes B. C., Olney A. AutoTutor: An intelligent tutoring system with mixed-initiative dialogue // IEEE Transactions on Education. 2005. Vol. 48. Is. 4. P. 612–618. URL: https://bpb-us-w2.wpmucdn.com/blogs.memphis.edu/dist/d/2954/files/2019/10/AutoTutor-An-intelligent-tutoring-system-with-mixed-initiative-dialogue.pdf (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.1109/TE.2005.856149.

23. Aristimunha B., Carrara I., Guetschel P., Sedlar S., Rodrigues P., Sosulski J., Narayanan D., Bjareholt E., Barthelemy Q., Schirrmeister R. T., Kobler R., Kalunga E., Darmet L., Gregoire C., Abdul Hussain A., Gatti R., Goncharenko V., Andreev A., Tates A., Kojima S., Thielen J., Hajhassani D., Begany K., Moreau T., Roy Y., Jayaram V., Barachant,A., Chevallier S. 2026. Mother of all BCI Benchmarks (Version 1.5.0). Zenodo. URL: https://moabb.neurotechx.com/docs/index.html (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.5281/zenodo.10034223.

24. Jayaram V., Barachant A. MOABB: Trustworthy algorithm benchmarking for BCIs // Journal of Neural Engineering. 2018. Vol. 15. Is. 6. Art. 066011. DOI: 10.1088/1741-2552/aadea0.

25. Ienca M., Haselager W. F. G. Hacking the brain: brain-computer interfacing technology and the ethics of neurosecurity // Ethics and Information Technology. 2016. Vol. 18. Is. 2. P. 117–129. DOI: 10.1007/s10676-016-9398-9.

26. Yuste R., Goering S., Arcas B. A. Y., Bi G., Carmena J. M., Carter A., Fins J. J., Friesen P., Gallant J., Huggins J. E., Illes J., Kellmeyer P., Klein E., Marblestone A., Mitchell C., Parens E., Pham M., Rubel A., Sadato N., Specker Sullivan L., Teicher M., Wasserman D., Wexler A., Whittaker M., Wolpaw J. Four ethical priorities for neurotechnologies and AI // Nature. 2017. Vol. 551. Is. 7679. P. 159–163. URL: https://www.nature.com/articles/551159a (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.1038/551159a.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 004.942
DOI 10.17513/snt.40831

CC BY 4.0

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРУДОУСТРОЙСТВА ВЫПУСКНИКОВ ВУЗА НА ОСНОВЕ АКАДЕМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Ромащенко А. И. ORCID ID 0009-0000-8475-1140,
Харитонов И. М. ORCID ID 0000-0002-2671-8729,
Панфилов А. Э. ORCID ID 0000-0002-8038-0888,
Шеховцова Е. С. ORCID ID 0009-0003-7812-3537,
Огар Т. П. ORCID ID 0000-0002-7254-6235

Камышинский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», Камышин, Российская Федерация, e-mail: asoiu@kti.ru

Рост занятости студентов в период обучения делает актуальной задачу оценки факторов, которые связаны с их последующим выходом на рынок труда. В статье рассматривается взаимосвязь между академическими результатами студентов и трудоустройством выпускников по полученному направлению подготовки. Цель исследования – выявление связи между академическими показателями студентов и их последующим трудоустройством по специальности для определения факторов, связанных с профессиональной подготовкой выпускников. В качестве метода использован регрессионный анализ данных об успеваемости и трудоустройстве бакалавров направления «Информатика и вычислительная техника». В модель включены средний балл диплома, средний балл по профильным дисциплинам, наличие диплома о среднем профессиональном образовании, экспертная оценка преподавателей, оценка за выпускную квалификационную работу и сведения о работе студента в период обучения. Полученные результаты показывают, что наиболее выраженная связь с профильным трудоустройством наблюдается у общего среднего балла диплома и среднего балла по специальным дисциплинам. Наличие диплома о среднем профессиональном образовании и факт работы во время обучения в однофакторной постановке не показали заметной объяснительной способности, что указывает на необходимость более детального учета характера предшествующего образования и трудового опыта. Выводы исследования могут применяться при корректировке образовательных программ, сопровождении студентов и развитии механизмов ранней оценки профессиональной траектории выпускников.

Ключевые слова: регрессионный анализ, прогнозирование трудоустройства, академическая успеваемость, трудоустройство выпускников, академические показатели, профильное трудоустройство, образовательная аналитика

THE USE OF REGRESSION ANALYSIS TO PREDICT THE EMPLOYMENT OF UNIVERSITY GRADUATES BASED ON ACADEMIC INDICATORS

Romaschenko A. I. ORCID ID 0009-0000-8475-1140,
Kharitonov I. M. ORCID ID 0000-0002-2671-8729,
Panfilov A. E. ORCID ID 0000-0002-8038-0888,
Shekhovtsova E. S. ORCID ID 0009-0003-7812-3537,
Ogar T. P. ORCID ID 0000-0002-7254-6235

Kamyshin Technological Institute (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Technical University", Kamyshin, Russian Federation, e-mail: asoiu@kti.ru

The increasing involvement of students in employment during their studies makes it important to identify factors associated with their subsequent transition to the labor market. This paper examines the relationship between students' academic outcomes and graduates' employment in their field of training. The purpose of the study is to identify the relationship between the academic performance of students and their subsequent employment in the specialty in order to determine the factors related to the professional training of graduates. Regression analysis was used to process data on the academic performance and employment of bachelor's graduates in Computer Science and Engineering. The model includes the overall diploma grade point average, the average grade in specialized subjects, the presence of a secondary vocational education diploma, teachers' expert assessment, the grade for the final qualification work, and information about employment during studies. The results indicate that field-specific employment is most strongly associated with the overall diploma grade point average and the average grade in specialized disciplines. The presence of a secondary vocational education diploma and the fact of working during studies did not demonstrate substantial explanatory power in single-factor models, which suggests that the type and relevance of prior education and work experience should be considered in more detail. The findings can be used to adjust educational programs, support students, and improve early assessment of graduates' professional trajectories.

Keywords: regression analysis, employment forecasting, academic performance, graduate employment, academic indicators, specialized employment, educational analytics

Введение

Совмещение обучения с трудовой деятельностью стало распространенной практикой среди студентов [1]. Для одних работа является способом обеспечить личный доход, для других – возможностью раньше включиться в профессиональную среду и проверить получаемые знания на практике [2]. Наиболее значимым для образовательной траектории является опыт, связанный с направлением подготовки, поскольку он позволяет студенту сопоставлять учебный материал с реальными производственными и проектными задачами [3].

При этом занятость в период обучения не всегда усиливает образовательный результат. Если рабочая нагрузка становится чрезмерной или не имеет отношения к будущей профессии, у студента сокращается время на подготовку, растет утомляемость, увеличивается риск пропусков и снижается вовлеченность в учебный процесс [4]. В таком случае работа может не поддерживать профессиональное развитие, а конкурировать с учебной деятельностью.

Поэтому образовательной организации важно рассматривать сведения о занятости выпускников не отдельно, а вместе с академическими данными, накопленными в период обучения. Такой подход дает возможность заранее выделять признаки, связанные с дальнейшей профессиональной реализацией, а также выявлять группы студентов, которым может потребоваться дополнительное сопровождение со стороны кафедры, кураторов или администрации образовательной программы.

Для технических направлений подготовки данная задача имеет особое значение. Работодатели оценивают выпускника не только по факту получения диплома, но и по уровню освоения профильных дисциплин, практических навыков, владения инструментами разработки и способности быстро включаться в рабочие процессы. В связи с этим анализ академических показателей может использоваться как один из элементов оценки качества подготовки студентов и как основание для точечной корректировки образовательной программы [5, 6].

Цель исследования – выявление связи между академическими показателями студентов и их последующим трудоустройством по специальности для определения факторов, связанных с профессиональной подготовкой выпускников. Для достижения поставленной цели рассматривается взаимосвязь между результатами обучения студентов в вузе и их дальнейшей занятостью в профессиональной области, соответствующей выбранному направлению подготовки. В качестве примера для проведения исследования выбраны данные об успеваемости студентов-бакалавров, обучающихся по программе высшего образования (далее – ВО) технического направления 09.03.01 Информатика и вычислительная техника (далее – ИВТ) в Камышинском технологическом институте (филиале) Волгоградского государственного технического университета.

Материалы и методы исследования

В центре исследования находится количественная оценка связи между профильным трудоустройством выпускников и учебными характеристиками, которые фиксируются в период обучения. К числу таких характеристик отнесены общий средний балл диплома, результаты по профильным дисциплинам, наличие предшествующего профессионального образования и опыт работы во время учебы [7].

Для анализа использован регрессионный подход, позволяющий оценить, насколько отдельные показатели связаны с результатом, выраженным через трудоустройство выпускника после окончания вуза [8, 9]. В рамках данной работы регрессионная модель рассматривается не как инструмент окончательного предсказания судьбы конкретного студента, а как способ выявления факторов, которые сильнее или слабее связаны с критериальной переменной.

В модели зависимой переменной выступает показатель трудоустройства выпускника после завершения обучения. Независимые переменные, или предикторы, отражают результаты освоения образовательной программы и отдельные характеристики образовательной и профессиональной траектории студента [10].

В качестве предикторов были использованы следующие показатели:

1. Наличие диплома о среднем профессиональном образовании (далее – СПО) (имеется ли диплом, совпадает ли специальность обучения на СПО с направлением обучения на ВО) [11].

2. Средний балл диплома по профильным предметам.

3. Усредненная экспертная оценка преподавателей выпускающей кафедры, оценивающая успешность изучения студентом профилирующих дисциплин.

4. Оценка, полученная за выпускную квалификационную работу (далее – ВКР).

5. Средний балл диплома по всем предметам.

6. Работа во время обучения (работал ли студент в период обучения в вузе или нет).

Наличие диплома СПО	Ср. балл по проф. предметам	Оценка преподавателя	ВКР	Ср. балл	Работа во время учебы	Работа после учебы	ФИО студента
0	74,35	41	76	75,88	0	50	1
0	67,42	41,45455	80	72,93	0	50	2
0	82,59	40	76	83,41	0	50	3
0	68	25,7	90	71,41	0	50	4
0	90,11	82,1	91	95,88	0	100	5
0	83,46	71,4	86	86,94	0	100	6
50	76	28,6	68	77,2	0	0	7
100	68,59	29	83	73,06	0	50	8
0	85,04	57,7	87,0	82,9	0	100	9
0	77,29	80	93	82,47	0	100	10
0	99,62	97,9	100	97,6	0	100	11
0	99,24	99,2	100	98,03	0	100	12
0	98,31	95,4	100	95,49	0	100	13
0	96,35	98	100	96,34	0	100	14
0	69,46	37,1	74	76,3	0	50	15

Рис. 1. Пример исходных данных предикторов и критериальных переменных для регрессионного анализа
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

В качестве предикторов выбраны данные, собранные во время анкетирования студентов по трудоустройству во время обучения и после выпуска. Пример исходных данных для анализа представлен на рис. 1.

Перед расчетами была выполнена подготовка исходных данных [12]. Для категориальных переменных, связанных с образовательным и профессиональным статусом студентов, использована единая шкала кодирования. Такой прием позволил включить качественные признаки в количественную модель и сопоставить их с академическими показателями. Каждому признаку присвоена интерпретация в соответствии с заданной шкалой измерения:

1) Наличие или отсутствие диплома СПО:

− Значение 0 соответствует отсутствию диплома СПО.

− Значение 50 указывает на наличие диплома СПО, полученного не по специальности, связанной с обучением по направлению ВО.

− Значение 100 присвоено студентам, имеющим диплом СПО по профильной специальности, связанной с обучением по направлению ВО.

2) Работа во время обучения:

− 0 – студент не совмещает обучение с трудовой деятельностью.

− 50 – студент работает в сфере, не соответствующей направлению обучения в вузе.

− 100 – студент работает в сфере, соответствующей направлению обучения в вузе.

3) Работа после обучения:

− 0 – выпускник не трудоустроен на момент исследования.

− 50 – выпускник работает вне профессиональной области, связанной с полученной квалификацией.

− 100 – выпускник трудоустроен по профильной специальности.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе исследования была проверена гипотеза о наличии линейной связи между академической успеваемостью студентов и их последующим трудоустройством по специальности [13]. Предполагалось, что более высокие учебные результаты могут сопровождаться большей вероятностью занятости в профессиональной области. Для направления ИВТ профильным трудоустройством считалась работа в сфере информационных технологий.

В выборку вошли данные студентов направления ИВТ, завершивших обучение в 2020, 2021, 2022 и 2023 гг. Сведения о занятости собирались по результатам анкетирования выпускников на момент окончания обучения и через 6 месяцев после выпуска. Общий объем выборки составил 88 студентов.

Для проверки гипотезы были построены регрессионные модели, отражающие связь между результатами обучения и трудоустройством выпускников [14]. Такие модели позволяют по имеющимся академическим и биографическим данным оценить, какие показатели дают больший вклад в объяснение итоговой занятости, а какие не усиливают прогноз.

ВЫВОД ИТОГОВ						
Регрессионная статистика						
Множественный R	0,67182					
R-квадрат	0,45134					
Нормированный R-квадрат	0,41069					
Стандартная ошибка	20,0401					
Наблюдения	88					
Дисперсионный анализ						
	df	*SS*	*MS*	*F*	*ачимость F*	
Регрессия	6	26759,6	4459,93	11,1052	5,3E-09	
Остаток	81	32530,2	401,607			
Итого	87	59289,8				
Коэффициенты						
Y-пересечение	-53,882					
Переменная X 1	-0,0036					
Переменная X 2	-0,0656					
Переменная X 3	0,11954					
Переменная X 4	0,16322					
Переменная X 5	1,39684					
Переменная X 6	-0,0015					

Рис. 2. Результаты регрессионного анализа с учетом всех предикторов
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

В состав предикторов вошли ранее выделенные показатели: наличие диплома СПО, средний балл по профильным дисциплинам, экспертная оценка преподавателей выпускающей кафедры, оценка за ВКР, общий средний балл диплома и сведения о работе студента во время обучения. Зависимой переменной был результат трудоустройства после выпуска из вуза [15]. При построении модели использовалось предположение о линейном характере связи между независимыми переменными и критериальной переменной.

На рис. 2 приведены результаты регрессионного анализа, выполненного с учетом всех выбранных предикторов.

Множественный коэффициент корреляции составил 0,67. Это значение указывает на заметную линейную связь между совокупностью независимых переменных X1–X6 и зависимой переменной Y. Коэффициент детерминации R^2 равен 0,45, следовательно, модель объясняет около 45% вариации зависимой переменной. Нормированный R^2 составил 0,41, что ниже обычного R^2 из-за учета количества включенных предикторов и наличия факторов со слабым вкладом в объяснение результата.

Стандартная ошибка регрессии составила 20,04. Данный показатель характеризует средний размер отклонения фактических значений зависимой переменной от значений, предсказанных регрессионной моделью. Небольшие коэффициенты при переменных X1, X2 и X6 могут указывать на ограниченное влияние соответствующих предикторов. Для более строгой интерпретации требуется дальнейший анализ t-статистик и p-значений по каждой переменной.

Сводные результаты однофакторного регрессионного анализа, отражающие связь отдельных предикторов с критериальной переменной, представлены в таблице.

Полученные значения позволяют разделить показатели по степени их связи с трудоустройством. Экспертная оценка преподавателей демонстрирует умеренную объяснительную способность: R^2 составляет 0,28, то есть показатель отражает лишь часть изменений зависимой переменной. Стандартная ошибка регрессии составляет 22,10, что указывает на умеренную точность модели и ограничивает возможность ее использования для точного индивидуального прогнозирования.

Сводные результаты регрессионного анализа

	Множественный R	R-квадрат	Нормированный R-квадрат	Стандартная ошибка регрессии
Оценка преподавателей	0,53	0,28	0,27	22,10
Наличие диплома СПО	0,01	0,00024	-0,01	26,20
Средний балл по профильным предметам	0,63	0,39	0,39	20,36
Оценка за ВКР	0,49	0,24	0,23	22,82
Средний балл диплома	0,66	0,44	0,43	19,61
Работа во время обучения	0,03	0,001	-0,01	26,23

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Наличие диплома СПО практически не связано с изменением зависимой переменной. Значение R^2 равно 0,00024, а нормированный R^2 принимает отрицательное значение -0,01. Это означает, что включение данного фактора не улучшает качество модели. Стандартная ошибка регрессии остается высокой и составляет 26,20, что дополнительно подтверждает слабую объяснительную способность данного предиктора.

Средний балл по профильным дисциплинам показал более выраженную связь с результатом. Значение R^2 равно 0,39, что является одним из наиболее высоких показателей среди рассмотренных академических характеристик. Стандартная ошибка регрессии составила 20,36, что свидетельствует о более высоком качестве аппроксимации по сравнению с моделями, основанными на экспертной оценке и наличии диплома СПО.

Оценка за ВКР объясняет около 24 % вариации зависимой переменной. Этот результат ниже, чем у среднего балла по профильным дисциплинам и общего среднего балла диплома. Стандартная ошибка регрессии равна 22,82, поэтому оценку за ВКР целесообразно рассматривать как дополнительный фактор, а не как самостоятельный предиктор трудоустройства.

Наиболее высокую объяснительную способность среди отдельных показателей продемонстрировал общий средний балл диплома. При R^2, равном 0,44, и стандартной ошибке регрессии 19,61 модель демонстрирует наилучшие показатели среди рассмотренных однофакторных вариантов, однако точность прогноза остается умеренной. Полученный результат свидетельствует о наличии заметной связи между общей академической успеваемостью и дальнейшим трудоустройством по специальности.

Показатель работы во время обучения в однофакторной модели не дал выраженного результата: множественный R равен 0,03, R^2 составляет 0,001, нормированный R^2 равен -0,01, а стандартная ошибка достигает 26,23. Вероятная причина состоит в неоднородности самого признака. Работа студентов могла различаться по сфере, должности, нагрузке, уровню ответственности и степени соответствия направлению подготовки.

Таким образом, наиболее информативными показателями в рамках проведенного анализа стали общий средний балл диплома и средний балл по профильным дисциплинам. Эти результаты позволяют предположить, что для профессиональной реализации выпускника значимы как общий уровень академической успеваемости, так и качество освоения специальных дисциплин. Наличие диплома СПО не показало заметной связи с зависимой переменной, а показатель работы во время обучения требует более детальной декомпозиции. Для повышения точности модели в дальнейшем целесообразно учитывать результаты производственной практики, участие в учебных и прикладных проектах, наличие портфолио, опыт работы именно по специальности и уровень владения профессиональными инструментами.

Заключение

В исследовании рассмотрена гипотеза о наличии линейной связи между академическими показателями студентов и их последующим трудоустройством по специальности. Для ее проверки были построены регрессионные модели, позволяющие оценить вклад отдельных характеристик, фиксируемых в период обучения, в объяснение дальнейших карьерных результатов выпускников.

Анализ показал, что наиболее выраженная связь с профильным трудоустройством наблюдается у общего среднего балла диплома. Значимым ориентиром также выступает средний балл по профильным дисциплинам, поскольку он отражает уровень

освоения предметов, непосредственно связанных с направлением подготовки. Следовательно, академическая успеваемость может рассматриваться как один из факторов, статистически связанных с профессиональной реализацией выпускника.

Наличие диплома СПО, экспертная оценка преподавателей и факт работы во время обучения показали более слабую связь с результатом. Минимальная объяснительная способность была получена по показателю наличия диплома СПО. Это может объясняться тем, что для дальнейшего трудоустройства важнее не сам факт предыдущего образования, а актуальные знания, практические умения и результаты, сформированные уже в период обучения в вузе.

Перспективы развития модели связаны с расширением набора факторов, более точно описывающих профессиональную активность студентов. К таким факторам можно отнести опыт работы по специальности, результаты производственной практики, участие в прикладных проектах, наличие портфолио и уровень владения профессиональными программными средствами. Кроме линейной регрессии в дальнейшем возможно применение деревьев решений, случайного леса и градиентного бустинга. Эти методы позволяют учитывать более сложные зависимости между признаками и потенциально способны повысить объяснительную и прогностическую способность моделей.

Список литературы

1. Шмарихина Е. С. Исследование факторов успеваемости обучающихся // Вестник НГУЭУ. 2018. № 3. С. 130–143. EDN: MDDOMP.

2. Толстенева А. А., Буланина А. Е. Социологическое исследование студентов: оценка возможности совмещения работы с обучением // Образование и проблемы развития общества. 2020. № 1 (10). С. 198–206. EDN: FBSGEM.

3. Гогина Н. А. Конкурентоспособность выпускника как фактор трудоустройства // Высшее образование в России. 2010. № 12. С. 151–154. EDN: NCUIAV.

4. Бируля М. Д. Стратегии предотвращения и управления выгоранием в управлении проектами и персоналом: комплексный подход // Управление персоналом и интеллектуальными ресурсами в России. 2024. Т. 13. № 4. С. 38–42. EDN: VXLNAQ.

5. Рогозин А. Ю. Необходимость повышения качества высшего образования, получаемого в частных высших учебных заведениях, с учетом опыта частных университетов Новой Зеландии // Вестник Череповецкого государственного университета. 2023. № 1 (112). С. 216–225. DOI: 10.23859/1994-0637-2023-1-112-18. EDN: ZRBLRQ.

6. Бондаренко Н. А. Адаптация системы высшего образования к потребностям рынка труда // Ученые заметки ТОГУ. 2025. Т. 16. № 1. С. 234–239. EDN: UMGYMM.

7. Чекмарев О. П. Влияние результатов сдачи ЕГЭ на успеваемость студентов вузов // Научный вклад молодых исследователей в сохранение традиций и развитие АПК: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов (г. Санкт-Петербург – г. Пушкин, 26–27 марта 2015 г.). Ч. II. СПб.: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2015. С. 224–226. EDN: ZFILSR.

8. Харитонов И. М., Крушель Е. Г., Привалов О. О., Степанченко И. В., Степанченко О. В. Прогнозирование качества обучения в вузе с помощью методов регрессионного анализа // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2021. № 56 (82). С. 72–80. DOI: 10.36807/1998-9849-2020-56-82-72-80. EDN: PCHGYF.

9. Чиркина Т. А. Социально-экономическое положение и выбор образовательной траектории учащимися: теоретические подходы к изучению взаимосвязи // Экономическая социология. 2018. Т. 19. № 3. С. 109–125. DOI: 10.17323/1726-3247-2018-3-109-125. EDN: USNDVX.

10. Базилевский М. П., Носков С. И. Алгоритм построения линейно-мультипликативной регрессии // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 1 (29). С. 88–92. EDN: NTWQZT.

11. Шинкаренко Е. А. Первая работа молодежи: желаемые сценарии и реальные практики // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Общественные науки. 2022. № 2 (62). С. 18–28. DOI: 10.21685/2072-3016-2022-2-2. EDN: UFOOHO.

12. Москвичев А. Д., Долгачев М. В. Нормализация журналов событий с использованием дерева фиксированной глубины // Вопросы кибербезопасности. 2020. № 2 (36). С. 76–82. DOI: 10.21681/2311-3456-2020-2-76-82. EDN: LHRGAR.

13. Каплан Е. А., Ерицян К. Ю. Работа и учеба у студентов вузов: конфликт или фасилитация? // Мониторинг. 2020. № 4 (158). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rabota-i-ucheba-u-studentov-vuzov-konflikt-ili-fasilitatsiya (дата обращения: 28.04.2026).

14. Гранков М. В., Аль-Габри В. М. Регрессионная модель успеваемости студенческих групп вуза / Инженерный вестник Дона. 2017. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4058 (дата обращения: 28.04.2026).

15. Алашеев С. Ю. Карьера выпускников: составляющие и факторы профессионального успеха // Профессиональное образование в России и за рубежом. 2015. № 4 (20). С. 191–200. EDN: VDWFTT.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 004.272.26
DOI 10.17513/snt.40832

CC BY 4.0

ВЕКТОРЫ РАЗВИТИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ: ПАТЕНТНЫЙ АНАЛИЗ АППАРАТНЫХ И ПРОГРАММНЫХ РЕШЕНИЙ

Сарайкин А. И. ORCID ID 0009-0005-3954-8027

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет имени В. А. Бондаренко», Оренбург, Российская Федерация, e-mail: saraikin-a@yandex.ru

Современное развитие вычислительной техники характеризуется переходом от наращивания тактовой частоты к массовому внедрению параллельных архитектур, однако эффективное использование многоядерных и гетерогенных систем требует решения таких проблем, как минимизация задержек доступа к памяти, распределение задач и синхронизация. Цель исследования – выявление и систематизация перспективных векторов развития параллельной обработки данных на основе патентного анализа, а также определение ключевых патентообладателей, формирующих технологический базис в данной области. В работе проанализирована выборка из 294 274 патентов, поданных в ведущие мировые ведомства за 2005–2025 гг., с использованием методов количественного анализа и тематического кластерирования. Результаты демонстрируют устойчивый рост патентной активности (среднегодовой темп прироста 5,9 %) и географическую концентрацию патентообладателей в США (82,9 %). Выделено четыре технологических вектора: оптимизация доступа к памяти (38,0 %), потоковая и распределенная обработка данных (26,8 %), специализированные аппаратные архитектуры (17,7 %), а также управление задачами и синхронизация (17,5 %). Доминирование первого вектора подтверждает, что ключевой проблемой индустрии являются задержки при перемещении данных между вычислительными ядрами и подсистемой памяти. В ближайшие 5–7 лет технологии процессоров в памяти, оптические межсоединения и аппаратные ускорители сетевых функций могут перейти в разряд промышленных стандартов, однако сохраняется риск фрагментации и вендор-зависимости. Научная новизна заключается в количественном выявлении структуры патентной активности и эмпирическом доказательстве приоритета оптимизации доступа к памяти над задачами синхронизации.

Ключевые слова: параллельная обработка данных, оптимизация памяти, многопроцессорные системы, потоковая обработка

VECTORS OF DEVELOPMENT OF PARALLEL DATA PROCESSING: PATENT ANALYSIS OF HARDWARE AND SOFTWARE SOLUTIONS

Saraykin A. I. ORCID ID 0009-0005-3954-8027

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Orenburg State University named after V. A. Bondarenko", Orenburg, Russian Federation, e-mail: saraikin-a@yandex.ru

Current developments in computer technology are characterized by a shift from increasing clock frequency to the widespread adoption of parallel architectures. However, the effective use of multi-core and heterogeneous systems requires addressing challenges such as minimizing memory access latency, task distribution, and synchronization. The aim of this study is to identify and systematize promising vectors for the development of parallel data processing based on patent analysis, as well as to determine the key patent holders shaping the technological foundation in this field. A sample of 294,274 patents filed with leading global patent offices between 2005 and 2025 was analyzed using quantitative analysis and thematic clustering. The results demonstrate steady growth in patent activity (compound annual growth rate of 5.9 %) and a geographic concentration of patent holders in the United States (82.9 %). Four technological vectors are identified: memory access optimization (38.0 %), streaming and distributed data processing (26.8 %), specialized hardware architectures (17.7 %), and task management with synchronization (17.5 %). The dominance of the first vector confirms that the key industry challenge is latency in data transfer between computing cores and the memory subsystem. In the next 5–7 years, technologies such as processing-in-memory (PIM), optical interconnects, and hardware accelerators for network functions may become industry standards; however, the risk of fragmentation and vendor lock-in remains. The scientific novelty lies in the quantitative identification of the patent activity structure and empirical evidence of the priority of memory access optimization over synchronization tasks.

Keywords: parallel data processing, memory optimization, stream processing, multiprocessor systems

Введение

Современный этап развития вычислительной техники характеризуется фундаментальным сдвигом: эпоха наращивания тактовой частоты процессоров уступила место эпохе параллелизма. Экспоненциальный рост объемов данных, обусловленный развитием интернета вещей и систем искусственного интеллекта, предъявляет качественно новые требования к производительности вычислительных систем. В ответ индустрия движется по пути массового внедрения многоядерных процессоров, графических ускорителей и распределенных

сред, где эффективность параллельной обработки становится критическим фактором конкурентоспособности.

Однако простого увеличения числа вычислительных ядер недостаточно. Ключевые проблемы лежат в распределении задач между гетерогенными ресурсами, минимизации задержек при доступе к памяти, синхронизации процессов и преодолении проблемных мест коммуникации. Решение этих проблем требует развития методов параллельного программирования, оптимизирующих компиляторов, алгоритмов планирования задач и структур данных для многопоточных систем. Их совершенствование невозможно без понимания долгосрочных технологических трендов.

В этом контексте патентная документация выступает уникальным источником информации о стратегических направлениях технологического развития. В отличие от академических публикаций, патенты фиксируют инженерные решения, готовые к коммерциализации, что позволяет достоверно прогнозировать векторы развития вычислительной техники.

Цель исследования – выявление и систематизация перспективных векторов развития параллельной обработки данных на основе патентного анализа (2005–2025 гг.), а также определение ключевых патентообладателей, формирующих технологический базис в данной области.

Научная новизна исследования состоит в том, что впервые на масштабном патентном массиве (294 274 документа) количественно выделены доли четырех технологических векторов параллельной обработки данных, эмпирически доказано доминирование проблематики доступа к памяти (38,0 %) над задачами синхронизации (17,5 %), а также на основе динамики патентования предложен среднесрочный прогноз перехода трех классов технологий в промышленные стандарты с оценкой риска вендор-зависимости.

Материалы и методы исследования

Исследование основано на анализе патентных заявок, поданных в ведущие мировые патентные ведомства в период с 1 января 2005 г. по 1 января 2026 г. В выборку вошли документы из ведомства по патентам и товарным знакам США, Европейского патентного ведомства, Всемирной организации интеллектуальной собственности, Японского патентного ведомства, Национального управления интеллектуальной собственностью Китая, а также национальные ведомства других стран. Данные о патентах были собраны с использованием поискового запроса по ключевому словосочетанию: «параллельная обработка данных». В результате первичного поиска было выявлено 281 385 патентных документов. Анализ включал количественную оценку динамики патентования, географического распределения, активности патентообладателей, а также тематическое кластерирование для выделения ключевых технологических направлений.

В ходе исследования применялись методы машинного обучения: тематическое моделирование на основе TF-IDF, косинусная мера близости и агломеративная кластеризация для выделения технологических векторов. Динамика патентной активности оценивалась с помощью расчета среднегодового темпа прироста и линейного регрессионного анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлена диаграмма, отображающая динамику регистрации патентов с 2005 по 2025 г. Анализ временной динамики демонстрирует устойчивый рост патентной активности в области параллельной обработки данных. С 2005 по 2025 г. количество ежегодных публикаций выросло с 5842 до 18 328, что соответствует среднегодовому темпу прироста около 5,9 %. Пик активности пришелся на 2020 г. – 21 836 заявок. Линия тренда на диаграмме имеет линейный возрастающий характер.

Географический анализ (таблица) демонстрирует концентрацию патентной активности в США, а также заметный вклад международных и европейских заявок. Все остальные юрисдикции в совокупности не превышают 2 %, что указывает на лидерство США и Европы в области разработки технологий параллельной обработки данных.

Анализ распределения патентов по заявителям (рис. 2) позволяет выделить несколько групп ключевых игроков. Абсолютным лидером является IBM (46 484 патента), что отражает многолетние инвестиции компании в исследования в области высокопроизводительных вычислений. Microsoft (совокупно 40 269 патентов с учетом двух юридических лиц) занимает доминирующее положение в сегменте программных платформ. Intel (20 934 патента) и Nvidia (5332 патента) формируют аппаратный базис, разрабатывая специализированные процессоры и ускорители. Присутствие AT&T (9249 патентов) и Qualcomm (1930 патентов) свидетельствует о значимости параллельной обработки для телекоммуникационных задач.

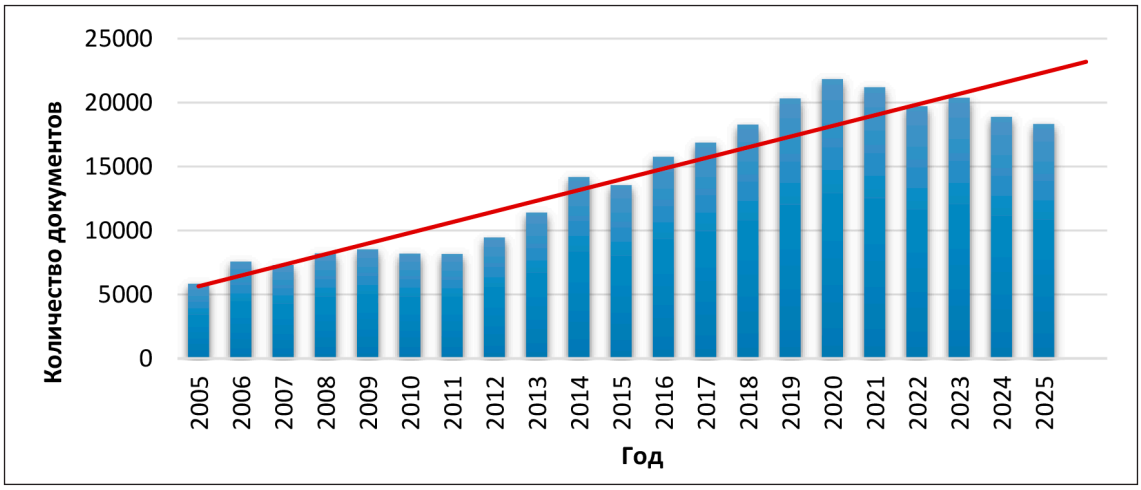


Рис. 1. Динамика регистрации патентов по параллельной обработке данных с 2005 по 2025 г.
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Распределение патентов по ведущим юрисдикциям

Юрисдикция	Количество документов	Доля, %
Ведомство по патентам и товарным знакам США (USPTO)	244 072	82,94
Всемирная организация интеллектуальной собственности (WIPO)	29 405	9,98
Европейское патентное ведомство (EPO)	18 820	6,4
Национальное управление интеллектуальной собственности Китая (CNIPA)	931	0,32
Японское патентное ведомство (JPO)	463	0,16
Прочие	583	0,2

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

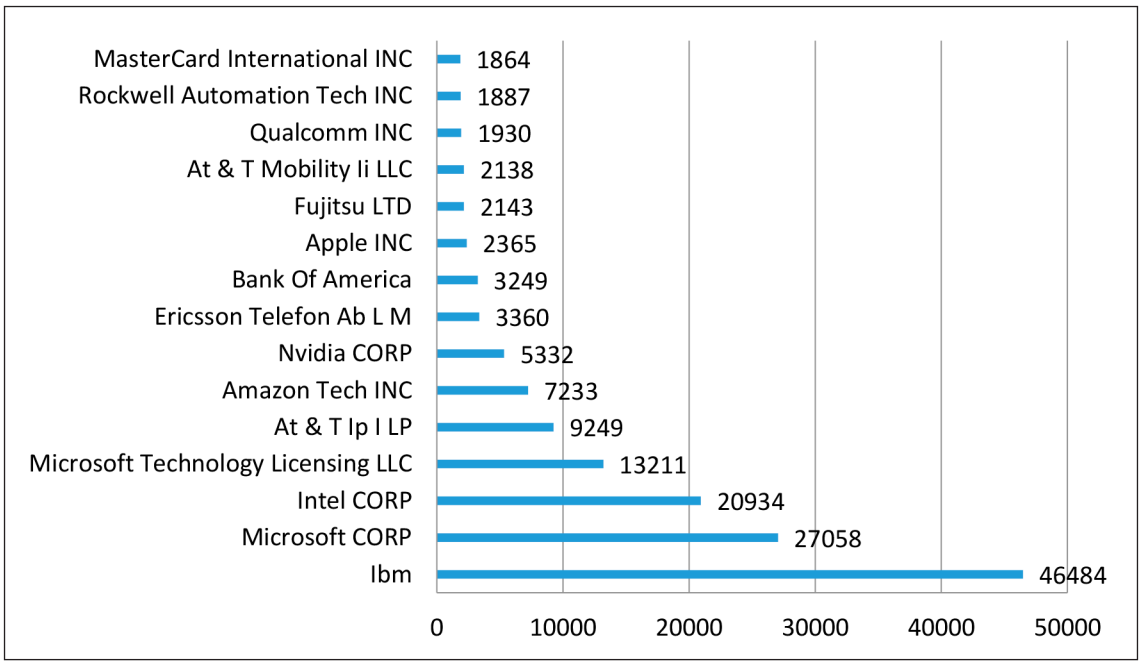


Рис. 2. Крупнейшие патентообладатели в области параллельной обработки данных
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

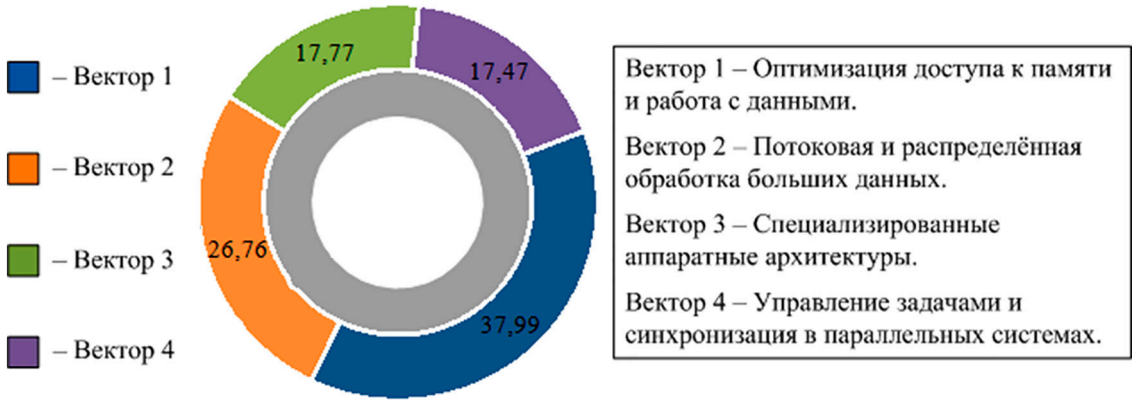


Рис. 3. Распределение патентной активности по технологическим векторам
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Патентная активность в тематике параллельной обработки данных оказалась почти монопольной США (82,9 %), тогда как в научных публикациях их доля составляет лишь 38,4 % – разрыв более чем вдвое. Для научного планирования это означает, что патентный и публикационный ландшафты не совпадают и их необходимо анализировать раздельно. Присутствие Bank of America среди лидеров патентования (3249 патентов) – первый количественный сигнал того, что финансовый сектор стал самостоятельным генератором технологий параллельных вычислений. На практике патентный мониторинг должен включать не только ИТ-корпорации, но и компании из сферы финансовых услуг.

На основе тематической кластеризации патентных документов выделены четыре стратегических вектора, определяющих развитие параллельной обработки данных. Распределение патентной активности по векторам представлено на рис. 3.

Вектор 1. Оптимизация доступа к памяти и работа с данными.

Данный вектор является доминирующим по объему патентной активности, что отражает фундаментальную проблему современной вычислительной техники – растущее отставание скорости доступа к данным от скорости работы процессоров. Патенты этого вектора направлены на минимизацию задержек при перемещении данных между вычислительными ядрами и подсистемой памяти. Ключевые технологические подходы включают широковещательную передачу данных, при которой единый запрос к памяти обслуживает группу вычислительных ядер вместо множества независимых обращений, что сокращает число запросов с 32 до 8 на примере матричных операций [1, 2]. Процессоры в памяти (PIM), интегрирующие вычисления непосредственно в структуру памяти [3], а также предварительную загрузку данных специализированными легковесными ядрами [4].

Лидирующие позиции в этом векторе занимают AMD, Intel, Micron, Apple и Nvidia. Присутствие как производителей чипов, так и специализированных компаний в области памяти подтверждает междисциплинарный характер данного направления. Технологии, разрабатываемые в рамках этого вектора, создают физический фундамент для реализации всех остальных направлений: без эффективного доступа к памяти ни гетерогенные вычисления, ни потоковая обработка не достигнут требуемой производительности.

Вектор 2. Потоковая и распределенная обработка больших данных.

Данный вектор охватывает патенты, ориентированные на обработку непрерывных потоков данных в распределенных средах. Доля в 26,76 % отражает растущую потребность в анализе данных в реальном времени, характерную для телекоммуникаций, интернет-торговли, финансового мониторинга и IoT. Ключевые решения включают методы группировки запросов для минимизации межузловых коммуникаций на основе анализа ключей партиционирования [5], специализированные языки запросов для обработки вложенных и последовательных структур данных [6], а также инкрементную обработку, при которой анализируются только изменения между наборами данных без пересчета всего массива [7]. Российские патенты RU 2758583 [8] и RU 2737032 [9] подтверждают востребованность потоковой обработки в прикладных задачах (видеодекодирование, телеметрия).

Ведущие патентообладатели – AT&T, Google, IBM, Amazon и eBay, что подтверждает высокую востребованность техноло-

гий потоковой обработки в секторах связи, электронной коммерции и облачных сервисах. Отличительной особенностью данного вектора является его ярко выраженная прикладная направленность: патенты здесь нередко создаются не производителями оборудования, а компаниями-операторами, решающими конкретные бизнес-задачи на миллиардах пользовательских запросов.

Вектор 3. Специализированные аппаратные архитектуры.

Данный вектор включает патенты на принципиально новые вычислительные архитектуры, ориентированные на решение специфических классов задач. Ключевые подходы включают аппаратные ускорители для параллельной обработки сетевых функций с динамическим преобразованием последовательных цепочек в гибридные [10, 11]. Другой подход – переупорядочивание данных для SIMD-обработки непосредственно в сетевом интерфейсе, что снижает нагрузку на центральный процессор [12]. Также предлагаются методы увеличения пропускной способности за счет параллельной передачи данных через несколько интерфейсов, когда вспомогательный ускоритель передает данные целевому устройству через высокоскоростное межсоединение [13], а также интегральные схемы с параллельной обработкой на основе множества тайлов, каждый из которых содержит процессор и коммутатор для передачи данных между тайлами [14]. Аппаратные решения на уровне контроллеров узлов и QPI-пулов представлены в патенте [15].

Лидирующие позиции в этом векторе занимают Intel, AT&T и специализированные компании. Характерной особенностью является длительный цикл внедрения: многие запатентованные технологии опережают текущие возможности массового производства. Патентная активность в этом векторе отражает стратегическое патентование перспективных направлений, которые могут стать стандартом через 5–7 лет.

Вектор 4. Управление задачами и синхронизация в параллельных системах.

Данный вектор фокусируется на фундаментальных проблемах координации параллельно выполняемых задач: управление зависимостями, управление конфликтами параллельных задач, синхронизация доступа к разделяемым ресурсам. Относительно скромная доля в 17,47 % объясняется тем, что многие решения в этой области стали стандартными и патентуются не как самостоятельные изобретения, а в составе более крупных систем (векторы 2 и 3). Ключевые подходы включают: аппаратные ускорители для управления зависимостями задач с возможностью переключения на программное управление при нехватке памяти [16]; динамическое планирование потоков с избеганием конфликтов, обеспечивающее ускорение факторного анализа и кластеризации [17]; а также аппаратную поддержку динамического создания микропотоков на основе анализа производительности в реальном времени, когда специальная схема управления потоками принимает решение о параллелизации на основе таких метрик, как количество инструкций за цикл и конфликты чтения-записи [18]. Методы хеширования состояний, распараллеливания в логическом и агентно-ориентированном программировании предложены в патентах [19–21].

Ведущие патентообладатели в этом векторе – Arm, AMD, Intel и SAS Institute. Характерной особенностью является сочетание аппаратных решений (специализированные контроллеры зависимостей) и программных методов (алгоритмы планирования). Несмотря на относительно невысокую долю, этот вектор обеспечивает базовую инфраструктуру для всех параллельных систем: без надежной синхронизации и управления зависимостями масштабирование вычислений становится невозможным.

Заключение

Проведенный патентный анализ подтверждает, что развитие высокопроизводительных вычислений определяется не простым наращиванием числа ядер, а решением фундаментальной проблемы – отставанием скорости доступа к памяти от производительности процессоров. Именно это формирует доминирующий тренд: переход к архитектурам, минимизирующим перемещение данных.

В долгосрочной перспективе успех будет определяться способностью интегрировать гетерогенные вычислительные ресурсы (CPU, GPU, FPGA, NPU) в единые платформы с эффективным управлением памятью. Технологии, которые активно патентуются сегодня, включая процессоры в памяти (PIM), оптические межсоединения и аппаратные ускорители сетевых функций, в ближайшие 5–7 лет могут перейти из разряда экспериментальных в промышленные стандарты. Однако сохраняется риск фрагментации: отсутствие открытых протоколов и доминирование проприетарных решений создают предпосылки для вендор-зависимости, что может замедлить развитие отрасли в долгосрочной перспективе.

Список литературы

1. Peng L., Yang J., Tang C. Method for matrix data broadcast in parallel processing: пат. US11983560B2; заяв. и патен-

тообл. Advanced Micro Devices, Inc. № 17/571,374; заявл. 07.01.2022; опубл. 14.05.2024. [Электронный ресурс]. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/ed/e3/97/b5901b5baeb08f/US11983560.pdf (дата обращения: 03.05.2026).

2. Suk J. H., Lyuh C.-G. Data generation device for parallel processing: пат. US10725789B2 США; заявитель и патентообладатель Electronics and Telecommunications Research Institute (KR). № 16/154,508; заявл. 08.10.2018; опубл. 28.07.2020. [Электронный ресурс]. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/3e/cf/d0/ee87e307f1c862/US10725789.pdf (дата обращения: 03.05.2026).

3. Crawford I. L. Searching data in parallel using processor-in-memory devices: пат. US10489060B2 США / заяв. и патентообл. Micron Technology, Inc № 15/849,381; заявл. 20.12.2017; опубл. 26.11.2019. [Электронный ресурс]. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/77/eb/62/0f0da370e34a82/US10489060.pdf (дата обращения: 03.05.2026).

4. Jayasena N. S., O'Connor J. M., Mantor M. Prefetch kernels on data-parallel processors: пат. US11500778B2 США / заявитель и патентообладатель Advanced Micro Devices, Inc. № 16/813,075; заявл. 09.03.2020; опубл. 15.11.2022. [Электронный ресурс]. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/3d/10/db/7d2cde469fe9bd/US11500778.pdf (дата обращения: 03.05.2026).

5. Viel E., Ueda H. Parallel data stream processing method, parallel data stream processing system, and storage medium: пат. US10459921B2 США. № 14/943,050; заявл. 17.11.2015; опубл. 29.10.2019. [Электронный ресурс]. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/39/f1/11/cc757a0b99162a/US10459921.pdf (дата обращения: 03.05.2026).

6. Singh G., Chiu C.-H., Sundaresan N. Parallel data stream processing system: пат. US11789955B2 США / заявитель и патентообладатель eBay Inc. № 15/783,914; заявл. 13.10.2017; опубл. 17.10.2023. [Электронный ресурс]. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/34/c1/0d/a08991c17a5792/US11789955.pdf (дата обращения: 03.05.2026).

7. Bradshaw R., Chambers C. D., et al. Incremental parallel processing of data: пат. US10628212B2 США / заявитель и патентообладатель Google LLC. № 16/030,282; заявл. 09.07.2018; опубл. 21.04.2020. [Электронный ресурс]. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/c3/ce/3a/4350e03c335844/US10628212.pdf (дата обращения: 03.05.2026).

8. Окава К. Устройство кодирования изображения, способ кодирования изображения, устройство декодирования изображения, способ декодирования изображения и программа: пат. RU2758583C1. Опубл. 29.10.2021. [Электронный ресурс]. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/4f/87/ac/862120f8cab5da/RU2758583C1.pdf (дата обращения: 03.05.2026).

9. Гонг Д. К. Системы и способы параллельной и масштабируемой обработки телеметрических данных от подключаемых раздаточных машин: пат. RU2737032C2. Опубл. 24.11.2020. [Электронный ресурс]. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/d7/4b/d2/5509fbbc7a3190/RU2737032C2.pdf (дата обращения: 03.05.2026).

10. Han B., Gopalakrishnan V., Anwer M. B., et al. Controlling parallel data processing for service function chains: пат. US11502910B2 США. № 17/065,820; заявл. 08.10.2020; опубл. 15.11.2022. [Электронный ресурс]. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/f2/d4/bb/9158a2983a4ac9/US11502910.pdf (дата обращения: 03.05.2026).

11. Han B., Gopalakrishnan V., Anwer M. B., Zhang Z.-L., Zhang Y. Controlling parallel data processing for service function chains: пат. US11979290B2 США. № 17/986,423; заявл. 14.11.2022; опубл. 07.05.2024. [Электронный ресурс]. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/bc/91/69/32422db01f38a9/US11979290.pdf (дата обращения: 03.05.2026).

12. Kantecki et al. Reordering of data for parallel processing: пат. US11050682B2 США / заявитель и патентообладатель Intel Corp. № 17/361,760; заявл. 29.06.2021; опубл. 29.06.2021. [Электронный ресурс]. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/ed/5a/ba/8c3eb16271fa9b/US11050682.pdf (дата обращения: 03.05.2026).

13. Rahman et al. Parallel data transfer to increase bandwidth for accelerated processing devices: пат. US10672095B2 США / заявитель и патентообладатель Advanced Micro Devices, Inc. № 16/177,514; заявл. 31.10.2018; опубл. 02.06.2020. [Электронный ресурс]. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/0a/b4/ca/9a759a4538328d/US10672095.pdf (дата обращения: 03.05.2026).

14. Agarwal A. Transferring data in a parallel processing environment: пат. US10747712B1 США. № 12/070,120; заявл. 25.02.2008; опубл. 18.08.2020. [Электронный ресурс]. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/36/a5/af/70982d864eb5a8/US10747712.pdf (дата обращения: 03.05.2026).

15. Цао Л., Чэнь Б., Лю Г. Способ управления процессором и многопроцессорной системой: пат. RU2658884C1. Опубл. 25.06.2018. [Электронный ресурс]. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/cf/30/33/93546b674ac2c5/RU2658884C1.pdf (дата обращения: 03.05.2026).

16. Tan X. et al. Method of managing task dependencies at runtime in a parallel computing system of a hardware processing system and a hardware acceleration processor: пат. US11436048B2 США. № 15/607,520; заявл. 29.05.2017; опубл. 06.09.2022. [Электронный ресурс]. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/15/6b/76/15fb601aa6518c/US11436048.pdf (дата обращения: 13.05.2026).

17. Thompson W. C., Yung Y.-F. Parallel process scheduling for efficient data access: пат. US10289447B1 / заявитель и патентообладатель SAS Institute Inc. № 16/221,752; заявл. 17.12.2018; опубл. 14.05.2019. 30 с. [Электронный ресурс]. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/ec/9a/e9/8071a5d5b50110/US10289447B1.pdf (дата обращения: 03.05.2026).

18. Zaidi S. A. M., Gabrielli G. In-core parallelization in a data processing apparatus and method: пат. US12229565B2 / заяв. и патентообл. Arm Limited. № 18/042,845; заявл. 26.08.2021; опубл. 18.02.2025. [Электронный ресурс]. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/1c/02/ee/0e2978a8bf37e9/US12229565.pdf (дата обращения: 13.05.2026).

19. Хиллмэн Р., Виллямсон Г. Система, способ и устройство для коррекции ошибки в мультипроцессорных системах: пат. RU2577465C2. Опубл. 20.03.2016. [Электронный ресурс]. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/29/55/6c/65af0d708bb676/RU2577465C2.pdf (дата обращения: 12.05.2026).

20. Малов А. В. Способ распараллеливания программ в среде логического программирования в вычислительной системе: пат. RU2691860C1. Опубл. 18.06.2019. [Электронный ресурс]. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/22/bd/6e/0e8ce7ede133af/RU2691860C1.pdf (дата обращения: 06.05.2026).

21. Малов А. В. Способ распараллеливания программ в среде агентно-ориентированного программирования в вычислительной системе: пат. RU2704533C1. Опубл. 29.10.2019. [Электронный ресурс]. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/13/3c/e9/9fa8ded6968185/RU2704533C1.pdf (дата обращения: 06.05.2026).

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 004.023
DOI 10.17513/snt.40833

CC BY 4.0

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Сергеев Н. П. ORCID ID 0009-0003-8270-000X

Федеральное казенное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский институт ФСИН России», Воронеж, Российская Федерация, e-mail: nps.97@mail.ru

Применение классических генетических алгоритмов и в целом математического моделирования для оптимизации мероприятий по обеспечению безопасности объектов осложняется нелинейными зависимостями между защитными мерами и быстрым ростом вычислительной нагрузки при расширении перечня элементов. Цель исследования состояла в разработке модифицированного алгоритма, в котором на смену традиционной функции приспособленности приходят механика виртуального перемещения и коалиционная селекция. Ядром метода служит преобразование экспертных баллов в дискретные шаги с последующим циклическим движением особей по замкнутой шкале; популяция самопроизвольно группируется в объединения, для скрещивания внутри которых отбираются наиболее контрастные по суммарному шагу варианты. Тестовая проверка показала, что алгоритм отыскивает не абстрактный максимум, а сбалансированный, внутренне согласованный набор мер, избегая как слабых, так и нереалистично ресурсоемких комбинаций. Огрубление оценок смягчает влияние субъективности, а группировка удерживает генетическое разнообразие популяции. Получаемый перечень мероприятий оказывается проверенным на непротиворечивость и взаимное усиление, что особенно значимо в условиях жестких бюджетных рамок и неполноты исходных данных. Предложенный инструмент пригоден для поддержки выбора защитных мер при ограниченных ресурсах.

Ключевые слова: математическое моделирование, модифицированный генетический алгоритм, виртуальное перемещение особей, шкала шагов, суммарный шаг хромосомы, вычислительная сложность, мероприятия по обеспечению безопасности, функция приспособленности

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROBLEM OF ENSURING SECURITY BASED ON A MODIFIED GENETIC ALGORITHM

Sergeev N. P. ORCID ID 0009-0003-8270-000X

Federal State Educational Institution of Higher Education "Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia", Voronezh, Russian Federation, e-mail: nps.97@mail.ru

The use of classical genetic algorithms, and mathematical modeling in general, to optimize facility security measures is complicated by nonlinear dependencies between protective measures and the rapid increase in computational load as the list of elements expands. The goal of the study was to develop a modified algorithm that replaces the traditional fitness function with virtual movement mechanics and coalition selection. The core of the method is the transformation of expert scores into discrete steps, followed by cyclical movement of individuals along a closed scale; the population is spontaneously grouped into unions, within which the most contrasting variants in terms of the total step are selected for crossbreeding. Testing showed that the algorithm does not seek an abstract maximum, but a balanced, internally consistent set of measures, avoiding both weak and unrealistically resource-intensive combinations. Coarsening the estimates mitigates the influence of subjectivity, and the grouping maintains the genetic diversity of the population. The resulting set of measures is verified for consistency and mutual reinforcement, which is especially important under tight budget constraints and incomplete initial data. The proposed tool is suitable for supporting the selection of protective measures under resource constraints.

Keywords: mathematical modeling, modified genetic algorithm, virtual movement of individuals, step scale, total chromosome step, safety measures, computational complexity, fitness function

Введение

Классический генетический алгоритм в задачах обеспечения безопасности предприятий, учреждений, организаций сталкивается с двумя проблемами. Первая – нелинейные зависимости между защитными мерами. Второй является вычислительная сложность выполняемых алгоритмов. Она становится весьма трудоемкой даже для современных машин при увеличении числа слагаемых [1].

Для решения таких проблем предлагается отказаться от прямого расчета функции приспособленности как от обязательного элемента отбора. Вместо этого вводится механика виртуального перемещения решений в специально размеченном дискретном пространстве. Суть подхода в следую-

щем: особь популяции (конкретное мероприятие по обеспечению безопасности, далее – МОБ) не оценивается по абсолютной шкале «хорошо/плохо», а совершает условный шаг вдоль числовой шкалы. Длина этого перемещения зависит от экспертных оценок каждого МОБ по заданным критериям [2]. Такой подход позволяет уйти от необходимости конструировать громоздкую скалярную функцию и при этом учесть сложные взаимосвязи между генами хромосомы.

Дискретизация оценок и их перевод в категорию «шагов» резко снижает чувствительность алгоритма к разбросу мнений группы экспертов. Это важно, потому что при оценке безопасности объекта защиты редко имеются точные данные [3]. А иногда имеют место словесные заключения экспертов, нормы приказов и субъективные оценки.

Цель исследования – разработка и демонстрация модифицированного генетического алгоритма, основанного на механике виртуального перемещения решений и коалиционной селекции, который позволяет преодолеть указанные ограничения классических методов при отборе МОБ.

Материалы и методы исследования

Математически предложенная процедура выглядит следующим образом. Исходное множество МОБ – M образует исходную популяцию:

$$M = \{m_1, m_2, ..., m_i, ..., m_n\}, \quad (1)$$

где n – общее количество МОБ.

Каждое МОБ оценивается экспертами множеством критериев K:

$$K = \{k_1, ..., k_j, ..., k_q\},\ j = \overline{1, q}, \quad (2)$$

где q – число критериев.

Оценки по критериям предлагается выставлять по шкале оценок O:

$$O = \{o_1, ..., o_t, ..., o_r\},\ t = \overline{1, r}, \quad (3)$$

где r – максимальное значение шкалы оценок.

Эти баллы и будут являться генами хромосом.

Моментом, на который следует обратить особое внимание, является переход от оценок хромосом в качестве баллов к безразмерным шагам [4]. Для смягчения данного перехода предлагается использовать правило агрегирования. Для начала вводится шкала шагов SH для особей множества M:

$$SH = \{sh_1, ..., sh_a, ..., sh_p\},\ a = \overline{1, p}, \quad (4)$$

где p – максимальное значение шкалы шагов.

Для примера определим шкалу шагов, состоящую из трех значений – $SH = \{0, 1, 2\}$, а шкалу оценок из шести значений – $O = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$. В этом случае возникает необходимость равномерного распределения значений шкалы оценок по значениям шкалы шагов. Для этого необходимо разбить шкалу O на d интервалов:

$$d = \frac{r}{p} = \frac{6}{3} = 2. \quad (5)$$

При этом нужно учесть, что если r не делится на p нацело $d \neq цел.$, тогда:

$$d = \left\lceil \frac{r}{p} \right\rceil. \quad (6)$$

Исходя из этого, для приведенного примера оценки 1, 2 превращаются в нулевой шаг (мера слабая), 3, 4 – в единичный, 5, 6 – в двойной согласно следующему правилу:

$$o_j^{SH} = \begin{cases} sh_1, & j = \overline{1, d}, \\ sh_2, & j = \overline{d+1, 2d}, \\ sh_3, & j > 2d. \end{cases} \quad (7)$$

где $j = \overline{1, 6}$.

В итоге для приведенного примера получим равномерное распределение шкалы значений оценок хромосом по шкале шагов (табл. 1) [5].

Таблица 1

Распределение оценок по шкале шагов

Шкала шагов SH	0		1		2	
Шкала оценок O	1	2	3	4	5	6

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Такой подход «сглаживает» мелкие колебания экспертных суждений. Соседние баллы в пределах одного интервала перестают влиять на итоговую позицию решения, что на деле часто отражает реальную управленческую логику: разница между оценкой «3» и «4» в плане финансирования или реализации не столь критична, как разрыв между «2» и «5».

Далее, для каждой хромосомы вычисляется суммарный шаг S_i. Это простая сумма преобразованных значений всех генов:

$$S_i = \sum_{j=1}^{m} sh_{ij}. \quad (8)$$

На данном этапе включается модифицированный оператор «движения», который по сути является ключевой модификацией и реализуется в виде шкалы S – конечного дискретного множества [6]:

$$S = \{s_1, \ldots, s_a, \ldots, s_l\}, \quad (9)$$

где элемент s_a соответствует a-й позиции на шкале перемещения хромосомы, а l обозначает общую длину шкалы.

В начале работы метода все особи помещаются в нулевую позицию на шкале S. Далее, отсчитывается суммарный шаг каждой особи на шкале перемещения хромосом – тем самым реализуется их перемещение в пространстве. Особь с суммой S_i помещается в ячейку с соответствующим номером. Если номер превышает длину шкалы, отсчет начинается заново – срабатывает принцип цикличности [7]. Это создает замкнутое виртуальное поле, на котором особи в результате их перемещения группируются в коалиции G_k.

Вот тут действуют простые, но жесткие правила селекции:

1. Если в результате перемещения в ячейке оказалась одна особь ($|G_k| = 1$), то она переходит в следующее поколение без скрещивания.

2. Коалиция из двух особей ($|G_k| = 2$) реализует одноточечный кроссинговер с выбором случайной точки разрыва. Точка разрыва t выбирается случайным образом из диапазона $\{1, 2, ..., q - 1\}$, где q – длина хромосомы.

3. Три и более особи в одной коалиции ($|G_k| \geq 3$) – для скрещивания отбираются два антипода: с максимальным и минимальным значением суммарного шага внутри этой группы. Остальные особи переходят в следующее поколение без скрещивания [8].

Такой подход ломает привычную логику генетического алгоритма. Поиск «самого приспособленного» потомка среди всей популяции модифицируется в поиск крайних вариантов внутри локального скопления похожих решений и последующим сталкиванием их между собой. К удивлению, это хорошо работает для выхода из локальных оптимумов. С одной стороны, сохраняется генетическое разнообразие – одиночки и средние варианты не вымирают мгновенно [9]. С другой – направленная селекция внутри коалиции подталкивает популяцию либо к максимизации суммы шагов, либо к минимизации, в зависимости от задачи.

Результаты исследования и их обсуждение

Для иллюстрации работы метода рассмотрим конкретный пример.

Возьмем начальную популяцию M из четырех хромосом:

$$M = \{m_1, m_2, m_3, m_4\}, \quad (10)$$

каждая из которых длиной в четыре гена (оценок по критериям) множества K:

$$K = \{k_1, k_2, k_3, k_4\}, \quad (11)$$

Введем шкалу оценок генов хромосом O по каждому критерию:

$$O = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}, \quad (12)$$

Исходные оценки особей множества M по шкале O представлены в табл. 2.

Таблица 2

Оценки изначальной популяции особей M по шкале оценок O

	o^{k1}	o^{k2}	o^{k3}	o^{k4}
m_1	3	2	6	4
m_2	4	6	1	4
m_3	5	3	2	1
m_4	4	6	5	3

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Далее, согласно приведенному выше алгоритму, с целью преобразования оценок генов хромосом в шаги вводится шкала шагов [10]:

$$SH = \{0, 1, 2\}. \quad (13)$$

Для перевода значений оценок генов хромосом в шаги также определяется количество интервалов d для деления шкалы оценок O согласно шкале шагов SH:

$$d = \frac{r}{p} = \frac{9}{3} = 3. \quad (14)$$

Согласно выражению (14) видно, что $r \bmod p = 0$. Тогда для данного случая шкала O будет разбита на три равных интервала согласно правилу:

$$o_j^{SH} = \begin{cases} 0, \ j = \overline{1,3}, \\ 1, \ j = \overline{4,6}, \\ 2, \ j > 6. \end{cases} \quad (15)$$

где $j = \overline{1,6}$.

После преобразования оценок в шаги получили следующие векторы m (табл. 3).

Таблица 3

Изначальная популяция особей с преобразованными оценками на основе шкалы шагов

	o^{SH}_{ok1}	o^{SH}_{ok2}	o^{SH}_{ok3}	o^{SH}_{ok4}
m_1	1	0	2	1
m_2	1	2	0	1
m_3	2	1	0	0
m_4	1	2	2	1

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Теперь можно приступить к моделированию процесса «движения» особей [11]. Для этого вводится шкала перемещений S, в которой конечное значение соответствует сумме шагов всех хромосом:

$$|S_l| = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} m_{ij}^{s} = 1+0+2+1+1+2+ \\ +0+1+2+1+0+0+1+2+2+1=17. \quad (16)$$

Следовательно, шкала S принимает вид

$$S = \{1, 2, 3, \ldots, 17\}. \quad (17)$$

Вычислим позиции хромосом после первой итерации «движения»:

$$\begin{aligned} S_1 &= 1+0+2+1=4; \\ S_2 &= 1+2+0+1=4; \\ S_3 &= 2+1+0+0=3; \\ S_4 &= 1+2+2+1=6. \end{aligned} \quad (18)$$

В результате первой итерации особи m_1 и m_2 оказались в одной ячейке на шкале перемещений со значением суммы шагов, равным 4 и образовали коалицию $G_1 = \{m_1, m_2\}$ [12]. Остальные особи разошлись по одиночным коалициям $G_2 = \{m_3\}$, $G_3 = \{m_4\}$.

Ввиду полученного результата, реализуется одноточечное скрещивание особей m_1 и m_2 в коалиции G_1 в точке разрыва $t = 2$:

$$G_1 = \begin{pmatrix} m_1 = \{3, 2 \mid 6, 4\} \\ m_2 = \{4, 6 \mid 1, 4\} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} m_1' = \{3, 2, 1, 4\} \\ m_2' = \{4, 6, 6, 4\} \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Далее, у полученных потомков вычисляется сумма шагов, и из них выбирается тот, который переходит в следующее поколение:

$$\begin{pmatrix} S_1' = 1+0+0+1=2 \\ S_2' = 1+2+2+1=6 \end{pmatrix} \rightarrow m_{new_{G_1}} = m_2'. \quad (20)$$

Для задачи поиска оптимального набора МОБ для обеспечения защищенности объекта в следующее поколение прошел потомок с максимальным значением суммарного шага – m'_2 [13]. На основе полученных результатов сформируем популяцию 1 (табл. 4).

Таблица 4

Популяция первого поколения

	o^{k1}	o^{k2}	o^{k3}	o^{k4}
m_2'	4	6	6	4
m_3	5	3	2	1
m_4	4	6	5	3

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

После нескольких итераций подобных циклических движений и скрещиваний популяция сжалась до единственного решения:

$$m_{final} = \{4, 3, 6, 4\}, S_{final} = 5. \quad (21)$$

Примечательно, что это не максимально возможная сумма по шкале. Решение лежит в среднем диапазоне. Это косвенно подтверждает, что алгоритм, избежав как заведомо слабых, так и нереалистично дорогих «идеальных» наборов, нашел сбалансированную комбинацию МОБ, что, пожалуй, является более ценным результатом, чем погоня за абстрактным максимумом, особенно в условиях жестких бюджетных ограничений [14].

На практике внедрение подобных численных методов в деятельность объектов защиты всегда упирается в необходимость интерпретации результатов. Сотруднику по безопасности нужен не вектор чисел, а конкретный перечень: «Усилить комплекс охранного видеонаблюдения, модернизировать подсистему охранного освещения, заменить пролет ограждения на периметре объекта». Обратное декодирование генов в управленческие решения – отдельная задача, которая пока решается путем сопоставления идентификаторов МОБ [15]. В результате работы алгоритма получается не просто набор МОБ, а набор, проверенный на предмет внутренней непротиворечивости и взаимного усиления. Там, где человек видит два десятка пунктов предписания, машина видит коалицию генов, которая двигается дальше других по виртуальной шкале защищенности.

Заключение

Модифицированный генетический алгоритм отказывается от скалярной функции приспособленности. Механика виртуаль-

ного перемещения разбивает популяцию на коалиции, в результате чего скрещивание идет между крайними вариантами внутри группы. Вычислительная нагрузка снижается даже для большого перечня МОБ, а дискретизация экспертных баллов в шаги сглаживает неизбежный субъективизм оценок.

Моделирование данного процесса показало: итоговый набор МОБ не стремится к теоретическому максимуму, а лежит в среднем диапазоне. С точки зрения управления это более реалистичный результат. Сбалансированная комбинация МОБ реальнее для внедрения при урезанном бюджете. Полученный перечень проверен на внутреннюю непротиворечивость. Гены в коалициях взаимно усиливают друг друга. Инструмент пригоден для поддержки решений при нехватке точных данных.

Список литературы

1. Хвостов В. А., Рогозин Е. А., Никулина Е. Ю. Направления и перспективы использования эволюционных методов обоснования требований к безопасности информации автоматизированных систем // Вестник Воронежского института МВД России. 2015. № 4. С. 198–204. EDN: VDKUZF.

2. Тарасов А. Д. Адаптивный генетический алгоритм в задаче проектирования систем физической защиты критически важных объектов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 1 (139). С. 23–31. DOI: 10.14489/vkit.2016.01.pp.023-031. EDN: VHITIV.

3. Тарасов А. Д. Эффективность работы генетического алгоритма в задаче проектирования систем физической защиты // Информационные технологии. 2016. Т. 22. № 4. С. 243–249. EDN: VVAEDP.

4. Сергеев Н. П., Степанов Л. В., Дурденко В. А. Математическое моделирование оценки защищенности объекта уголовно-исполнительной системы на основе модифицированного генетического алгоритма // Инженерный вестник Дона. 2025. № 12 (132). EDN: YCXWVY.

5. Боровский А. С., Тарасов В. Н. Анализ результатов работы генетического алгоритма в задаче оптимального размещения средств инженерно-технической защиты на объекте // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2014. № 3. С. 51–58. EDN: STAFYX.

6. Дровникова И. Г., Змеев А. А., Рогозин Е. А. Частная методика формирования требований к системам защиты информации от несанкционированного доступа в автоматизированные системы с использованием генетического алгоритма // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018. Т. 45. № 3. С. 114–122. DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-3-114-122. EDN: USBTUF.

7. Космачева И. М., Давидюк Н. В., Сибикина И. В., Кучин И. Ю. Модель оценки эффективности конфигурации системы защиты информации на базе генетических алгоритмов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8. № 3 (30). DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.022. EDN: RHTJEA.

8. Сергеев Н. П., Степанов Л. В. Математическое моделирование и численные методы оценки режима безопасности в УИС // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2025. № 2. С. 138–145. EDN: FGOGIS.

9. Мурзакова А. А., Мурзакова Е. А., Паюсова Т. И. Проектирование оптимальной системы защиты информации с использованием генетического алгоритма // Математическое и информационное моделирование: сборник научных трудов. Вып. 16. Тюмень: Тюменский государственный университет, 2018. С. 331–340. EDN: UZXOXO.

10. Первов К. С., Хафизов Ф. Ш., Васильев Д. В., Озден И. В. Анализ и оптимизация алгоритмов управления техносферной безопасностью на основе нечетких когнитивных карт // Нефтегазовое дело. 2022. № 1. С. 28–50. DOI: 10.17122/ogbus-2022-1-28-50. EDN: DOJHCT.

11. Васильев В. И., Вульфин А. М., Кириллова А. Д. Анализ и управление рисками информационной безопасности АСУ ТП на основе когнитивного моделирования // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2022. Т. 10. № 2 (37). DOI: 10.26102/2310-6018/2022.37.2.022. EDN: FKRMPL.

12. Израилов К. Е. Генетический реверс-инжиниринг программ для поиска уязвимостей // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2025. № 1. С. 109–119. DOI: 10.61260/2218-130X-2025-1-109-119. EDN: UHFRBI.

13. Гребенюк Г. Г., Никишов С. М., Середа Л. А. Анализ уязвимости сложных сетевых инфраструктур с применением генетического алгоритма // Проблемы управления. 2021. № 6. С. 52–59. DOI: 10.25728/pu.2021.6.5. EDN: VWLMPW.

14. Степанов Л. В., Паринов А. В., Кольцов А. С., Сергеев Н. П. Особенности решения задач оптимизации на основе математических методов // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2022. № 4. С. 177–181. EDN: AKRSZO.

15. Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Генетические алгоритмы. М.: Физико-математическая литература, 2009. 320 с. ISBN 978-5-9221-1118-8. EDN: MUWRYJ.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 519.65
DOI 10.17513/snt.40834

CC BY 4.0

РАЗРАБОТКА СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОГО ОПЕРАТОРА ИНТЕРПОЛЯЦИИ ДЛЯ L-МАРКОВСКОГО ПРОЦЕССА

[1]Фадеева Л. Ю. ORCID ID 0009-0005-5344-5227, [2]Титов А. Н.

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ», Казань, Российская Федерация, e-mail: milafadeeva@yandex.ru;
[2] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Российская Федерация

Интерполяция случайных процессов является одним из ключевых математических инструментов, позволяющих решать широкий спектр прикладных задач, в которых создаются более точные, полные математические модели и восстанавливаются данные измерений. Решением задачи интерполяции занимались многие ученые, однако явные интерполяционные формулы в настоящее время известны только для процессов с рациональным спектром. Целью настоящей работы является построение на основе методов спектрального анализа случайных процессов и теории аналитических и целых функций комплексного переменного стохастической модели оптимального оператора интерполяции для L-марковского процесса с квазирациональной спектральной плотностью. С привлечением метода математической индукции и теории разностных уравнений получена формула для спектральной характеристики интерполяции L-марковского процесса, на основе которой выявлена форма его оптимального интерполятора. Показано, что оптимальный линейный оператор интерполирования представляет собой сумму двух несобственных стохастических интегралов и линейной комбинации значений исследуемого процесса и его производных в определенные моменты времени, зависящие от параметров спектральной плотности. Результат, полученный в работе, позволяет детализированно восстанавливать пропущенные данные стохастических процессов с квазирациональным спектром и может быть использован в различных радиотехнических приложениях.

Ключевые слова: случайный процесс, спектральный анализ, интерполирование, разностные уравнения, квазирациональная спектральная плотность, L-марковский процесс, спектральная характеристика

DEVELOPMENT OF A STOCHASTIC MODEL OF THE OPTIMAL INTERPOLATION OPERATOR FOR THE L-MARKOV PROCESS

[1]Fadeeva L. Yu. ORCID ID 0009-0005-5344-5227, [2]Titov A. N.

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI", Kazan, Russian Federation, e-mail: milafadeeva@yandex.ru;
[2]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan National Research Technological University", Kazan, Russian Federation

The interpolation of random processes is one of the key mathematical tools that allow us to solve a wide range of applied problems, in which more accurate and complete mathematical models are created and measurement data are restored. Many scientists have studied the problem of interpolation, but explicit interpolation formulas are currently known only for processes with a rational spectrum. The goal of this work is to use the methods of spectral analysis of random processes and the theory of analytic and entire functions of a complex variable to construct a stochastic model of the optimal interpolation operator for an L-Markov process with a quasi-rational spectral density. Using the method of mathematical induction and the theory of difference equations, a formula for the spectral characteristic of the L-Markov process interpolation is derived, on the basis of which the form of its optimal interpolator is revealed. It is shown that the optimal linear interpolation operator is a sum of two improper stochastic integrals and a linear combination of the values of the process under study and its derivatives at certain points in time, depending on the parameters of the spectral density. The result obtained in this work allows for detailed reconstruction of missing data from stochastic processes with a quasi-rational spectrum and can be used in various radio engineering applications.

Keywords: random process, spectral analysis, interpolation, quasi-rational spectral density, L-Markov process, difference equations, spectral characteristics

Введение

Интерполяция случайных процессов является одним из ключевых математических инструментов, посредством которого решается широкий спектр прикладных задач, в которых создаются более точные, полные математические модели и восстанавливаются данные измерений [1–3].

Применение интерполяции значительно ускоряет анализ и прогнозирование случайных процессов, улучшает результаты экспериментов в областях, где определяющим фактором является точность и достоверность данных. Использование интерполяции в технических расчетах позволяет исключить проведение повторных экспериментов, которые иногда провести просто невозможно.

Изначально интерполяция стала использоваться для видео- и фотосъемок с размытыми областями с целью достижения более четкого и детализированного изображения [4, 5].

В радиофизике интерполяция чаще всего используется для восстановления поля излучения антенн, повышения разрешающей способности радиолокационных станций, что позволяет различать объекты, расположенные ближе, чем исходное разрешение системы [6].

В навигации интерполяция данных о начальном, промежуточном и конечном положении движущегося объекта дает более точную оценку перемещения объекта в промежуточное положение на основе GPS-данных [7, 8].

Интерполяция также широко применяется при разработке, диагностике и контроле современных материалов, помогает анализировать их свойства и обнаруживать в них дефекты [9].

Задачу интерполирования случайных последовательностей и процессов, то есть задачу оценки неизвестных значений случайного процесса в некоторые моменты времени, находящиеся внутри диапазона наблюдений, на основе известных значений этого процесса в другие моменты, поставил в середине прошлого века академик А. Н. Колмогоров.

Одновременно с ним задачами интерполяции и экстраполяции занимались американские математики Дж. Дууб, создатель аксиоматики теории случайных процессов, и основоположник искусственного интеллекта Н. Винер, первый из которых указал класс случайных процессов с рациональным спектром, для которого возможно построение явных интерполяционных формул, а второй построил эти формулы, «не дав, однако, им строгого математического доказательства» [10]. Впоследствии последователю идей А. Н. Колмогорова математику А. Яглому удалось получить строгое математическое доказательство формул Н. Винера, более того, им были получены явные формулы экстраполяции для одного частного класса случайных процессов с квазирациональной спектральной плотностью, обобщающей рациональную. Однако явные интерполяционные формулы в настоящее время известны только для процессов с рациональным спектром. Получение интерполяционных формул для процессов с квазирациональным спектром, расширяющим класс процессов с рациональным спектром, позволяет эффективнее моделировать сложные реальные процессы, которые не описываются простыми дробно-рациональными функциями, что значительно увеличивает сферу применения интерполирования в качестве математического инструмента для прикладных задач.

Цель исследования – построение на основе методов спектрального анализа случайных процессов стохастической модели оптимального оператора интерполяции для L-марковского процесса с квазирациональной спектральной плотностью.

Материалы и методы исследования

В работе найдено явное решение задачи интерполяции для случайного процесса со спектральной плотностью:

$$S(\omega)=\frac{|Q(\omega)|^2}{\left|Q_0(\omega)+Q_1(\omega)e^{-i\omega g}\right|^2}=\frac{|Q(\omega)|^2}{|G(\omega)|^2}=\frac{\left|\prod_{j=1}^{m_0}(\omega-a_j)\right|^2}{|G(\omega)|^2}, \quad (1)$$

где $Q(\omega)$, $Q_0(\omega)$, $Q_1(\omega)$ – многочлены степеней m_0, q_0 и q_1 соответственно, $g > 0$ – действительное число, $a_j, j = 1,2\ldots m_0$ – корни многочлена $Q(\omega)$, лежащие в верхней полуплоскости.

Следует отметить, что спектральные характеристики интерполирования для процессов со спектральными плотностями

$$\tilde{S}(\omega)=\frac{|Q(\omega)|^2}{\left|\sum_{k=0}^{n}Q_k(\omega)e^{-i\omega g_k}\right|^2}=\frac{|Q(\omega)|^2}{|\tilde{G}(\omega)|^2}=\frac{\left|\prod_{j=1}^{m_0}(\omega-a_j)\right|^2}{|\tilde{G}(\omega)|^2} \quad (2)$$

при произвольном n могут быть построены методами, аналогичными рассмотренным ниже, причем доказательства и полученные формулы будут сходны с теми, что применяются при построении спектральной характеристики интерполирования для процесса со спектральной плотностью (1).

В работах авторов [11, 12] доказано, что поскольку знаменатели $|G(\omega)|^2$ и $\left|\tilde{G}(\omega)\right|^2$ спектральных плотностей (1) и (2) являются целыми функциями экспоненциального типа, то процессы со спектральными плотностями (1) и (2) при $Q(\omega) = 1$ являются L-марковскими процессами.

Задача линейной интерполяции заключается в поиске наилучшего (в смысле метода наименьших квадратов) линейного приближения $\tilde{\xi}(t;\tau)$ к случайной величине $\xi(t + \tau)$, $0 < \tau < T$ с помощью значений процесса $\xi(s)$ на двух полупрямых $s \le t$; $s \ge t + T$.

Из работы А. Яглома известно, что линейные задачи экстраполирования, фильтрации и интерполирования можно представить на языке аналитических функций комплексного переменного [10].

$$\text{Пусть } \xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{it\omega} dZ(\omega), \quad M\left|dZ(\omega)\right|^2 = dF(\omega) = f(\omega)d\omega \tag{3}$$

спектральное представление стационарного процесса $\xi(t)$, где $Z(\omega)$ – случайная функция с некоррелированными приращениями, $f(\omega)$ – спектральная плотность процесса. В работах авторов А. Яглома и Ю. Розанова было доказано, что линейный интерполятор может быть представлен в виде [10, 11]:

$$\tilde{\xi}(t;\tau) = L\{\xi(u),\ u \le t;\ u \ge t + T\} = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} \Phi_{\tau,T}(\omega) Z(\omega). \tag{4}$$

где $\Phi_{\tau,T}(\omega)$ – спектральная характеристика интерполирования.

А. М. Ягломом было доказано, что если функции $\Phi_{\tau,T}(\omega)$ и $\Psi_{\tau,T}(\omega) = \left[e^{i\omega\tau} - \Phi_{\tau,T}(\omega)\right] f(\omega)$ можно продолжить в область комплексных значений ω так, что 1а) функция $\Phi_{\tau,T}(\omega)$ представляется в виде $\Phi_{\tau,T}(\omega) = \Phi^{(1)}_{\tau,T}(\omega) + e^{i\omega\tau}\Phi^{(2)}_{\tau,T}(\omega)$, 1б) функция $\Phi^{(1)}{}_{\tau,T}(\omega)$ – аналитическая в нижней полуплоскости; 1в) функция $\Phi^{(2)}{}_{\tau,T}(\omega)$ – аналитическая в верхней полуплоскости; 1г) функции $\Phi^{(1)}{}_{\tau,T}(\omega)$ и $\Phi^{(2)}{}_{\tau,T}(\omega)$ – возрастают при $|\omega|\to\infty$ в нижней и, соответственно, верхней полуплоскости не быстрее, чем некоторая степень $|\omega|$; 2а) функция $\Psi_{\tau,T}(\omega)$ является целой функцией; 2б) функции $\Psi_{\tau,T}(\omega)$ и $e^{-i\omega T}\Psi_{\tau,T}(\omega)$ убывают при $|\omega|\to\infty$ в верхней и соответственно, нижней полуплоскости не медленнее, чем $|\omega|^{-1-\varepsilon}$, $\varepsilon > 0$; 3) $\int_{-\infty}^{\infty}\left|\Phi^{(1)}_{\tau,T}(\omega)\right|^2 f(\omega)d\omega < \infty$; $\int_{-\infty}^{\infty}\left|\Phi^{(2)}_{\tau,T}(\omega)\right|^2 f(\omega)d\omega < \infty$, то функция комплексного переменного $\Phi_{\tau,T}(\omega)$ является спектральной характеристикой интерполяции [10].

Таким образом, если существует функция $\Phi_{\tau,T}(\omega)$, удовлетворяющая условиям 1–3, то наилучшее линейное приближение $\tilde{\xi}(t;\tau)$ к $\xi(t + \tau)$ по известным значениям процесса на полупрямых $s \le t$ и $s \ge t + T$ выражается через спектральную характеристику интерполяции в соответствии с формулой (4), а среднеквадратическая ошибка интерполирования задается формулой:

$$\sigma^2_{\tau,T} = E\left|\xi(t+\tau) - \tilde{\xi}(t;\tau)\right|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} f(\omega)d\omega - \int_{-\infty}^{\infty}\left|\Phi_{\tau,T}(\omega)\right|^2 f(\omega)d\omega.$$

В работе А. Яглома показывается, как эти достаточные условия позволяют найти спектральную характеристику интерполирования в случае, когда спектральная плотность рациональна [10]; в настоящей работе будет показано, как можно удовлетворить всем требованиям 1–3 в случае, когда спектральная плотность процесса $\xi(t)$ $f(\omega) = S(\omega)$ квазирациональная и задается формулой (1).

Формулы и доказательства, получаемые при решении задачи интерполяции для процесса с плотностью (2), в случае произвольного n довольно сложны, поэтому для простоты ограничимся рассмотрением случая при $n = 1$.

Результаты исследования и их обсуждение

Сравнение решенных авторами задач экстраполяции и фильтрации для L-марковских процессов с квазирациональными спектральными плотностями [12–14] с поставленной задачей интерполяции дало основание определить спектральную характеристику интерполяции в виде

$$\Phi_{\tau,T}(\omega) = \frac{e^{i\omega\tau}\Lambda(\omega)}{M(\omega)} + \frac{\left|G(\omega)\right|^2\left[W(\omega) + e^{i\omega T}Z(\omega)\right]}{\left|Q(\omega)\right|^2 M(\omega)M_0(\omega)}, \tag{5}$$

где $M(\omega)$, $M_0(\omega)$ – неизвестные пока полиномы, а $W(\omega)$, $\Lambda(\omega)$ и $Z(\omega)$ – целые функции, которые будут подбираться так, чтобы для функции $\Phi_{\tau,T}(\omega)$ и

$$\Psi_{\tau,T}(\omega) = S(\omega)\left\{\frac{e^{i\omega\tau}\left[M(\omega)-\Lambda(\omega)\right]}{M(\omega)} - \frac{\left|G(\omega)\right|^2\left[W(\omega)+e^{i\omega T}Z(\omega)\right]}{\left|Q(\omega)\right|^2 M(\omega)M_0(\omega)}\right\} \quad (6)$$

соблюдались требования 1–3.

Метод, по которому будет определяться спектральная характеристика интерполирования для процесса (1), представляет собой в сущности развитие методов построения спектральных характеристик экстраполирования и фильтрации для процессов со спектральными плотностями вида (2), рассмотренных авторами в работах [12–14].

Согласно требованию 2а) функция $\Psi_{\tau,T}(\omega)$ должна быть целой, поэтому из (6) видно, что полюса функции $S(\omega)$ должны сокращаться с нулями функции $M(\omega) - \Lambda(\omega)$, причем кратность каждого полюса должна совпадать с кратностью соответствующего нуля. Понятно, что последнего можно добиться, потребовав выполнения равенства:

$$M(\omega) - \Lambda(\omega) = \left|G(\omega)\right|^2 \sum\nolimits_k L_k(\omega) e^{i\omega\alpha_k}.$$

С учетом требования 2б) заключаем, что при всех целых k числа α_k должны подчиняться неравенствам

$$0 \le \tau + \alpha_k \le T. \quad (7)$$

Для выполнения условий 1а) и 1г) достаточно задать следующие требования на целые функции $W(\omega)$, $Z(\omega)$ и $\Lambda(\omega)$, участвующие в представлении (7) искомой спектральной характеристики: А) функция $\Lambda(\omega) = M(\omega) - \left|G(\omega)\right|^2 \sum_k L_k(\omega) e^{i\omega\alpha_k}$ содержит только слагаемые с множителями $\exp(i\omega\alpha)$ при $\alpha \le -\tau$ или $\alpha \ge T - \tau$; Б) для целых функций $W(\omega)$ и $Z(\omega)$ имеют место представления: $W(\omega) = \sum_{j=0}^{l} W_j(\omega) e^{i\omega jg}$; $Z(\omega) = \sum_{j=0}^{l} Z_j(\omega) e^{-i\omega jg}$, где $l = [T/g]$, а полиномы $W_j(\omega)$ и $Z_j(\omega)$, $j = 0, 1, 2\ldots l$ удовлетворяют системам линейных разностных уравнений

$$W_{j-1}L + W_jV + W_{j+1}U = 0;\ W_{l+1} \equiv 0; \quad (8)$$

$$Z_{j-1}U + Z_jV + Z_{j+1}L = 0;\ Z_{l+1} \equiv 0;\ 1 \le j \le l. \quad (9)$$

Здесь $\overline{Q}_0 Q_1 = U$, $Q_0\overline{Q}_1 = L$, $\left|Q_0\right|^2 + \left|Q_1\right|^2 = V$.

Решения систем (8) и (9) в классе полиномов имеют вид

$$W_j = L^j R_j^{(l)} C_1; \quad (10)$$

$$Z_j = U^j R_j^{(l)} C_2; \quad \le j \le l, \quad (11)$$

$$\text{где } R_j^{(l)} = \frac{(-1)^{j-l-1}}{b}\left(\left|Q_0\right|^{2(l+1-j)} - \left|Q_1\right|^{2(l+1-j)}\right),\ 0 \le j \le l, \quad (12)$$

а $C_1 = C_1(\omega)$ и $C_2 = C_2(\omega)$ – произвольные полиномы.

Нетрудно убедиться, что для одновременного выполнения требования А) и неравенств (7) достаточно принять $\alpha_k = kg$, $k = -m, -m+1\ldots-1, 0, 1,\ldots s-1, s$; где при $m_1 = [\tau/g]$, $s_1 = [(T-\tau)/g]$, $m = m_1$, если $m_1 g > \tau$; $m = m_1 - 1$, если $m_1 g \le \tau$; $s = s_1$, если $s_1 \cdot g > T - \tau$; $s = s_1 - 1$, если $s_1 \cdot g \le T - \tau$ и вместе с этим требовать выполнения следующих условий:

$$UL_{k+1} + VL_k + LL_{k-1} = 0,\ UL_1 + VL_0 + LL_{-1} = M,$$

$$L_{-m-1} = 0,\ L_{s+1} = 0,\ k = -m, -m+1,\ldots,-1, 0,1,\ldots s. \quad (13)$$

Отметим одну особенность системы (13) в сравнении с такими системами разностных уравнений, как, например, рассмотренными выше (8) и (9). В равенстве $UL_1 + VL_0 + LL_{-1} = M$ содержится неизвестный полином $M(\omega)$, фигурирующий в знаменателе спектральной характеристики интерполирования. Поэтому к решению системы (13) нужно подходить, принимая во внимание то обстоятельство, что наряду с полиномами $L_k(\omega)$, $k = -m, -m+1,\ldots,-1,0, 1,\ldots s$ из этой системы должен определиться и полином $M(\omega)$.

Полагая в (13) $k = -m$, $-m+1 \ldots -1$ и $k = 1, 2 \ldots s$ и решая две полученные системы m и s разностных уравнений относительно полиномов $L_j(\omega)$, $-m \le j \le 0$ и соответственно $L_k(\omega)$, $0 \le k \le s$ как самостоятельные, приходим к следующим выражениям этих полиномов:

$$L_j = L^j R_j^{(s)} A\,,\ 0 \le j \le s, \tag{14}$$

$$L_{-k} = U^k R_k^{(m)} B\,,\ 0 \le k \le m, \tag{15}$$

где A и B – произвольные полиномы, а функции $R_j^{(s)}$ и $R_j^{(m)}$ задаются формулами, получаемыми из (12) заменой l на s и, соответственно, на m.

Формулы (14), (15) показывают, что для полинома L_0 имеют место два представления:

$$L_0 = R_0^{(s)} A \quad \text{и} \quad L_0 = R_0^{(m)} B\,,$$

сравнение которых приводит к единой формуле для этого полинома $L_0 = R_0^{(s)} \tilde{R}_0^{(m)} N$.

$$\text{Здесь } \tilde{R}_j^{(s)} = R_j^{(s)} b\,, \quad \tilde{R}_j^{(m)} = R_j^{(m)} b\,, \tag{16}$$

а $N = N(\omega)$ – некоторый полином, связанный с полиномами A и B соотношениями:

$$A(\omega) = \tilde{R}_0^{(m)} N(\omega)\,, \quad B(\omega) = \tilde{R}_0^{(s)} N(\omega)\,.$$

Используя эти соотношения, а также выражения (14)–(16), из формулы $UL_1 + VL_0 + LL_{-1} = M$ в результате несложных вычислений получаем следующий вид полинома $M(\omega)$:

$$M(\omega) = (-1)^{m+s} \left(\left|Q_1\right|^{2(m+s+2)} - \left|Q_0\right|^{2(m+s+2)} \right) N(\omega)\,. \tag{17}$$

Ниже будет показано, что если положить в формуле (17) $N(\omega) \equiv 1$, то это не повлияет на соблюдение всех требований 1–3. В таком случае функция $M(\omega)$ будет представлять собой полином $2(m+s+2)q_0$-й степени.

Следствием приведенных выше рассуждений является окончательный вид функций $\Phi_{\tau,T}(\omega)$ и $\Psi_{\tau,T}(\omega)$:

$$\Phi_{\tau,T}(\omega) = \frac{\chi_1(\omega) + e^{i\omega T}\chi_2(\omega)}{M(\omega) M_0(\omega) \left|Q(\omega)\right|^2} + \frac{\chi_3(\omega) + e^{i\omega T}\chi_4(\omega)}{M(\omega)}\,; \tag{18}$$

$$\Psi_{\tau,T}(\omega) = \frac{e^{i\omega T}\Theta(\omega)\left|Q(\omega)\right|^2}{M(\omega)} - \frac{\Gamma(\omega)}{M(\omega) M_0(\omega)}\,, \tag{19}$$

где $\chi_1(\omega) = W_0 U e^{-i\omega g} + W_0 V + W_1 U + Z_l U e^{i\omega[T-(l+1)g]}$; $\chi_2(\omega) = W_l L e^{i\omega[(l+1)g-T]} + Z_0 L e^{i\omega g} + Z_0 V + Z_1 L$;

$$\chi_3(\omega) = L_{-m} U e^{i\omega[\tau-(m+1)g]}\,;\ \chi_4(\omega) = L_s L e^{i\omega[(s+1)g-T+\tau]}\,;\ \Theta(\omega) = \sum\nolimits_{k=-m}^{s} L_k(\omega) e^{i\omega k g}\,;$$

$$\Gamma(\omega) = \sum\nolimits_{k=0}^{l} W_k(\omega) e^{i\omega k g} + e^{i\omega T} \sum\nolimits_{k=0}^{l} Z_k(\omega) e^{-i\omega k g}\,,$$

а полиномы $W_k(\omega)$ и $Z_k(\omega)$, $0 \le k \le l$, $-m \le j \le s$ задаются формулами (10)–(12), (14), (15).

Рассмотрим теперь вопрос о том, к каким условиям приводят требования 2а), 1б) и 1в), то есть выведем условия того, что функция $\Psi_{\tau,T}(\omega)$ является целой, а функции $\Phi^{(1)}_{\tau,T}(\omega)$ и $\Phi^{(2)}_{\tau,T}(\omega)$ – аналитическими в нижней и соответственно верхней полуплоскостях.

Примем во внимание следующее: формулы (18) и (19) показывают, что если выписать все условия, обеспечивающие выполнение требований 2а), 1б) и 1в), то получится система линейных алгебраических уравнений $4(m+s+2)q_0 + 2æ + 2m_0$-го порядка (æ – степень полинома $M_0(\omega)$) относительно неизвестных коэффициентов полиномов $C_1(\omega)$ и $C_2(\omega)$. Для того, чтобы коэффициенты полиномов $C_1(\omega)$ и $C_2(\omega)$ определялись из полученной системы однозначно, степени этих полиномов следует положить равными $2(m+s+2)q_0 + æ + m_0 - 1$, что, во-первых, превысит границу, устанавливаемую 3-м условием, и, во-вторых, воспрепятствует соблюдению требований, наложенных на порядок убывания функций $\Psi_{\tau,T}(\omega)$ и $e^{-i\omega T}\Psi_{\tau,T}(\omega)$ при $|\omega| \to \infty$ в соответствующих полуплоскостях

(требование 2б). Из этих рассуждений следует, что полином $M_0(\omega)$ следует подбирать таким образом, чтобы æ определяемых этим полиномом условий аналитичности функций $\Phi^{(1)}_{\tau,T}(\omega)$ и $\Phi^{(2)}_{\tau,T}(\omega)$ в соответствующих полуплоскостях обеспечивали бы одновременно и выполнение требования 2а) в æ корнях этого полинома, либо, наоборот, из условий, обеспечивающих соблюдение требования 2а) в æ корнях $M_0(\omega)$, следовало бы и выполнение требований 1б) и 1в). Последнего можно добиться, принимая в качестве $M_0(\omega)$ произведение функций:

$$M_0(\omega) = R_0^{(l)} \cdot \left[LUR_1^{(l)} + VR_0^{(l)} \right], \tag{20}$$

где полиномы $R_j^{(l)} = R_j^{(l)}(\omega)$, j = 1, 2 определяются формулой (12). Интересно отметить, что к тому же виду для $M_0(\omega)$ можно прийти, используя решение задачи экстраполяции по конечному прошлому [12].

Покажем, что такой выбор полинома $M_0(\omega)$ действительно настолько удачен, что обращение в нуль функций $\chi_1(\omega)$ и $\chi_2(\omega)$, фигурирующих в (18), в корнях этого полинома из нижней и, соответственно, верхней полуплоскости, повлечет за собой обращение в нуль $\Gamma(\omega)$ в тех же корнях.

Пусть α_j^+, α_j^-, β_k^+, β_k^-, ρ_r^+, ρ_r^- – корни полиномов $R_0^{(l)}(\omega)$ $\tilde{R}^{(l)}(\omega) \overset{def}{\equiv} LUR_1^{(l)} + VR_0^{(l)}$ и, соответственно, $M(\omega)$, расположенные в верхней и нижней полуплоскостях. Тогда из формулы (18) с учетом формул (10)–(12), (17) нетрудно видеть, что условиями аналитичности функций $\Phi^{(1)}_{\tau,T}(\omega)$ и $\Phi^{(2)}_{\tau,T}(\omega)$ в нижней и, соответственно, верхней полуплоскостях являются следующие равенства:

$$\left[W_0 + Z_l e^{i\omega(T-lg)} \right]_{\omega=\beta_k^-} = 0. \tag{21}$$

$$\left[W_1 + Z_l e^{i\omega[T-(l+1)g]} \right]_{\omega=\alpha_j^-} = 0. \tag{22}$$

$$\chi_1(\rho_r^-) + \chi_3(\rho_r^-) M_0(\rho_r^-) \left| Q(\rho_r^-) \right|^2 = 0. \tag{23}$$

$$\chi_1(\overline{a}_j) = 0,\ j = 1, 2\ldots m_0. \tag{24}$$

$$\left[W_l e^{i\omega(lg-T)} + Z_0 \right]_{\omega=\beta_k^+} = 0. \tag{25}$$

$$\left[W_l e^{i\omega[(l+1)g-T]} + Z_1 \right]_{\omega=\alpha_k^+} = 0. \tag{26}$$

$$\chi_2(\rho_r^+) + \chi_4(\rho_r^+) M_0(\rho_r^+) \left| Q(\rho_r^+) \right|^2 = 0. \tag{27}$$

$$\chi_4(a_j) = 0,\ j = 1, 2\ldots m_0. \tag{28}$$

Формула (19) показывает, что равенства

$$\Gamma(\beta_k) = 0,\ k = 1, 2\ldots(2l+2)q_0;\ \Gamma(\alpha_j) = 0,\ j = 1, 2,\ldots,2\cdot l\, q_0;$$
$$\left[e^{i\omega\tau} \left| Q(\omega) \right|^2 \Theta(\omega) M_0(\omega) - \Gamma(\omega) \right]_{\omega=\rho_r} = 0;\ r = 1, 2,\ldots,2q_0\,(m+s+2) \tag{29}$$

достаточны для того, чтобы функция $\Psi_{\tau,T}(\omega)$ была целой.

Докажем, наконец, основное положение настоящей работы, заключающееся в том, что из условий (21), (22), (25), (26) следуют соответственно равенства:

$$\Gamma(\beta_k^-) = 0,\ \Gamma(\alpha_k^-) = 0,\ \Gamma(\beta_k^+) = 0,\ \Gamma(\alpha_k^+) = 0.$$

Доказательства этих равенств очень похожи. Покажем, как методом математической индукции получается одно из них. Установим, например, справедливость равенств $\Gamma(\beta_k^-) = 0$ при условии, что имеют место равенства (21). С этой целью докажем сначала следующее утверждение: равенства

$$\left[W_j + Z_{l-j} e^{i\omega(T-lg)} \right]_{\omega=\beta_k^-} = 0 \tag{30}$$

следуют из условий (21) при любом $0 \le j \le l$.

При $j = 0$ утверждение справедливо в силу (21).

Далее, поскольку $W_0V + W_1U = \tilde{R}^{(l)}C_1$, то $\left(W_0V + W_1U\right)_{\omega=\beta_k^-} = 0$.

Складывая это равенство с последним уравнением системы (9), умноженным на $e^{i\omega(T-lg)}$, и полагая в полученном выражении $\omega = \beta_k^-$, с учетом (21) получим (30) для $j = 1$.

Выдвинем индуктивное предположение: равенства (30) справедливы при всех $j = 0,1,2\ldots s-1$. Докажем, что тогда (30) имеет место и при $j = s$. Для этого умножаем $l - s + 1$–е уравнение системы (9) на $e^{i\omega(T-lg)}$ и складываем с $s-1$-м уравнением системы (8). Полагая в полученном выражении $\omega = \beta_k^-$ и принимая во внимание введенное предположении индукции, установим справедливость равенств (30) и при $j = s$. Итак, было найдено, что из условий (21) следует равенство (30) при всех $0 \le j \le l$. Для завершения доказательства равенств $\Gamma\left(\beta_k^-\right) = 0$ теперь достаточно сгруппировать попарно слагаемые функции $\Gamma(\omega)$ следующим образом: $\Gamma(\omega) = \sum_{j=0}^{l}\left[W_j + Z_{l-j}e^{i\omega(T-lg)}\right]\cdot e^{i\omega jg}$ и воспользоваться равенствами (30).

Подводя итог исследованиям, приходим к выводу: общее число условий, обеспечивающих выполнение требований 2а), 1б) и 1в), равно $2m_0 + 2q_0\left(2l+1\right) + 4q_0\left(m+s+2\right)$ и, следовательно, степени полиномов $C_1(\omega)$ и $C_2(\omega)$ нужно положить равными $m_0 + 2q_0\left(m+s+2\right) + q_0\left(2l+1\right) - 1$. Нетрудно проверить, что такой выбор степеней полиномов $C_1(\omega)$ и $C_2(\omega)$ обеспечит соблюдение всех оставшихся требований 1–3 (именно 2б и 3).

Формулы (10)–(12), (14)–(20) дают возможность понять форму оператора интерполирования. Если

$$r_1 = \max\left\{0;\ q_1 - m_0 - 1\right\},\ r_2 = \max\left\{0;\ 2q_1 - q_0 - m_0 - 1\right\},\ r_3 = \max\left\{0;\ l\left(q_1 - q_0\right) + q_1 - 1\right\},$$

тогда в силу условия $q_0 \ge q_k$, $k = 1, 2\ldots n$ из формул (10), (14)–(20) следует, что наилучший линейный интерполятор будет представляться в виде суммы двух интегралов, распространенных по полупрямым $s \ge t + T$, $s \le t$, сложенной с линейной комбинацией значений процесса $\xi(s)$ и всех его производных до r_1-го порядка включительно в моменты $t - g$, $t + T - g$, до r_2-го порядка в моменты t, $t + T$ и до r_3-го порядка включительно в моменты $t + T - \left(l+1\right)g$, $t + \left(l+1\right)g$. В случае $q_0 = q_1$ в интерполяционную формулу войдет также линейная комбинация значений процесса времени в моменты $t + \tau - \left(m+1\right)g$, $t + \left(s+1\right)g + \tau$. Подобный вывод аналогичного заключения также приводится в работах авторов [14, 15].

На основе вышевыведенных формул авторами разработан алгоритм расчета числовых значений оптимального интерполятора в зависимости от значений его ключевых параметров T и τ. Алгоритм реализован на языке программирования Python в среде Jupyter Notebook с привлечением библиотек NumPy, SciPy, Matplotlib.

Численный эксперимент проводился на L-марковском процессе с квазирациональной спектральной плотностью вида

$$S(\omega) = 1\Big/\left|Q_0(\omega) + Q_1(\omega)e^{-i\omega g}\right|^2 = 1\Big/\left|\omega + i\sqrt{3}/2 + \left(\omega + i\sqrt{5}/2\right)e^{-i\omega g}\right|^2. \qquad (31)$$

На основе формулы (18) для спектральной характеристики интерполирования $\Phi_{\tau,T}(\omega)$ была выписана формула для $\Phi_{\tau,T}(\omega)$ для L-марковского процесса со спектральной плотностью:

$$\Phi_{\tau,O}(\omega) = \frac{U^2e^{i\omega(\tau-2g)}}{V^2 - LU} + \frac{C_1(\omega)}{V} + \frac{UC_1(\omega)e^{-i\omega g}}{V^2 - LU} - \frac{U^2C_2(\omega)e^{i\omega(T-2g)}}{V\left(V^2 - LU\right)} +$$

$$+e^{i\omega T}\left[-\frac{LVe^{i\omega(g+\tau-T)}}{V^2 - LU} + \frac{C_2(\omega)}{V} - \frac{L^2C_1(\omega)e^{i\omega(2g-T)}}{V\left(V^2 - LU\right)} + \frac{LC_2(\omega)e^{i\omega g}}{V^2 - LU}\right] =$$

$$= \sum_{k=1}^{4}FF_ke^{i\omega\varphi_k} + e^{i\omega T}\sum_{k=5}^{8}FF_ke^{i\omega\varphi_k} = \Phi_{\tau,T}^{(1)}(\omega) + e^{i\omega T}\cdot\Phi_{\tau,T}^{(2)}(\omega), \qquad (32)$$

где $U = \overline{Q}_0(\omega)\cdot Q_1(\omega) = \omega^2 + \left[i\omega\left(\sqrt{5} - \sqrt{3}\right)/2\right] + \sqrt{15}/4$,

$$L = Q_0(\omega)\cdot\overline{Q}_1(\omega) = \omega^2 - \left[i\omega\left(\sqrt{5} - \sqrt{3}\right)/2\right] + \sqrt{15}/4,$$

$$V = |Q_0|^2 + |Q_1|^2 = 2\omega^2 + 2\,,\ V^2 - LU = 3\left(\omega^4 + 2\omega^2 + 49/48\right),$$

$\varphi_1 = \tau - 2g$, $\varphi_2 = 0$, $\varphi_3 = -g$, $\varphi_4 = T - 2g$, $\varphi_5 = g + \tau - T$, $\varphi_6 = 0$, $\varphi_7 = 2g - T$, $\varphi_8 = g$.

Формула (32) выведена при 1) $T = 1$; $g = 1$; $0 < \tau < 1$; 2) $T = 2$; $g = 1$; $0 < \tau < 2$.

Аналитичность $\Phi^{(1)}_{\tau,T}(\omega)$ в H^- и $\Phi^{(2)}_{\tau,T}(\omega)$ в H^+, а также целостность функции $\Psi_{\tau,T}(\omega)$ обеспечивается выполнением следующей системы шести линейных уравнений

$$\begin{cases} -L_1 e^{ig\omega_1}\cdot\sum_{k=0}^{2} b_k\omega_1^k + V_1 e^{iT\omega_1}\cdot\sum_{k=0}^{2} d_k\omega_1^k = V_1^2 e^{i\tau\omega_1} \\ -L_4 e^{ig\omega_4}\cdot\sum_{k=0}^{2} b_k\omega_4^k + V_4 e^{iT\omega_4}\cdot\sum_{k=0}^{2} d_k\omega_4^k = V_4^2 e^{i\tau\omega_4} \\ L_5 e^{i(2g-T)\omega_5}\cdot\sum_{k=0}^{2} b_k\omega_5^k + U_5\cdot\sum_{k=0}^{2} d_k\omega_5^k = 0 \\ V_2 e^{ig\omega_2}\cdot\sum_{k=0}^{2} b_k\omega_2^k - U_2 e^{iT\omega_2}\cdot\sum_{k=0}^{2} d_k\omega_2^k = -U_2\cdot V_2 e^{i\tau\omega_2} \\ V_3 e^{ig\omega_3}\cdot\sum_{k=0}^{2} b_k\omega_3^k - U_3 e^{iT\omega_3}\cdot\sum_{k=0}^{2} d_k\omega_3^k = -U_3 V_3 e^{i\tau\omega_3} \\ L_6\cdot\sum_{k=0}^{2} b_k\omega_6^k + U_6 e^{i(T-2g)\omega_6}\cdot\sum_{k=0}^{2} d_k\omega_6^k = 0 \end{cases}, \quad (33)$$

где $L_k = L(\omega = \omega_k)$, $U_k = U(\omega = \omega_k)$, $V_k = V(\omega = \omega_k)$, $k = 1, 2, \ldots 6$;

$\omega_1 = \sqrt{-1 + i\sqrt{3}/12}\ \in H^+$, $\omega_2 = -\sqrt{-1 + i\sqrt{3}/12}\ \in H^-$, $\omega_3 = \sqrt{-1 - i\sqrt{3}/12}\ \in H^-$, $\omega_4 = -\sqrt{-1 - i\sqrt{3}/12}\ \in H^+$ – корни многочлена $V^2 - LU$, $\omega_5 = i\ \in H^+$, $\omega_6 = -i\ \in H^-$ – корни полинома V, а b_k и d_k, $k = 0, 1, 2$ – неизвестные коэффициенты многочленов 2-й степени $C_1(\omega) = b_2\omega^2 + b_1\omega + b_0$ и $C_2(\omega) = d_2\omega^2 + d_1\omega + d_0$.

Оптимальный интерполятор получим, подставив в его спектральное представление (4) найденную спектральную характеристику:

$$\tilde{\xi}(t;T;\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t}\Phi_{\tau,T}(\omega)\,dZ(\omega) = \sum_{k=1}^{4}\int_{-\infty}^{\infty} FF_k e^{i\omega(t+\varphi_k)}\,dZ(\omega) + \sum_{k=5}^{8}\int_{-\infty}^{\infty} FF_k e^{i\omega(T+t+\varphi_k)}\,dZ(\omega). \quad (34)$$

Во всех восьми интегралах подынтегральные дробно-рациональные функции, представляющие собой неправильные рациональные дроби, превратим в правильные и разложим последние на простейшие дроби, подобно тому, как это делалось в работах авторов [13–15]. Применяя затем метод неопределенных коэффициентов, авторы обратили каждую из простейших дробей в каждом из восьми интегралов в несобственный интеграл вида $1/(\omega - \omega_k) = \int_0^{\infty} ie^{i\omega_k s}e^{-i\omega s}ds$. Результатом этих вычислений явилось представление каждого из восьми интегралов в формуле (34) через значения процесса в некоторые моменты времени:

$$\tilde{\xi}(t;T;\tau) = \sum_{j=1}^{8} a_j\xi(z_j) + \sum_{j=1}^{4}\sum_{r=1}^{4} i\cdot\alpha_{jr}\int_0^{\infty} e^{-i\omega_r s}\xi(z_j - s)\,ds +$$

$$+\sum_{j=5}^{6}\sum_{r=1}^{6} i\cdot\varepsilon_{jr}\int_0^{\infty} e^{-i\omega_r s}\xi(z_j - s)\,ds + \sum_{j=7}^{8}\sum_{r=5}^{6} i\cdot\Theta_{jr}\int_0^{\infty} e^{-i\omega_r s}\xi(z_j - s)\,ds, \quad (35)$$

где $a_1 = 1/3$; $a_2 = b_2/3$; $a_3 = -2/3$; $a_4 = d_2/3$; $a_5 = -d_2/6$; $a_6 = -b_2/6$; $a_7 = b_2/2$;

$a_8 = d_2/2$; $\alpha_{1j} = x_{1j}/3$; $\alpha_{2j} = (b_2 x_{2j})/3$; $\alpha_{3j} = -(2x_{3j})/3$; $\alpha_{4j} = x_{4j}/3$; $j = 1,2,3,4$;

$\varepsilon_{5j} = -(d_2 x_{5j})/6$; $\varepsilon_{6j} = -(b_2 x_{6j})/6$; $j = 1,2,3,4,5,6$; $\Theta_{7j} = x_{7j}/2$; $\Theta_{8j} = x_{8j}/2$; $j = 5,6$;

$z_1 = t + \tau - 2g$; $z_2 = t - g$; $z_3 = t + \tau + g$; $z_4 = t + g + T$; $z_5 = t + T - 2g$; $z_6 = t + 2g$;

$z_7 = t$; $z_8 = t + T$.

В формуле (35) x_{ij}, $i = 1, 2, \ldots 8$; $j = 1, 2 \ldots 6$ – значения неопределенных коэффициентов при разложении вышеуказанных подынтегральных функций на простейшие дроби. Аналогичный подробный расчет x_{ij} проведен авторами в работах [13–15].

Ввиду того, что математическая формула для случайного процесса $\xi(u)$ неизвестна, вычисление интегралов вида $\int_0^\infty e^{-i\omega_r s}\xi(z_j - s)ds$ аналитическим путем невозможно. Однако по виду известной спектральной плотности (31) можно задать процесс $\xi(u)$ графически или таблично. Синусоидальный характер графика процесса $\xi(u)$ свидетельствует о целесообразности аппроксимации недостающей части графика тригонометрическим трендом с N гармониками вида

$$\xi_{теоретич}(u) = \hat{\xi}(u) = A_0 + \sum_{k=1}^{N}\left(A_k \cos ku + B_k \sin ku\right), \tag{36}$$

где коэффициенты A_0, A_k, и B_k, $k = 1, 2, 3, \ldots N$ задаются по формулам:

$$A_0 = \sum_{j=0}^{r-1}\xi(u_j)/r, \quad A_k = \frac{2}{r}\sum_{j=0}^{r-1}\xi(u_j)\cos(ku_j), \quad B_k = \frac{2}{r}\sum_{j=0}^{r-1}\xi(u_j)\sin(ku_j),$$

$$COA(N) = \sqrt{\sum_{j=0}^{r-1}\left[\xi_{ФАКТ}(u_j) - \hat{\xi}_{ТЕОР}(u_j)\right]^2/r}\,. \tag{37}$$

Варьируя число гармоник N, найдем то значение, при котором стандартизованная ошибка аппроксимации (СОА) будет минимальной. Этим числом оказалось $N = 15$. Подставив в интегралы в формуле (35) вместо $\xi(z_j - s)$ формулы (36), (37) и вычислив интегралы от произведения тригонометрических и экспоненциальных функций, получим окончательную формулу для расчета числовых значений оптимального интерполятора:

$$\tilde{\xi}(t;T;\tau) = \sum_{j=1}^{8} a_j \xi(z_j) + \sum_{j=1}^{4}\sum_{r=1}^{4} i\cdot\alpha_{jr}\Omega_{rjN} + \sum_{j=5}^{6}\sum_{r=1}^{6} i\cdot\varepsilon_{jr}\Omega_{rjN} + \sum_{j=7}^{8}\sum_{r=5}^{6} i\cdot\Theta_{jr}\Omega_{rjN} \tag{38}$$

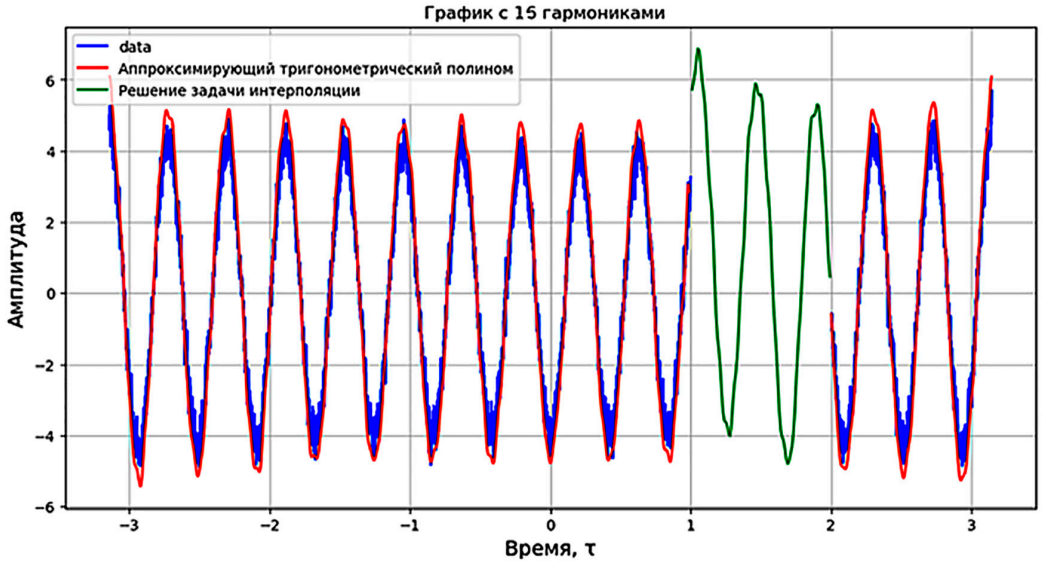
где $\Omega_{rjN} = \Omega_{rj15} = -\frac{A_0}{i\omega_j} + \sum_{k=1}^{15} A_k \frac{k\sin kz_r - i\omega_j \cos kz_r}{k^2 - \omega_j^2} + \sum_{k=1}^{15} B_k \frac{\left(-i\omega_j \sin kz_r - k\cos kz_r\right)}{k^2 - \omega_j^2}$.

Задав значения ключевых параметров τ и T, пользователь программы, составленной авторами, получит числовые значения оптимального интерполятора.

Например,

$\tilde{\xi}(t;\tau;T) = \tilde{\xi}(0,01;0,15;1) = 2,56 + 0,00063i$; $\tilde{\xi}(t;\tau;T) = \tilde{\xi}(0,01;1,5;2) = 5,592 - 0,0031i$.

На рисунке изображен график процесса, аппроксимирующая его тригонометрическая функция и восстановленные данные на интервале $\tau \in (1;2)$ при $T = 2$, $t = 0,01$.



Фактические данные, аппроксимирующий тригонометрический тренд и интерполяционные данные исследуемого L-марковского процесса
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Из рисунка видим, что график построенного оптимального интерполятора при $1 < \tau < 2$ достаточно эффективно согласуется с графиком фактических данных исследуемого L-марковского процесса.

Заключение

Таким образом, в работе получена стохастическая модель оптимального оператора интерполяции для L-марковского процесса с квазирациональной спектральной плотностью. С привлечением метода математической индукции и теории разностных уравнений был определен вид многочленов, входящих в числитель и знаменатель спектральной характеристики интерполирования. Требования аналитичности функций, составляющих спектральную характеристику интерполяции, $\Phi^{(1)}_{\tau,7}(\omega)$ и $\Phi^{(2)}_{\tau,7}(\omega)$ в соответствующих полуплоскостях и целости функции $\Psi_{\tau,7}(\omega)$ однозначно удовлетворяются решением системы линейных алгебраических уравнений.

В отличие от оптимального оператора интерполирования марковского процесса, который представляется в виде суммы значений процесса только в двух крайних точках интервала интерполирования, подобный оператор для исследуемого L-марковского процесса будет представляться линейной комбинацией значений исследуемого процесса и его производных в шести или более точках, что играет большую роль в точном восстановлении данных случайного процесса.

Подход, описанный в представленной работе, позволит детализированно восстанавливать пропущенные данные стохастических процессов с квазирациональным спектром, наблюдаемых в различных радиотехнических приложениях.

Список литературы

1. Батырев И. А., Воронцова О. Н. Интерполяция сигнала с помощью CIC-фильтра // Техника радиосвязи. 2018. Вып. 4 (39). С. 41–53.

2. Кокошкин А. В., Коротков В. А., Коротков К. В., Новичихин Е. П. Особенности интерполяции спектрально-ограниченных сигналов // Журнал Радиоэлектроники. 2017. № 6. URL: http://jre.cplire.ru/jre/jun17/6/text.pdf (дата обращения: 1.04.2026).

3. Жирков В. Ф., Сушкова Л. Т., Королев А. И., Большаков К. Н., Обеднин А. А., Прокофьев Г. В. Полиномиальная интерполяция в цифровой обработке сигналов при высоких требованиях к точности // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 4. URL: http://jre.cplire.ru/jre/apr17/5/text.pdf (дата обращения: 01.04.2026).

4. Jiang H., Sun D., Jampani V., Yang M.-H., Learned-Miller E., Kautz J. Super SloMo: High Quality Estimation of Multiple Intermediate Frames for Video Interpolation, 2018. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2018/papers_backup/Jiang_Super_SloMo_High_CVPR_2018_paper.pdf (дата обращения: 01.04.2026). DOI: 10.1109/CVPR.2018.00938.

5. Немцев Н. С., Гильмутдинов М. Р., Веселов А. И. Применение метода пространственной интерполяции в задаче синтеза промежуточных кадров видеопоследовательности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 4. С. 623–629. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-623-629.

6. Вайс С. Н., Липатов А. А., Репина М. В. Использование методов интерполяции при разработке тестовых данных для проверки устройства цифровой обработки радиолокационных сигналов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2014. № 3. С. 49–52.

7. Ююкин И. В. Интерполяция навигационной функции сплайном лагранжева типа // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2020. Т. 12. № 1. С. 57–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-57-70.

8. Ромм Я. Е., Джанунц Г. А. Моделирование движения навигационных спутников системы ГЛОНАСС на основе кусочно-интерполяционного решения задачи Коши для дифференциальной системы // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 2. С. 88–101. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=39529 (дата обращения: 01.04.2026). DOI: 10.17513/snt.39529.

9. Твердохлебов В. А. Методы интерполяции в техническом диагностировании // Проблемы управления. 2007. № 2. С. 28–34.

10. Yaglom A. M. An Introduction to the Theory of Stationary Random Functions / Revised English edition translated and edited by Richard A. Silverman. Mineola, New York, 2004. 235 p.

11. Розанов Ю. А. Марковские случайные поля. М.: Наука, 1981. 256 с.

12. Фадеева Л. Ю. Построение стохастической модели линейного экстраполятора для L-марковского фрактального процесса // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2025. № 1 (65). С. 46–54. DOI: 10.25686/2306-2819.2025.1.46.

13. Титов А. Н., Фадеева Л. Ю. Расчет числовых значений функционала – экстраполятора фрактального L-марковского процесса с квазирациональной спектральной плотностью // Инженерный вестник Дона. 2026. № 3. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2026/10794 (дата обращения: 01.04.2026).

14. Фадеева Л. Ю., Титов А. Н. Построение математической модели и расчет численных значений оператора фильтрации с запаздыванием для L-марковского процесса // Инженерный вестник Дона. 2025. № 10. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2025/10462 (дата обращения: 01.04.2026).

15. Титов А. Н., Фадеева Л. Ю. Алгоритм реализации оптимального оператора фильтрации с прогнозом по его синтезированной математической модели для L-марковского процесса с квазирациональным спектром // Инженерный вестник Дона. 2025. № 10. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2025/10463 (дата обращения: 01.04.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 621.941
DOI 10.17513/snt.40835

CC BY 4.0

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА СОСТАВ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИПУСКА ПРИ ТОЧЕНИИ ЗАГОТОВКИ С УСИЛЕННЫМ СВАРНЫМ ШВОМ

Фоминов Е. В. ORCID ID 0000-0002-0165-7536

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Российская Федерация, e-mail: fominoff83@mail.ru

Статья посвящена определению условий возникновения различного состава срезаемого слоя при точении цилиндрической поверхности заготовки, содержащей сварной шов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности процесса механической обработки сварных изделий при условии удаления припуска с переменными геометрическими параметрами и физико-механическими свойствами. Цель исследования – определить условия изменения состава комбинированного припуска в зависимости от геометрических параметров технологической системы при точении заготовки с усиленным сварным швом. Исследована технологическая система при продольном наружном точении заготовки, состоящей из двух частей, соединенных сварным швом с усилением. Рассмотрены три основных возможных варианта состава срезаемого слоя: двухкомпонентный цельный, двухкомпонентный раздельный и трехкомпонентный цельный. Для определения условий возникновения каждого из вариантов в зависимости от сочетания геометрических параметров системы использованы методы математического моделирования. Получены аналитические зависимости, позволяющие определить условия возникновения различных видов срезаемого слоя. На основе анализа областей параметров, удовлетворяющих данным условиям, установлено, что в большинстве конфигураций технологических систем будет преобладать вариант двухкомпонентного цельного припуска. Разделение двухкомпонентного припуска возможно при значениях угла в плане менее 45° и обработке длинных сварных швов с малой высотой усиления. Также при точении протяженных сварных участков при малой глубине резания инструментом с низкими значениями угла в плане, будет иметь место обработка трех материалов заготовки одновременно (вариант трехкомпонентного цельного припуска). Полученные в данной работе аналитические зависимости могут быть использованы как предварительный геометрический этап для последующего расчета критических силовых и термодинамических показателей для мониторинга процесса резания, а также позволят при назначении режимов точения определить возможные конфигурации срезаемого слоя и при необходимости произвести корректировку начальных параметров технологической системы.

Ключевые слова: продольное точение, срезаемый слой, комбинированный припуск, сварная заготовка, сварной шов, режимы резания

THE INFLUENCE OF THE TECHNOLOGICAL SYSTEM' GEOMETRIC PARAMETERS ON THE COMBINED ALLOWANCE COMPOSITION WHEN TURNING TO A WORKPIECE WITH A REINFORCED WELD

Fominov E. V. ORCID ID 0000-0002-0165-7536

Federal State Budgetary Educational Institution "Donskoy State Technical University", Rostov-on-Don, Russian Federation, e-mail: fominoff83@mail.ru

The article is devoted to determining the conditions for the occurrence of different compositions of the cut layer when turning the cylindrical surface of a workpiece containing a welded seam. The relevance of the research is due to the need to improve the efficiency of machining welded products under conditions of removing an allowance with variable geometric parameters and physical and mechanical properties. The aim of the study is to determine the conditions for changes in the composition of the combined allowance depending on the geometric parameters of the technological system when turning a workpiece with a reinforced welded seam. The technological system was studied during longitudinal external turning of a workpiece consisting of two parts connected by a welded seam with reinforcement. Three main possible variants of the cut layer composition were considered: two-component integral, two-component separate, and three-component integral. Mathematical modelling methods were used to determine the conditions for the occurrence of each variant depending on the combination of the system's geometric parameters. Analytical dependences were obtained that make it possible to determine the conditions for the occurrence of different types of cut layers. Based on the analysis of the parameter regions satisfying these conditions, it was established that the two-component integral allowance will prevail in most configurations of technological systems. Separation of the two-component allowance is possible at approach angle values of less than 45° and when machining long welded seams with a low reinforcement height. In addition, when turning extended welded sections at a small cutting depth using a tool with low approach angle values, three workpiece materials will be machined simultaneously, corresponding to the variant of a three-component integral allowance. The analytical dependences obtained in this work can be used as a preliminary geometric stage for the subsequent calculation of critical force and thermodynamic parameters for monitoring the cutting process. They also make it possible, when assigning turning modes, to determine possible configurations of the cut layer and, if necessary, adjust the initial parameters of the technological system.

Keywords: longitudinal turning, cut-off layer, combined allowance, welded work piece, weld seam, cutting modes

Введение

Процесс наружного продольного точения является одним из наиболее распространенных видов механической обработки на современных металлообрабатывающих предприятиях. Размеры и физико-механические свойства удаляемого при точении припуска во многом определяют термодинамическое состояние в зоне резания [1–3]. Площадь срезаемого слоя является главным геометрическим фактором, определяющим величину сил резания: с увеличением размеров сечения удаляемого материала силы резания возрастают [3, 4]. Повышение глубины резания и твердости обрабатываемого материала оказывает существенное влияние на вибрационные характеристики процесса резания, приводя к росту амплитуды и частоты вибраций вследствие формирования неустойчивых динамических режимов [5, 6]. В свою очередь, синергетическое воздействие всех перечисленных выше факторов определяет в итоге степень износа режущего инструмента [1, 3, 6]. Отдельно следует отметить, что состав и свойства припуска тесно связаны с формируемой в процессе точения шероховатостью обработанной поверхности [7–9]. Площадь срезаемого слоя и степень обрабатываемости материала опосредованно через силы резания определяют также энергетические и материальные затраты на изготовление деталей [10, 11]. Таким образом, идентификация состава срезаемого слоя является необходимым условием для определения оптимальных режимов резания по различным критериям оптимизации.

В общем случае входные параметры технологической системы, определяющие форму, размеры и физико-механические свойства припуска, в процессе обработки сохраняются постоянными. К ним относятся заданная глубина резания, подача, геометрия режущей части инструмента, а также материал заготовки. Для контроля состояния систем с постоянной конфигурацией служат современные системы мониторинга различных показателей процесса: температуры, сил резания, уровня вибраций [2, 4, 6]. Как правило, при превышении контролируемым параметром заданного критического уровня, что обычно обусловлено негативными эволюционными изменениями в системе, для предотвращения дальнейших поломок обработка останавливается.

Однако при точении изделий, состоящих из нескольких составных частей, исполненных при этом из различных материалов, задача поиска оптимальных режимов резания и допустимых критических значений показателей процесса резания значительно усложняется. Современные исследования в этой области уделяют большое внимание процессу мониторинга и повышению эффективности обработки гибридных изделий [12–14]. Примером удаления переменного по размерам и физико-механическим свойствам припуска может служить процесс точения заготовки, содержащей сварной шов с усилением. В таких случаях имеет место значительная временная дестабилизация силовых, термодинамических и вибрационных показателей процесса резания [15, 16]. При этом наибольшее проявление данных негативных факторов наблюдается на участках разделения материалов заготовки и сварного шва, а степень изменения контролируемых параметров процесса зависит от состава и размеров срезаемого слоя [16]. Таким образом, мониторинг процесса обработки и выбор оптимальных режимов резания при формообразовании многокомпонентных изделий представляет собой актуальную научную и практическую задачу.

Происходящий на этапе прохода сварного участка резкий рост температуры, сил и вибрационной активности инструмента может быть воспринят системой мониторинга, настроенной на чувствительность только к эволюционным изменениям в процессе обработки, как сигнал к отводу инструмента из зоны резания. Для предотвращения такой ситуации должен быть дополнительно задан уровень допустимого превышения контролируемых параметров, обусловленного конструктивными особенностями заготовки на определенных этапах обработки. В этой связи актуально определение априори допустимого уровня отклонений показателей технологической системы от нормальных условий ее функционирования, вызванных изменением состава и свойств срезаемого слоя, с целью предотвращения некорректного прерывания процесса точения.

Возможный уровень изменения сил резания и температуры может быть определен при помощи аналитических зависимостей, а также с применением методов цифрового имитационного моделирования, при условии, что известны переменные физико-механические свойства и геометрические параметры припуска [3, 6]. Для определения этих данных требуется вывод аналитических выражений, описывающих изменение глубины, ширины и площади срезаемого слоя для каждого материала многокомпонентного припуска в процессе прохода резцом сварного участка. Однако до этого на первом этапе необходимо определить принципиально возможные виды срезаемо-

го слоя в зависимости от заданных геометрических параметров технологической системы; решению этой задачи и посвящена данная статья.

Цель исследования – определить условия изменения состава комбинированного срезаемого слоя в зависимости от геометрических параметров технологической системы при точении заготовки с усиленным сварным швом.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является процесс продольного наружного точения заготовки, состоящей из двух компонентов, соединенных сварным швом с усилением. Графическое представление процесса удаления припуска при перемещении резца за один оборот на величину подачи S в направлении D_s при пересечении начальной границы сварного участка представлено на рис. 1. В этом случае в зависимости от сочетания геометрических параметров резца и заготовки можно выделить следующие возможные варианты комбинированного припуска:

I) *Двухкомпонентный цельный* (общий случай) – состоит из двух разных материалов, имеющих общую поверхность, и снимается на одном непрерывном участке режущей кромки (рис. 1, а).

II) *Двухкомпонентный раздельный* (частный случай) – состоит из двух разных материалов, не имеющих общей поверхности, снимается на различных участках режущей кромки (рис. 1, б).

III) *Трехкомпонентный цельный* (частный случай) – состоит из трех разных материалов, имеющих общие поверхности, снимается на одном непрерывном участке режущей кромки (рис. 1, в).

Условия возникновения каждой из трех ситуаций определялись методом математического моделирования. В качестве исходных данных использованы геометрические параметры технологической системы, определяющие форму и состав комбинированного припуска: t – номинальная глубина резания; φ – главный угол в плане резца; L – длина сварного шва; H – высота усиления сварного шва; ω – угол разделки кромок на торцах свариваемых заготовок (рис. 2).

Предложенная модель (рис. 2) справедлива при соблюдении следующих ограничений:

1. Геометрические параметры сварного участка постоянны вдоль всей длины окружности заготовки, а внешний контур усиления шва имеет идеализированную форму в виде дуги.

2. Износ резца, искажающий его геометрию в основной плоскости, отсутствует либо пренебрежительно мал.

3. Радиус вершины резца отсутствует либо пренебрежительно мал.

4. Номинальная глубина резания постоянна, либо ее отклонениями, вызванными вибрационными возмущениями в системе в радиальном направлении, можно пренебречь.

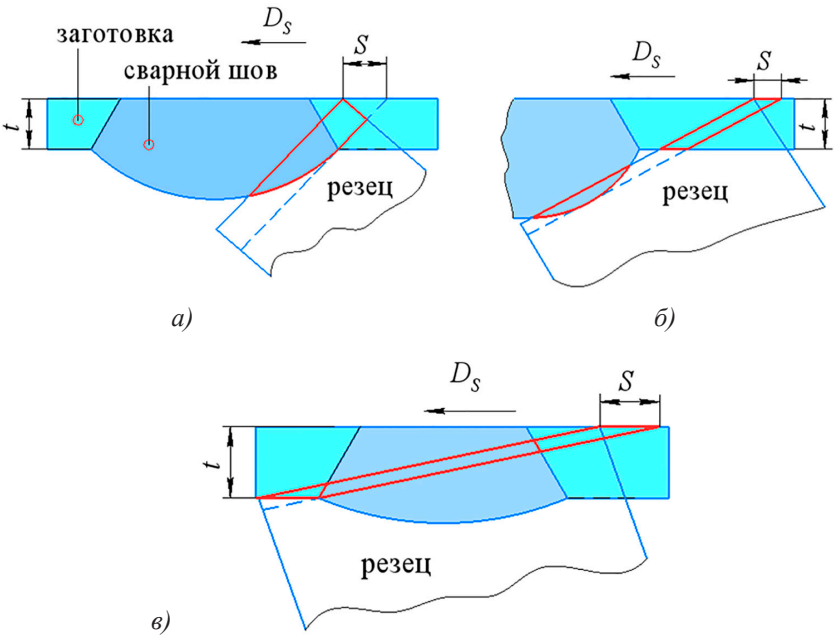


Рис. 1. Варианты комбинированного припуска: а) двухкомпонентный цельный; б) двухкомпонентный раздельный; в) трехкомпонентный цельный
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

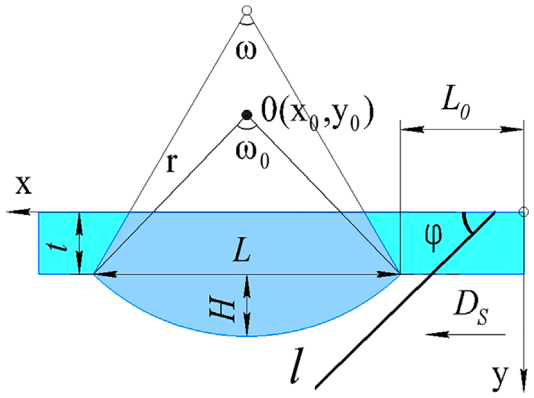


Рис. 2. Схема обработки сварного участка заготовки
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Результаты исследования и их обсуждение

Центр системы координат зададим на расстоянии L_0 от начальной точки сварного участка. Внешний контур усиления шва аппроксимируем дугой окружности со следующими характеристиками: r – радиус окружности; $O(x_O, y_O)$ – центр окружности; ω_0 – угол, стягивающий дугу. Значения этих параметров согласно расчетной схеме:

$$r = \frac{H}{2} + \frac{L^2}{8H}; \qquad (1)$$

$$x_O = L_0 + \frac{L}{2}, y_O = (t + H) - r; \qquad (2)$$

$$\omega = 2\arcsin\left(\frac{L}{2r}\right).$$

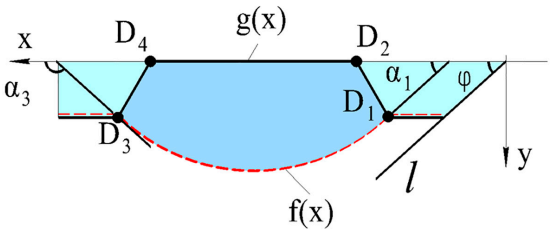


Рис. 3. Схема определения границ раздела материалов
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

На краях границ разделения материалов сварного шва и заготовки зададим точки со следующими координатами (рис. 3):

$$D_1(x, y) = (L_0, t);$$

$$D_2(x, y) = \left(L_0 + t \cdot tg\left(\frac{\omega}{2}\right), 0\right),$$

$$D_3(x, y) = (L_0 + L, t);$$

$$D_4(x, y) = \left(L_0 + L - t \cdot tg\left(\frac{\omega}{2}\right), 0\right).$$

Внешнюю границу сварного шва и границу материала заготовки представим в виде функций $f(x)$ и $g(x)$ соответственно:

$$f(x) = \begin{cases} t, 0 < x < x_{D_1} \\ y_O + \sqrt{r^2 - (x - x_O)^2}, x_{D_1} < x < x_{D_3}, \\ t, x > x_{D_3} \end{cases}$$

$$g(x) = \begin{cases} t, 0 < x < x_{D_1} \\ -k_g \cdot x + b_{g1}, x_{D_1} < x < x_{D_2} \\ 0, x_{D_2} < x < x_{D_4} \\ k_g \cdot x + b_{g2}, x_{D_4} < x < x_{D_3} \\ t, x > x_{D_3} \end{cases},$$

где угловой коэффициент прямой

$$k_g = tg\left(90 - \frac{\omega}{2}\right),$$

а свободные члены уравнений наклонных линий

$$b_{g1} = k_g \cdot L_0 + t; b_{g2} = -k_g \cdot (L_0 + L) + t.$$

Главную режущую кромку резца представим в виде линии l, вершина которой находится в точке с координатой $\tilde{x}$, а ее уравнение запишем в виде

$$y = (x - \tilde{x}) \cdot tg(\varphi).$$

Тогда условия возникновения в технологической системе различных видов срезаемого слоя:

вариант I – для любых $\tilde{x}$ возможно существование только одной точки пересечения прямой l и функции $f(x)$;

вариант II – для любых $\tilde{x}$ возможно существование трех точек пересечения прямой l и функции $f(x)$;

вариант III – для любых $\tilde{x}$ возможно существование трех точек пересечения прямой l и функции $g(x)$, две из которых принадлежат участкам D_1D_2 и D_3D_4.

Для выяснения условий, при которых может иметь место ситуация I или ситуация II,

построим касательные к дуге окружности в точках D_1 и D_3. Обозначим углы, которые эти касательные образуют с осью абсцисс α_1 и α_3 соответственно (рис. 3).

Ситуация с тремя точками пересечения возникает, если $\varphi < \alpha_1$ при $\varphi < 90^o$ и $\varphi > \alpha_3$ при $\varphi > 90^o$. Учитывая, что $tg(\alpha_3) = -tg(\alpha_1)$,

$$\left|tg(\varphi)\right| < tg(\alpha_1), \text{ при } \varphi \neq 90^o \quad (3)$$

Уравнение касательной в точке D_1 будет иметь вид

$$y = t - \frac{(L_0 - x_O)(x - L_0)}{(t - y_O)}.$$

Откуда, с учетом (1, 2), получаем

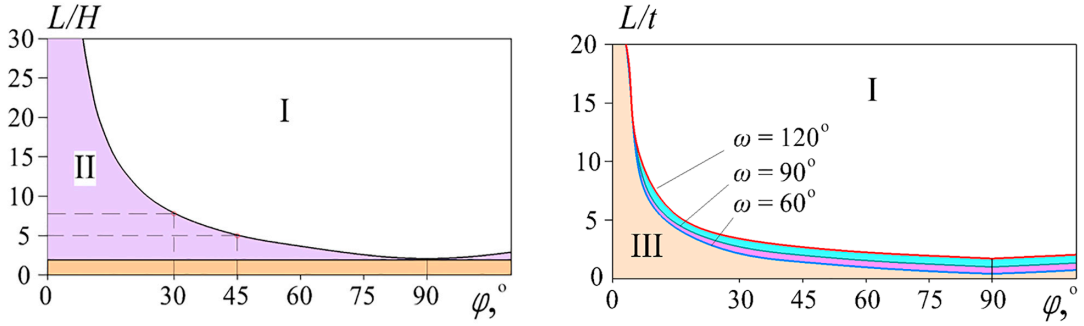
$$tg(\alpha_1) = -\frac{(L_0 - x_O)}{(t - y_O)} = -\frac{\left(L_0 - \left(L_0 + \frac{L}{2}\right)\right)}{\left(t - \left(t + H - r\right)\right)} = \frac{4 \cdot \frac{L}{H}}{\left(\frac{L^2}{H^2} - 4\right)}.$$

Тогда окончательно условие (3):

$$\left|tg(\varphi)\right| < \frac{4 \cdot \beta}{(\beta^2 - 4)}, \quad (У1)$$

где $\beta = L/H$.

Область параметров, удовлетворяющих (У1), представлена на рис. 4, а. Для наиболее распространенного значения угла в плане $\varphi = 45°$ такая ситуация возникнет, если отношение ширины сварного шва L к высоте усиления H будет менее 5,0. Для значений $\varphi < 45°$ ситуация имеет место начиная с более высоких значений L/H. Например, для $\varphi = 30°$ формирование раздельного припуска возможно при $L/H < 7{,}48$. Область применимости установленного выше условия (У1) определяется неравенством $\beta = L/H > 2$.



а) *б)*

Рис. 4. Геометрические параметры системы, обеспечивающие формирование видов срезаемого слоя: а) – двухкомпонентного цельного (I) и двухкомпонентного раздельного (II); б) – двухкомпонентного цельного (I) и трехкомпонентного цельного (III)
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Для формирования *трехэлементного цельного* припуска при $\varphi < 90°$ длина участка линии l между $y = 0$ *и* $y = t$, равная $1 / tg(\varphi)$, должна быть больше, чем разница абсцисс точек D_2 и D_3 (или D_1 и D_4, в силу симметрии это одинаковые расстояния):

$$\frac{t}{tg(\varphi)} > x_{D_3} - x_{D_2} = (L_0 + L) - \left(L_0 + t \cdot tg\left(\frac{\omega}{2}\right)\right) = L - t \cdot tg\left(\frac{\omega}{2}\right);$$

$$tg(\varphi) < \frac{1}{\frac{L}{t} - tg\left(\frac{\omega}{2}\right)}.$$

То же условие при φ > 90° принимает вид

$$\frac{t}{tg(180° - \varphi)} > L - t \cdot tg\left(\frac{\omega}{2}\right);$$

$$-tg(\varphi) < \frac{1}{\frac{L}{t} - tg\left(\frac{\omega}{2}\right)}.$$

Объединив эти два условия в одно выражение, получаем

$$\left|tg(\varphi)\right| < \frac{1}{\frac{L}{t} - tg\left(\frac{\omega}{2}\right)}. \qquad (У2)$$

Из рис. 4, б, видно, что возникновение условия (У2) более вероятно при малых величинах угла в плане. Для значений φ = 45–95° возникает при отношении L/t равном 3,5 и менее. При этом применение условия (У2) возможно, если справедливо неравенство $L/t - tg(\omega/2) > 0$.

Заключение

В представленной статье посредством математического моделирования определены условия формирования различных видов срезаемого слоя при продольном наружном точении заготовки, содержащей сварное соединение с усилением. Рассмотрены три возможных случая, при которых, в зависимости от геометрических параметров рабочей части резца и сварного шва, удаляемый припуск будет цельным из двух материалов, из двух раздельных компонентов также из различных материалов, или же цельным, состоящим из трех различных материалов.

На основе анализа областей параметров, удовлетворяющих данным условиям, установлено, что ситуация с двухкомпонентным цельным припуском будет наиболее распространенной в большинстве конфигураций технологических систем. В этом случае в процессе резания на сварном участке глубина резания и твердость удаляемого материала будут постепенно возрастать.

При значениях угла в плане меньше 45° и значительных отличиях в длине шва и высоте его усиления припуск будет сниматься различными участками режущей кромки в виде двух независимых фрагментов. В этом случае удаление материалов с различной твердостью происходит на отдельных участках с небольшой глубиной резания на каждом из них.

При точении протяженных сварных участков с маленькой глубиной резания (например, при чистовых проходах поверхностей крупногабаритных изделий) резцами с низкими значениями угла φ, становится возможной обработка режущей кромкой одновременно трех материалов с различными физико-механическими свойствами.

Таким образом, для расчета допустимых предельных силовых и термодинамических показателей в дальнейшем необходимо определить и использовать три варианта аналитических зависимостей, описывающих характеристики срезаемого слоя. Выбор конкретного выражения будет определяться установленными в данной работе условиями. Также полученные в статье результаты позволят при назначении режимов обработки и/или выборе конфигурации рабочей части инструмента определить возможные составы срезаемого слоя и оценить риски, связанные с каждым из них.

Список литературы

1. Demirpolat H., Binali R., Patange A. D., Pardeshi S. S., Gnanasekaran S. Comparison of Tool Wear, Surface Roughness, Cutting Forces, Tool Tip Temperature, and Chip Shape during Sustainable Turning of Bearing Steel // Materials. 2023. Vol. 16 (12). P. 4408. URL: https://www.mdpi.com/1996-1944/16/12/4408 (дата обращения: 03.05.2026). DOI: 10.3390/ma16124408.

2. Chun H., Park W., Kim J., Lee C. In-Process Cutting Temperature Monitoring Method Based on Impedance Model of Dielectric Coating Layer at Tool-Chip Interface // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2022. Vol. 6 (5). P. 97. URL: https://www.mdpi.com/2504-4494/6/5/97(дата обращения: 03.05.2026). DOI: 10.3390/jmmp6050097.

3. Gvindjiliya V. E., Fominov E. V., Marchenko A. A., Lavrenova T. V., Debeeva S. A. Influence of cutting speed on pulse changes in the temperature of the front cutter surface during turning of heat-resistant steel 0.17 C-Cr-Ni-0.6 Mo-V // Metal Working and Material Science. 2025. Vol. 27 (3). P. 23–36. URL: https://journals.nstu.ru/files/numbers/flash/4661/23/ (дата обращения: 01.05.2026). DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.3-23-36.

4. Jamshidi M., Rimpault X., Balazinski M., Chatelain J.-F. Fractal analysis implementation for tool wear monitoring based on cutting force signals during CFRP/titanium stack machining // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 106. P. 3859–3868. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-019-04880-y (дата обращения: 01.05.2026). DOI: 10.1007/s00170-019-04880-y.

5. Hassan M., Kirwin R., Rakurty C. S., Mahajan A. Advanced Sensor Technologies in Cutting Applications: A Review // Sensors. 2026. Vol. 26 (3). P. 762. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/26/3/762 (дата обращения: 03.05.2026). DOI: 10.3390/s26030762.

6. Gvindjiliya V. E. Vibration Control of Tool Flank Wear in Turning // Advanced Engineering Research. 2026. Vol. 26 (1). P. 2103. URL: https://www.vestnik-donstu.ru/jour/article/view/2617 (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.23947/2687-1653-2026-26-1-2103.

7. Machno M., Zębala W., Franczyk E. Impact of Cutting Parameters and Tool Type on Surface Finish in MQL Turning of Inconel 625 // Materials. 2025. Vol. 18 (1). P. 4617. URL:

https://www.mdpi.com/1996-1944/18/19/4617(дата обращения: 03.05.2026). DOI: 10.3390/ma18194617.

8. Medina S., Acuña-Rivera M., Castellanos S., Castro K. Evaluation of Machining Parameters in Turning Al7075-T6 Aluminum Alloy Using Dry, Flooded, and Cryogenic Cutting Fluid Conditions // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2025. Vol. 9 (10). P. 328. URL: https://www.mdpi.com/2504-4494/9/10/328 (дата обращения: 03.05.2026). DOI: 10.3390/jmmp9100328.

9. Vu T.-H., Hsu C.-H. Experimental Investigation and Predictive Modeling of Surface Roughness in Dry Turning of AISI 1045 Steel Using Power-Law and Response Surface Approaches // Applied Sciences. 2026. Vol. 16 (3). P. 1392. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/16/3/1392 (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.3390/app16031392.

10. Marinkovic D., Muhamedagic K., Klančnik S., Zivkovic A., Begic-Hajdarevic D., Pasic M. Integrated Modeling and Multi-Criteria Analysis of the Turning Process of 42CrMo4 Steel Using RSM, SVR with OFAT, and MCDM Techniques // Metals. 2026. Vol. 16 (2). P. 131. URL: https://www.mdpi.com/2075-4701/16/2/131 (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.3390/met16020131.

11. Madić M., Trifunović M., Rodić D., Marinković D. Development of Machine Learning Model for Analysis of Total Manufacturing Cost in Medium Turning of C45E Steel // Metals. 2026. Vol. 16 (4). P. 373. URL: https://www.mdpi.com/2075-4701/16/4/373 (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.3390/met16040373.

12. Denkena B., Behrens B. A., Overmeyer L., Kaierle S., Bergmann B., Klemme H, Hermsdorf J., Stonis M., Schwarz N., Budde L., Merkel P., Handrup M. Sensitivity of process signals to deviations in material distribution and material properties of hybrid workpieces // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024. Vol. 130. P. 2649–2659 URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-023-12807-x (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.1007/s00170-023-12807-x.

13. Denkena B., Behrens B. A., Bergmann B., Stonis M., Kruse J., Witt M. Potential of process information transfer along the process chain of hybrid components for process monitoring of the cutting process // Production Engineering Research and Development. 2021. Vol. 15 (2). P. 199–209. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s11740-021-01023-9 (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.1007/s11740-021-01023-9.

14. Denkena B., Bergmann B., Buhl H., Handrup M. Similarity-based anomaly detection method for turning of multi-material workpieces with varying axially constant blank diameter // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2025. Vol. 63. P. 201–213. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581725001658?via%3Dihub (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.1016/j.cirpj.2025.09.014.

15. Бычковский В. С., Филиппенко Н. Г., Попов С. И., Каргапольцев С. К. Исследование свойств и обрабатываемости сварных соединений комбинированным ротационным резцом со стружколомом // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 1 (57). С. 16–23. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-svoystv-i-obrabatyvaemosti-svarnyh-soedineniy-kombinirovannym-rotatsionnym-reztsom-so-struzhkolomom (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.26731/1813-9108.2018.1(57).16-23.

16. Fominov E. V., Aliev M. M., Shuchev K. G., Lavrenova T. V. Tribostrain and Thermoelectric Characteristics of the Friction Process during Turning of a Hybrid Part with a Welded Seam // Journal of Friction and Wear. 2025. Vol. 46. P. 86–91. URL: https://link.springer.com/article/10.3103/S1068366625700400 (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.3103/S1068366625700400.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Финансирование осуществлялось в рамках соглашения от 29 октября 2025 г. № 075-03-2025-302/8 на реализацию ПНИ «Разработка программно-аппаратных средств для мониторинга и анализа параметров резания и эксплуатационных характеристик станков с ЧПУ» (FZNE-2025-0008).

Financing: The work was carried out within the framework of the agreement dated 10/29/2025 No. 075-03-2025-302/8 for the implementation of the research project “Development of software and hardware for monitoring and analyzing cutting parameters and performance characteristics of CNC machines” (FZNE-2025-0008).

УДК 004.9
DOI 10.17513/snt.40836

CC BY 4.0

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НАХОЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЗАЯВОК СО СЛУЧАЙНЫМ ВРЕМЕНЕМ ЖИЗНИ

Шайдуллина Н. К., Нуриев Н. К., Печеный Е. А.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Российская Федерация, e-mail: nshaydullina@yandex.ru

В работе рассмотрены одноканальные системы массового обслуживания заявок, время жизни которых ограничено случайной величиной. Целью исследования является получение аналитического решения задачи нахождения характеристик функционирования одноканальной системы массового обслуживания с накопителем и случайным ограничением на время жизни заявок для проверки адекватности имитационной модели. Приведены примеры реальных систем со случайным временем жизни заявок, моделируемых как системы массового обслуживания. Описана математическая модель задачи нахождения функции распределения фактического времени ожидания обслуживания для стационарного состояния одноканальной системы обработки простейшего потока заявок, концепция которой разработана Б. В. Гнеденко и И. Н. Коваленко. Приведена разновидность исходной модели для системы обслуживания заявок со случайным ограничением на общее время пребывания и стандартной дисциплиной обслуживания заявок в порядке их поступления. В качестве примера рассмотрена система с простейшим входным потоком требований, экспоненциально распределенным временем обслуживания и равномерно распределенным временем жизни заявок. Для нахождения искомой характеристики построено и решено интегральное уравнение. С помощью полученной функции распределения фактического времени ожидания обслуживания найдены доли заявок, получивших полное и неполное обслуживание, совсем не попавших на обслуживание. Проведено сравнение результатов работы аналитической и имитационной моделей, говорящее о высокой точности последней.

Ключевые слова: система массового обслуживания, очередь, случайное время жизни заявок, распределение фактического времени ожидания обслуживания, имитационная модель

MATHEMATICAL MODELING AND SOLUTION TO THE PROBLEM OF FINDING THE CHARACTERISTICS OF A QUEUE SERVICE SYSTEM WITH A RANDOM LIFETIME

Shaydullina N. K., Nuriev N. K., Pechenyy E. A.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan National Research Technological University", Kazan, Russian Federation, e-mail: nshaydullina@yandex.ru

This paper considers single-channel queuing systems with a randomly bounded lifetime. The aim of the study is to obtain an analytical solution to the problem of finding the operating characteristics of a single-channel queuing system with an accumulator and a random constraint on the lifetime of requests in order to verify the adequacy of the simulation model. Examples of real systems with a random lifetime of requests, modeled as queuing systems, are given. A mathematical model is described for the problem of finding the distribution function of the actual waiting time for service for the steady state of a single-channel system for processing a simple request flow, the concept of which was developed by B. V. Gnedenko and I. N. Kovalenko. A variation of the original model is presented for a request servicing system with a random constraint on the total sojourn time and a standard discipline of servicing requests in the order they are received. As an example, a system with a simple input flow of requests, exponentially distributed service time, and uniformly distributed lifetime of requests is considered. To find the desired characteristic, an integral equation is constructed and solved. Using the resulting distribution function of actual service wait times, we determined the proportions of requests that received full and partial service, as well as those that were not serviced at all. A comparison of the results of the analytical and simulation models was conducted, demonstrating the high accuracy of the latter.

Keywords: queueing system, queue, random lifetime of requests, distribution of actual waiting time for service, simulation model

Введение

Системы массового обслуживания с ограниченным временем жизни заявок встречаются во многих областях деятельности человека: информационные технологии, финансы, телемедицина, техника, маркетинг и др. [1–3]. Характерной чертой таких систем является риск утраты заявок в процессе обслуживания, что приводит к неэффективному использованию ресурсов [4].

Ограничение на срок жизни требования может определяться случайным образом, согласно некоторому вероятностному распределению [5–7]. Случайное время пребывания заявки в системе характерно для многих важных процессов: оказание экстренной помощи тяжелым больным, затяжные процессы со сроком давности в юриспруденции, спасение людей в чрезвычайных ситуациях, обработка объектов в ограниченной зоне действия обслуживающего устройства [8].

Получение эксплуатационных характеристик таких СМО необходимо не только для оценки эффективности их функционирования, но и для прогнозирования поведения систем при различных сценариях нагрузки в процессе предпроектных исследований.

Цель исследования – получение аналитического решения задачи нахождения характеристик функционирования одноканальной системы массового обслуживания с накопителем и случайным ограничением на время жизни заявок для проверки адекватности имитационной модели.

Материалы и методы исследования

Системы массового обслуживания с ограниченным временем жизни заявок требуют особого подхода к изучению и специализированного математического аппарата, так как введение временных границ нарушает свойство отсутствия последействия, характерное для классических марковских моделей. Это происходит из-за того, что вероятность перехода заявки из состояния ожидания в состояние обслуживания начинает зависеть от времени, которое она уже провела в накопителе. Таким образом, пространство состояний перестает быть дискретным, что влечет необходимость введения функций распределения дополнительных случайных величин. Это позволяет сохранить аналитическую замкнутость и избежать расширения пространства состояний системы.

Одними из первых публикаций, посвященных моделированию СМО с ограниченным временем жизни заявок, являются работы советских математиков Б. В. Гнеденко и И. Н. Коваленко [9, 10], а также венгерского ученого Л. Такача [11]. Ими проработаны концептуальные вопросы моделирования одноканальных систем с простейшим входным потоком заявок и предложен соответствующий математический аппарат. Фокус исследований сосредоточен на нахождении функции распределения фактического времени ожидания обслуживания, которая является аналитическим базисом для определения ряда производных характеристик СМО. В частности, на ее основе находятся функция распределения реального времени пребывания заявок в системе, вероятность полного обслуживания, вероятность отказа и др. Таким образом, построение функции распределения фактического времени ожидания обслуживания обеспечивает полное вероятностное описание рассматриваемой СМО.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим одноканальную СМО с накопителем, время жизни заявок в которой ограничено и является случайной величиной, входной поток требований простейший.

Для построения модели вводятся следующие характеристики:

λ – интенсивность простейшего входного потока заявок;

$H(x)$ – функция распределения случайной величины – времени обслуживания;

$B(x)$ – распределение вероятностей того, что время ожидания заявки в очереди равно некоторой случайной величине x;

$G_y(x)$ – распределение вероятностей того, что после пребывания заявки в очереди в течение отрезка времени y, заявка попадет на обслуживание, где будет находиться в течение отрезка времени, не большего x;

$\xi(t)$ – случайная величина – время ожидания начала обслуживания заявки, поступившей в систему в момент времени t;

$F(t, x) = P(\xi(t) < x)$ – функция распределения фактического времени ожидания обслуживания.

Пусть заявка пришла в систему в момент времени t. За промежуток времени $t + \Delta t$ могут произойти следующие несовместные события, которые обеспечат выполнение неравенства $\xi(t + \Delta t) < x$:

− за указанный промежуток времени не поступит ни одна заявка;

− за указанный промежуток времени поступает одна заявка и уходит из очереди из-за истечения срока жизни;

− за указанный промежуток времени поступает одна заявка, ожидает в очереди в течение некоторого времени, начинает обслуживание, но не успевает его завершить из-за истечения срока жизни;

− за указанный промежуток времени поступает одна заявка, ожидает в очереди в течение некоторого времени, начинает обслуживание и завершает его до истечения срока жизни.

Рассмотренные несовместные события образуют полную группу, поэтому ве-

роятность того, что неравенство $\xi(t + \Delta t) < x$ верно, равно сумме вероятностей описанных событий:

$$F\left(x,t+\Delta t\right)=\left(1-\lambda\Delta t\right)F\left(x+\Delta t,t\right)+$$

$$+\lambda\Delta t\int_{0}^{x+\Delta t}\left\{B\left(y\right)+\left[1-B\left(y\right)\right]G_{y}\left(x-y+\Delta t\right)+\right. \tag{1}$$

$$\left.+\left[1-B\left(y\right)\right]\left[1-G_{y}\left(x-y+\Delta t\right)\right]H\left(x-y+\Delta t\right)\right\}d_{y}F\left(y,t\right).$$

При делении уравнения (1) на Δt, $\Delta t \to 0$ и учете того, что в стационарном состоянии, существование которого показано в работе [12], верно равенство

$$\frac{\partial F\left(\omega,t\right)}{\partial t}=0, \tag{2}$$

получается уравнение для нахождения функции распределения ожидания обслуживания:

$$\frac{\partial F\left(x\right)}{\partial x}-\lambda\int_{0}^{x}\left(1-B\left(y\right)\right)\left(1-G_{x}\left(x-y\right)\right)\left(1-H\left(x-y\right)\right)dF\left(y\right)=0. \tag{3}$$

Функция F(x) терпит разрыв в точке 0 и абсолютно непрерывна при $x > 0$ [10]. Если обозначить через $f(x)$ производную справа от функции $F(x)$, то формула (3) преобразуется к виду

$$f\left(x\right)-\lambda\int_{0}^{x}\left(1-B\left(y\right)\right)\left(1-G_{x}\left(x-y\right)\right)\left(1-H\left(x-y\right)\right)f\left(y\right)dy=$$

$$=\lambda F\left(0\right)\left(1-G_{0}\left(x\right)\right)\left(1-H\left(x\right)\right), \tag{4}$$

где $F(0)$ находится из условия нормировки

$$F\left(0\right)+\int_{0}^{T}f\left(x\right)dx=1, \tag{5}$$

здесь T – максимальное время жизни требования.

Наиболее значимыми эксплуатационными характеристиками функционирования любых СМО являются доли обслуженных и необслуженных заявок. В случае, когда ограничено время жизни заявок, появляется еще и множество заявок, которые начали обслуживание, но не завершили его.

Для того, чтобы получить долю заявок, совсем не попавших на обслуживание, нужно применить формулу

$$P_{\text{ОТК}}=\int_{0}^{T}B\left(y\right)dF\left(y\right). \tag{6}$$

Для того, чтобы найти долю заявок, не получивших полное обслуживание, нужно применить формулу

$$\text{P}_{\text{недо}}=\int_{0}^{2}\left(1-B\left(y\right)\right)\int_{0}^{\infty}G_{y}\left(z\right)dH\left(z\right)dF\left(y\right). \tag{7}$$

Уравнение (4) универсально в том смысле, что обеспечивает возможность моделирования разных способов наложения ограничения на время жизни заявок: отсутствие ограничения как такового, случайное ограничение на время ожидания обслуживания в очереди, случайное ограничение на время пребывания заявок в системе.

Важно отметить, что функция $G_y(x)$ предопределяется только в системах со сложной дисциплиной обслуживания. В случае применения стандартной дисциплины FIFO процесс

функционирования системы обработки заявок целиком и полностью обусловлен законами распределения входного потока, потока обслуживания и времени жизни заявок.

В рассматриваемом авторами случае ограничение времени жизни заявок является общим, то есть накладывается на время пребывания заявок в системе. При этом истечение времени жизни требования может состояться как в ходе ожидания, так и в процессе обслуживания. Для такого характера ограничения функция B(x) определяет распределение времени пребывания заявок в системе, уравнение (4) преобразуется к виду

$$f(x)-\lambda\left(1-B(x)\right)\int_0^x\left(1-H(x-y)\right)f(y)\,dy=\lambda F(0)\left(1-B(x)\right)\left(1-H(x)\right), \qquad (8)$$

а функция $G_y(x)$ находится как

$$G_y(x)=\left(B(x+y)-B(y)\right)/\left(1-B(y)\right). \qquad (9)$$

Уравнение (8) относится к линейным уравнениям Вольтерра второго рода. Основными методами решения таких уравнений являются метод преобразований Лапласа или метод последовательных приближений. В отдельных случаях оно может быть сведено к дифференциальному уравнению дифференцированием по верхнему пределу.

Оценим трудоемкость аналитического решения на конкретном примере.

Пусть средняя интенсивность простейшего входного потока заявок $\lambda = 6$, средняя интенсивность обслуживания $\mu = 10$, ограничение времени жизни заявки распределено равномерно на интервале [0, 2]. Тогда уравнение (8) принимает вид

$$f(x)-6e^{-10x}\left(1-\frac{x}{2}\right)\int_0^x e^{10y}f(y)\,dy=6F(0)e^{-10x}\left(1-\frac{x}{2}\right). \qquad (10)$$

Решим уравнение, учитывая нормировку (3) при условии $x <= 2$.

Введем обозначение

$$F(x)=\int_0^x e^{10y}f(y)\,dy. \qquad (11)$$

Тогда

$$f(x)=e^{-10x}F'(x). \qquad (12)$$

Подставив выражение (12) в уравнение (10), получим

$$e^{-10x}F'(x)-6e^{-10x}\left(1-\frac{x}{2}\right)F(x)=6F(0)e^{-10x}\left(1-\frac{x}{2}\right)$$

или

$$F'(x)-(6-3x)F(x)=F(0)(6-3x). \qquad (13)$$

Это линейное дифференциальное уравнение первого порядка. Для решения введем интегрирующий множитель:

$$\mu(x)=e^{\int-(6-3\delta)dx}=e^{-6x+1.5x^2}.$$

Решением уравнения (11) является функция

$$F(x)=F(0)(1-e^{6x-1.5x^2}). \qquad (14)$$

Тогда

$$f(x)=e^{-10x}F'(x)=F(0)(6-3x)e^{-4x-1.5x^2}. \qquad (15)$$

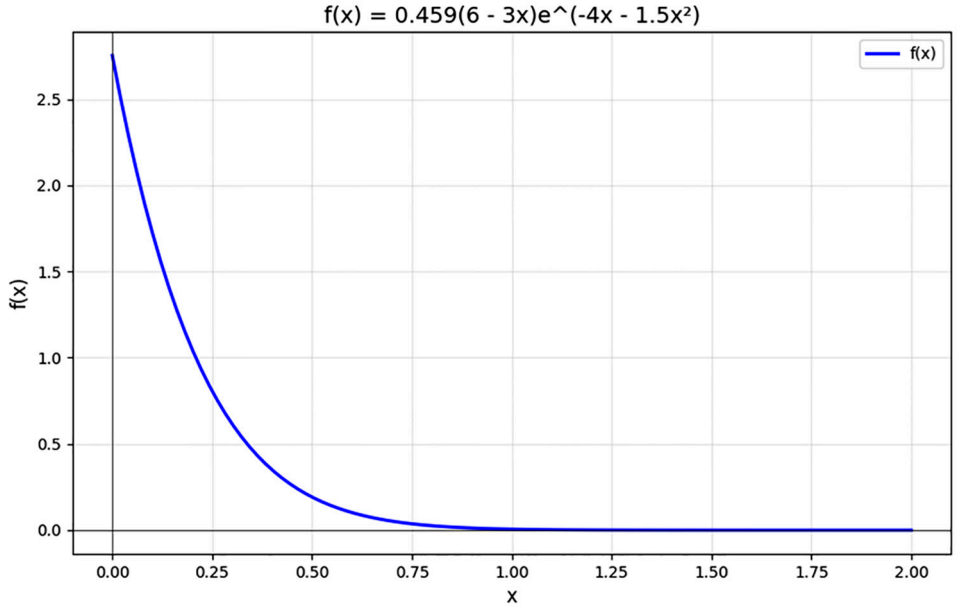
Для нахождения константы $F(0)$ воспользуемся условием нормировки (5):

$$F(0)+F(0)\int_0^2(6-3x)e^{-4x-1.5x^2}\,dx=1,$$

откуда

$$F(0) \approx 0.456, f(x) \approx 0.456(6-3x)e^{-4x-1.5x^2}.$$

График функции f(x) представлен на рисунке.



Плотность распределения фактического времени ожидания обслуживания
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

$F(0) \approx 0{,}456$ означает, что примерно 45,6 % поступивших заявок попали на обслуживание без ожидания в очереди.

Получим долю заявок, совсем не попавших на обслуживание по формуле (6):

$$P_{\text{ОТК}} = 0{,}456\int_0^2 \left(\frac{x}{2}\right)(6-3x)e^{-4x-1{,}5x^2}dx \approx 0{,}0483. \quad (16)$$

Вычислим долю заявок, не получивших полного обслуживания, по формуле (7), используя соотношение (9):

$$\text{P}_{\text{недо}} = 10\int_{0{,}0001}^{2}\left(\int_0^{\infty}\frac{z}{2-y}e^{-10z}dz\right)\left(1-\frac{y}{2}\right)(6-3y)e^{-4y-1{,}5y^2}dy \approx 0{,}0589. \quad (17)$$

Тогда доля заявок, получивших полное обслуживание, находится так:

$$\text{P}_{\text{полн}} = 1 - \text{P}_{\text{ОТК}} - \text{P}_{\text{недо}} = 0{,}8927.$$

Таким образом, при данных входных параметрах почти 90 % пришедших в систему заявок будет обслужено полностью.

Приведенный пример показывает, что даже в простом варианте – с экспоненциальным обслуживанием и равномерно распределенным временем жизни заявок – модель сложна для практического применения. А для вариантов с другими функциями распределения потоков или групповым входным потоком почти непригодна. В этих случаях наиболее целесообразным решением является применение имитационного моделирования [13, 14].

На основе представленной математической модели была проведена верификация имитационной модели, построенной авторами для оценки характеристик СМО с ограниченным временем жизни заявок [15, 16]. Результаты работы имитационного алгоритма с описанными входными параметрами таковы:

$$\text{P}_{\text{полн}} = 0{,}9, \quad \text{P}_{\text{ОТК}} = 0{,}0454, \quad \text{P}_{\text{недо}} = 0{,}052.$$

Полученные данные свидетельствуют о высокой точности имитационной модели.

Выводы

1. Проведен анализ одноканальной системы массового обслуживания заявок со случайным ограничением на общее время пребывания и стандартной дисциплиной обслуживания заявок в порядке их поступления.

2. На основе концептуальной модели Б. В. Гнеденко, И. Н. Коваленко для равномерно распределенного времени жизни заявок сделана постановка задачи и получено аналитическое решение.

3. Путем сравнения с аналитическим решением проведена верификация построенной авторами имитационной модели для изучения поведения СМО с ограниченным временем жизни заявок.

4. Доказана практически (до сотых долей) точность совпадения результатов имитационного и аналитического моделирования, которая позволяет утверждать, что разработанная имитационная модель может быть использована для других функций распределения потоков заявок без поиска аналитического решения.

5. Показано, что в практических целях только имитационное моделирование позволяет разрешать задачи нахождения эксплуатационных характеристик функционирования СМО с ограниченным временем жизни заявок для любых законов распределения случайных величин и любого характера входного потока требований.

6. Обосновано, что разработанная имитационная модель является уникальной и представляет ценность для решения прикладных задач проектирования и эксплуатации СМО: позволяет модифицировать структуру системы; дает возможность анализировать поведение всей системы и отдельных ее частей на этапе проектирования; реализовать поддержку эффективных управленческих решений с привлечением искусственного интеллекта.

Список литературы

1. Лохвицкий В. А., Гончаренко В. А., Левчик Э. С. Модель масштабируемого микросервиса на основе системы массового обслуживания с «охлаждением» // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2022. № 1 (29). С. 39–44. DOI: 10.24412/2413-2527-2022-129-39-44. EDN: ZALQRA.

2. Gontis V. Discrete q-Exponential Limit Order Cancellation Time Distribution. // Fractal and Fractional. 2023. № 7 (8). P. 581. DOI: 10.3390/fractalfract7080581.

3. Маколкина М. А., Шарлаева М. В. Исследование средней задержки в сетях связи, предоставляющих телемедицинские услуги // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 3. С. 59–65. DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-3-59-65. EDN: DRRDAM.

4. Jafarnejad Ghomi E., Rahmani A. M., Qader N. N. Applying queue theory for modeling of cloud computing: A systematic review // Concurrency Computat Pract Exper. 2019. № 31. P. e5186. DOI: 10.1002/cpe.5186.

5. Науменко В. В., Матальцкий М. А., Монько В. Д. Об имитационном моделировании НМ-сетей с некоторыми особенностями // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 2. Математика. Физика. Информатика, вычислительная техника и управление. 2016. Т. 6. № 1. С. 149–156. EDN: VIUTAV.

6. Xiaohu Wu., Francesco De Pellegrini, Giuliano Casale Delay and Price Differentiation in Cloud Computing: A Service Model, Supporting Architectures, and Performance // ACM Trans. Model. Perform. Eval. Comput. Syst. 2023. Vol. 8. Is. 3. Article 6. 40 p. DOI: 10.1145/3592852.

7. Кумков С. И., Игнатенкова Л. А. Интервальный подход к оцениванию стабильности характеристик стандартного образца // Вычислительные технологии. 2017. Т. 22. № 2. С. 85–98. EDN: YPLUFJ.

8. Рыжиков Ю. И. Многоканальные системы обслуживания с марковским нетерпением // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2018): материалы XVII Международной конференции имени А. Ф. Терпугова (г. Томск, 10–15 сентября 2018 г.). Томск: Научно-технической литературы, 2018. С. 125–131. EDN: YMYTJJ.

9. Саати Т. Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. М.: Издательство «Советское радио», 1971. 520 с.

10. Коваленко И. Н. Некоторые задачи массового обслуживания с ограничением // Теория вероятностей и ее применение. 1961. Т. 6. № 2. С. 222–228. URL: https://www.mathnet.ru/rus/tvp/v6/i2/p222 (дата обращения: 11.05.2026).

11. Takacs L. Investigation of waiting – time problems by reduction to Markov processes. Acta Math., Acad. Scient. Hung. 1955. Vol. 6. P. 101–129. URL: https://zbmath.org/0067.10903 (дата обращения: 11.05.2026).

12. Афанасьева Л. Г. О существовании предельного распределения в системах массового обслуживания с ограниченным временем пребывания // Теория вероятностей и ее применения. 1965. Т. 10. № 3. С. 570–578. URL: https://www.mathnet.ru/rus/tvp/v10/i3/p570 (дата обращения: 11.05.2026).

13. Шайдуллина Н. К., Печеный Е. А., Нуриев Н. К. Проблема эффективного администрирования системы массового обслуживания с ограниченным временем жизни заявок // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 7. С. 69–73. DOI: 10.17513/snt.39235.

14. Шайдуллина Н. К., Печеный Е. А., Нуриев Н. К. Моделирование процесса администрирования системы массового обслуживания с ограниченным временем жизни заявок // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 11. С. 81–86. DOI: 10.17513/snt.39824.

15. Шайдуллина Н. К., Печеный Е. А., Нуриев Н. К. Численный анализ поведения смешанного потока заявок с ограниченным временем жизни // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 10. С. 94–99. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40177 (дата обращения: 11.05.2026). DOI: 10.17513/snt.40177.

16. Шайдуллина Н. К. Численное решение задачи эффективного обслуживания группы заявок с ограниченным временем жизни // Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов: материалы XXXIX Международной научно-практической конференции (г. Москва, 03 апреля 2025 г.). М.: ООО «Издательство Академическая среда», 2025. С. 408–413. URL: https://www.elibrary.ru/qptmfo (дата обращения: 11.05.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 621.313.84
DOI 10.17513/snt.40837

CC BY 4.0

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Сафин А. Р., Шакурова З. М., Шавалеев Б. Д.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», Казань, Российская Федерация, e-mail: diligentquaga663@gmail.com

В настоящее время электрические машины в транспортных средствах в основном используют дорогие редкоземельные магниты NdFeB, что создает экономические и экологические проблемы из-за растущего спроса. Данное исследование рассматривает последние достижения в области конструирования двигателей и магнитных материалов, чтобы выявить и оценить перспективы решения этой проблемы. Цель исследования – оценить перспективы использования альтернативных магнитных материалов (ферритов, переработанных NdFeB) и перспективных конструкций двигателей (PMaSynRM, WFSM, SynRM, гибридное возбуждение) в качестве замены дорогим и экологически проблемным NdFeB-магнитам в тяговых электроприводах, с выявлением наиболее рациональных решений для промышленности. В работе анализируются различные альтернативные конструкции двигателей по сравнению с традиционным синхронным двигателем с постоянными магнитами (в иностранной литературе PMSM). Кроме того, оценивается потенциал ферритовых и переработанных магнитов NdFeB в качестве замены первичным магнитам NdFeB. С помощью детального моделирования в исследовании сравниваются производительность и экономическая эффективность этих решений с эталонным синхронным двигателем с постоянными магнитами (PMSM), при рассмотрении которых можно прийти к выводу, что использование магнитов NdFeB в PMSM привело к более высокой плотности крутящего момента, меньшей пульсации момента, более высокому КПД и меньшей длине пакета по сравнению с ферритами. Учитывая их перспективные эксплуатационные характеристики и потенциал в электрических двигателях следующего поколения, рекомендуется, чтобы будущие исследования были сосредоточены на новых технологиях, таких как двигатели с гибридным возбуждением, аксиально-потоковые и синхронные двигатели с реактивным ротором, с акцентом на технологичность изготовления, а также на новых магнитных материалах, таких как FeN и MnBi.

Ключевые слова: синхронные двигатели, постоянные магниты, редкоземельные магниты, переработанные магниты, ферриты

ALTERNATIVE MAGNETIC MATERIALS AND MOTORS FOR ELECTRIC DRIVES

Safin A. R., Shakurova Z. M., Shavaleev B. D.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan State Power Engineering University", Kazan, Russian Federation, e-mail: diligentquaga663@gmail.com

Currently, electric vehicles mainly use expensive rare-earth NdFeB magnets, which creates economic and environmental challenges due to the growing demand. This study examines the latest advancements in motor design and magnetic materials to identify and evaluate the potential solutions to this problem. The purpose of the study is to evaluate the prospects of using alternative magnetic materials (ferrites, recycled NdFeB) and promising motor designs (PMaSynRM, WFSM, SynRM, hybrid excitation) as a replacement for expensive and environmentally problematic NdFeB magnets in traction electric drives, and to identify the most suitable solutions for the industry. The paper analyzes various alternative motor designs compared to the traditional permanent magnet synchronous motor (PMSM in foreign literature). In addition, the potential of ferrite and recycled NdFeB magnets as a replacement for primary NdFeB magnets is evaluated. Through detailed simulations, the study compares the performance and cost-effectiveness of these solutions with a reference permanent magnet synchronous motor (PMSM), which suggests that the use of NdFeB magnets in PMSM results in higher torque density, lower torque ripple, higher efficiency, and shorter package length compared to ferrites. Given their promising performance and potential in next-generation electric motors, it is recommended that future research focus on new technologies such as hybrid-excited, axial-flux, and jet-rotor synchronous motors, with a focus on manufacturing feasibility, as well as new magnetic materials such as FeN and MnBi.

Keywords: synchronous motors, permanent magnets, rare earth magnets, recycled magnets, ferrites

Введение

Данное исследование посвящено изучению последних достижений в области электрических двигателей (ЭД) и магнитных материалов, которые позволяют сократить или полностью исключить использование редкоземельных постоянных магнитов, через анализ безмагнитных и магниторедукторных конструкций двигателей.

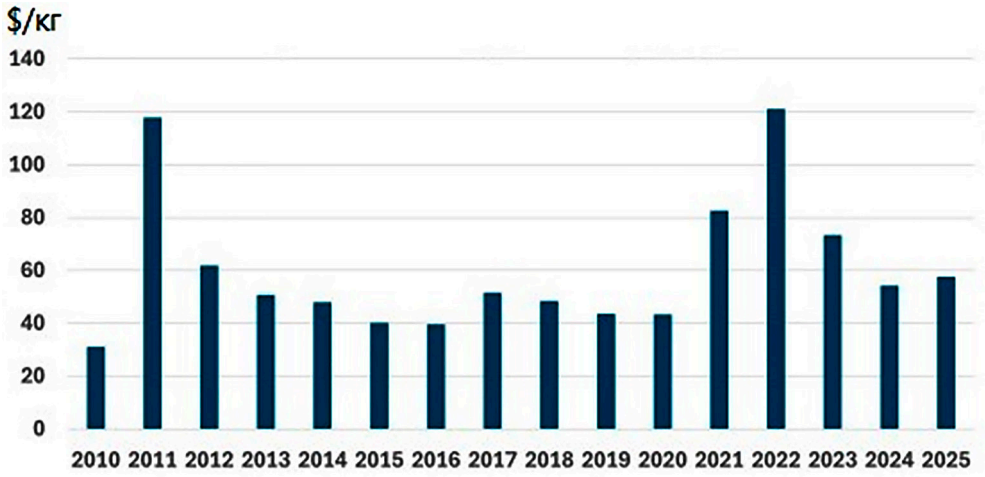


Рис. 1. Цены на неодим (USD за кг, очищенный металл 99,5 %) с 2010 по 2025 г.
Примечание: составлен авторами на основе источника [6]

Неодим-железо-борные ($Nd_2Fe_{14}B$) магниты высоко ценятся за их непревзойденную магнитную энергию в тяговых машинах, однако их высокая стоимость и зависимость от поставок с Китая на рынке создают геополитические и экономические риски [1, 2]. Их ценовая волатильность очевидна из значительных скачков в 2012 и 2022 гг., что проиллюстрировано на рис. 1. Таким образом, существует необходимость в поиске альтернативных решений для обеспечения будущего высокоэффективных ЭД и электромобилей.

Электрические двигатели играют ключевую роль в переходе к устойчивому транспорту, предлагая значительно более высокий КПД – примерно в 3 раза выше, чем у двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Поскольку электрификация автомобильного сектора набирает обороты, она напрямую решает критически важный источник выбросов, на долю транспорта приходится почти половина глобального объема выбросов CO_2 [3]. ДВС не только неэффективны, но и являются основными источниками вредных загрязнителей. Только в ЕС мелкодисперсные частицы из выхлопных газов ДВС связаны с более чем 300 000 случаев преждевременной смерти ежегодно [4]. Помимо CO_2 ДВС выбрасывают метан и оксиды азота – парниковые газы (ПГ) с гораздо более высоким потенциалом глобального потепления, что дополнительно усугубляет изменение климата и наносит ущерб здоровью органов дыхания.

Безотлагательность этого перехода подчеркивается текущим климатическим кризисом: глобальная температура уже повысилась на 1–1,5 °C по сравнению с доиндустриальным уровнем [5, 6], а прогнозы указывают на продолжение потепления, что угрожает экосистемам и биоразнообразию во всем мире.

Однако это растущее стремление к электрификации значительно увеличит спрос на редкоземельные постоянные магниты (РЗМ-ПМ) в электрических машинах, если гибридные и электромобили (HEV и EV) будут доминировать в продажах новых автомобилей в ближайшем будущем. С ростом популярности внедорожников их возросшие потребности в мощности будут потреблять больше редкоземельных материалов [7]. Ожидается, что спрос на тяговые машины к 2030 г. вырастет более чем в 10 раз, а прогнозы предсказывают до 140 млн электродвигателей для EV ежегодно к 2034 г., что дополнительно усугубляется потребностью и в других сферах (например, ветряные турбины) [8, 9]. Такой возросший спрос может экспоненциально увеличить стоимость РЗМ-ПМ и создает проблемы для производителей оригинального оборудования (OEM) в обеспечении стабильной, диверсифицированной цепочки поставок, с потенциальными экономическими потерями из-за сбоев в поставках. Кроме того, добыча редкоземельных материалов усугубляет разрушение окружающей среды, выбросы парниковых газов и небезопасные условия труда, угрожая устойчивости автомобильной промышленности [10]. Крупные производители техники, такие как John Deere, Fendt и Case IH, уже представили концепты и серийные модели электрических тракторов (например, Fendt e100 Vario, John Deere SESAM), что подтверждает растущий интерес отрасли к электроприводу.

Исследование восполняет пробел в знаниях, изучая производительность и жиз-

неспособность переработанных NdFeB-магнитов в тяговых электродвигателях. В то время как некоторые исследования, такие как [11], изучали переработанные магниты в сравнении с первичными, они были ограничены конкретными уровнями мощности – 385 Вт и 8,8 кВт соответственно. Более того, исследование [12] было сосредоточено исключительно на бесщеточном двигателе постоянного тока, который не используется в электромобилях. В исследованиях [13] сконцентрировано внимание на тяговый электродвигатель для электрической лодки, который, предположительно, должен быть приспособлен для низкоскоростной, высокомоментной работы, эффективности и долговечности в морских условиях с водяным охлаждением. В отличие от этого, ЭД в электромобилях требуют высокой выходной мощности, компактности и легкого веса с продвинутым отводом тепла при отсутствии избытка воды. Устаревший характер большей части существующей литературы не учитывает последние технологические разработки и тенденции, такие как растущее внедрение синхронных двигателей с обмоткой возбуждения (WFSM) крупными производителями, например BMW [14].

Цель исследования – оценить перспективы использования альтернативных магнитных материалов (ферритов, переработанных NdFeB) и перспективных конструкций двигателей (PMaSynRM, WFSM, SynRM, гибридное возбуждение) в качестве замены дорогим и экологически проблемным NdFeB-магнитам в тяговых электроприводах, с выявлением наиболее рациональных решений для промышленности.

Материалы и методы исследования

В данном исследовании использовался программный комплекс Ansys Motor-CAD версии 2023.2.2. Он был выбран для сбора данных благодаря широкому применению в моделировании электрических двигателей на этапе среднего уровня проектирования, с использованием аналитических методов и двумерного конечно-элементного анализа. В качестве эталонного двигателя для сравнения был выбран синхронный двигатель с постоянными магнитами (PMSM).

Результаты исследования и их обсуждение

Тепловые характеристики моделировались на скорости 6000 об/мин с использованием стационарных расчетов для определения распределения температур, что показано на рис. 2. Контрольными точками являются: полюс ротора, поверхность статора, поверхность ротора, корпус и горячая точка обмотки. Данная скорость была выбрана потому, что она находится в диапазоне, где двигатели начинают проявлять тепловые ограничения и происходит снижение крутящего момента. Для базового двигателя с магнитами N45UH на рис. 2, а, самой горячей частью является обмотка (146,2 °C), за которой с небольшим отрывом следуют ярмо статора и корпус. Температура магнитов составляет приблизительно 124 °C, при этом температура снижается по направлению к внутренней части ротора и вала. Такое распределение указывает на то, что охлаждение обмотки можно улучшить, либо увеличив расход охлаждающей жидкости в минуту на слоях обмотки, либо используя водяной контур.

Примечательно, что у двигателей с переработанными магнитами наблюдается лишь незначительное повышение температуры в каждой из контрольных точек. Это не объясняет причину разницы в производительности, поэтому для дальнейшего обсуждения будет использован анализ переходных процессов. Замена магнитов на ферритовые в базовом двигателе привела к небольшому повышению температуры в большинстве ее частей. Синхронные реактивные двигатели с постоянными магнитами (PMaSynRM – Permanent Magnet assisted Synchronous Reluctance Motor) демонстрируют меньшее нагревание во всех областях, что можно объяснить большим объемом для распределения тепла и большей общей площадью поверхности.

На рис. 3 показано, как каждая технология двигателя была масштабирована для достижения крутящего момента приблизительно в 400 Н·м. Поскольку для масштабирования изменялась только высота оси вращения, базовые скорости у двигателей различаются. Базовый двигатель на магнитах NdFeB демонстрирует более плавное снижение крутящего момента в режиме ослабления поля по сравнению с другими двигателями. Базовый двигатель с переработанными магнитами потребовал увеличения высоты оси вращения на 3,5 %, что незначительно снизило его базовую скорость. Характеристики переработанных магнитов незначительно ухудшались после превышения базовой скорости. Их замена на ферритовые магниты привела к значительному снижению базовой скорости, что потребовало увеличения высоты оси вращения на 82 %. У двигателей PMaSynRM с магнитами NdFeB базовая скорость значительно ниже (около 3300 об/мин), а крутящий момент быстро падает с ростом скорости.

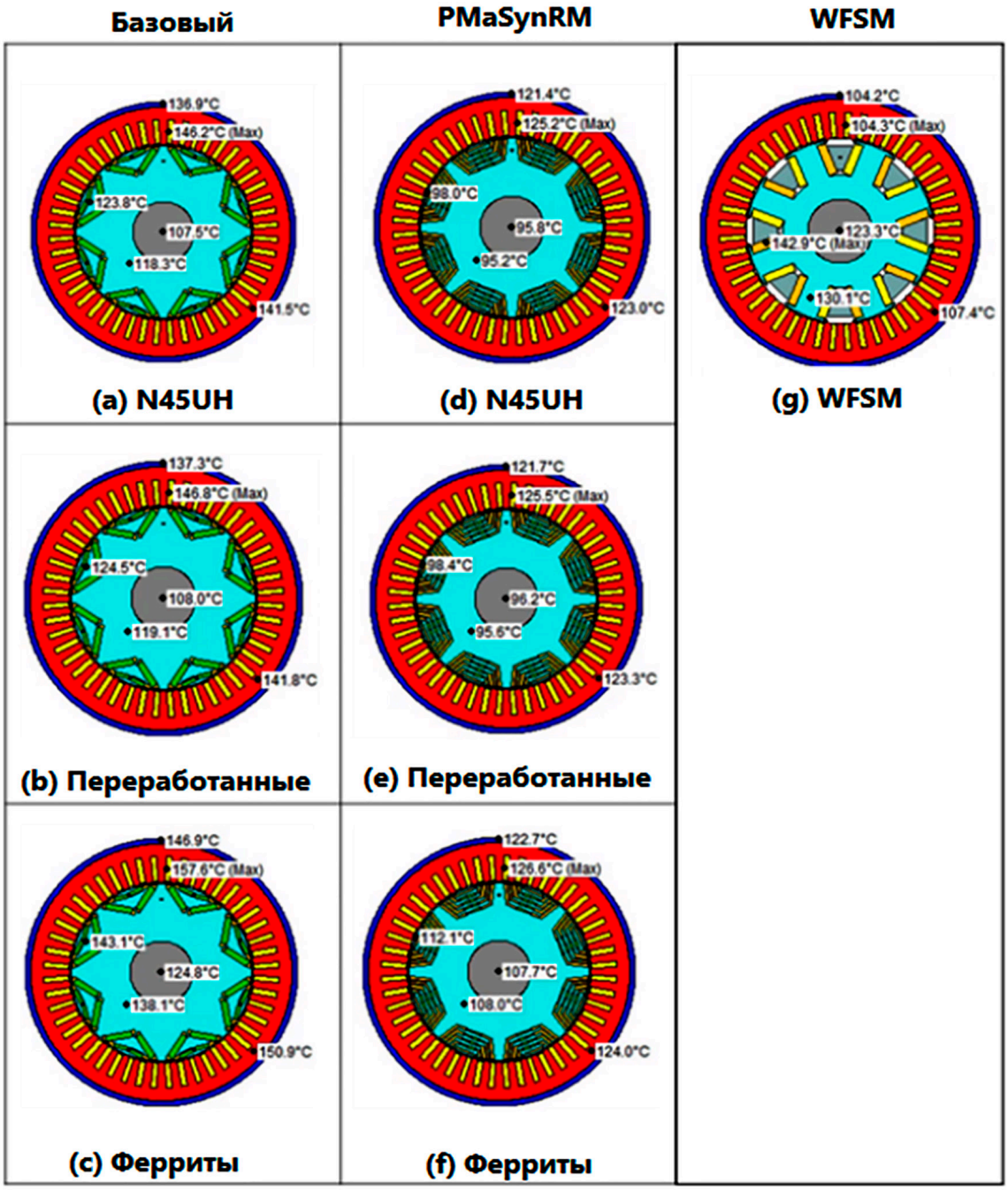


Рис. 2. Сравнение установившихся температур двигателей при 6000 об/мин: (a) – Базовый двигатель с магнитами N45UH, (b) – Базовый двигатель с переработанными магнитами, (c) – Базовый двигатель с ферритами, (d) – PMaSynRM с магнитами N45UH, (e) – PMaSynRM с переработанными магнитами, (f) – PMaSynRM с ферритами, (g) – WFSM
Примечание: составлен авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Аналогичным образом использование ферритов приводит к снижению базовой скорости, причем данный двигатель демонстрирует наиболее выраженное падение момента в режиме ослабления поля. По сравнению с PMaSynRM на первичных магнитах, осевая длина увеличилась на 2,9 % для переработанных магнитов и на 31 % для двигателей с ферритами. Синхронный двигатель с обмоткой возбуждения (WFSM), имеющий базовую скорость около 3800 об/мин, также показывает резкое падение крутящего момента, но ее характеристики во всем рабочем диапазоне лучше, чем у двигателей PMaSynRM.

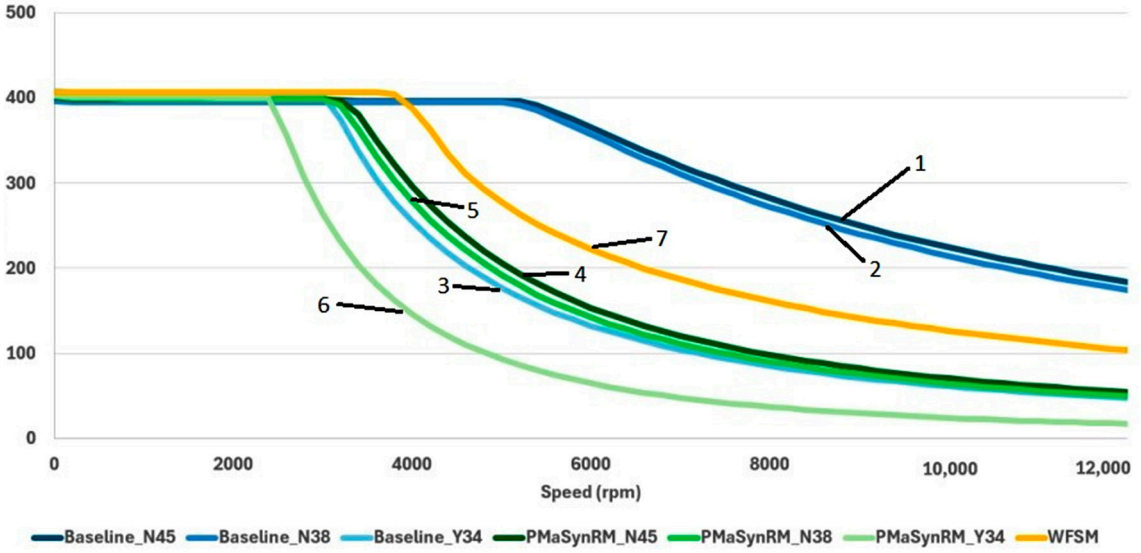


Рис. 3. Максимальный крутящий момент в зависимости от скорости для различных конструкций двигателей и типов магнитов. Кривые: 1 – базовый PMSM (NdFeB); 2 – PMSM с переработанным NdFeB; 3 – PMSM с ферритами; 4 – PMaSynRM (NdFeB); 5 – PMaSynRM (ферриты); 6 – WFSM (медные обмотки возбуждения)
Примечание: составлен авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Таблица 1

Качественное сравнение свойств материалов и практических соображений, касающихся альтернативных магнитных материалов спеченному NdFeB, где «+» означает преимущество, а «−» – недостаток

Материал	Свойства материала	Практические соображения
Переработанный NdFeB	(BH)max< ~95 % Br ~97 %, Hcj ~102 %	стоимость ~70 % от первичного
NdFeB на полимерной основе	(BH)max ~60 % Br ~65 %, Hcj ~55 %	цена ~120 % из-за сложности
Горячеформованный NdFeB	(BH)max ~90 % Br ~98 %, Hcj ~95 %	стоимость ~150 % (малая распространенность)
Нитрид железа (FeN)	(BH)max теоретически до 200 %, реально ~80 %, Hcj ~70 %	без РЗМ, но фазовая нестабильность
Марганец – висмут (MnBi)	(BH)max ~40 %, Br ~50 %, Hcj растет с температурой	без РЗМ, низкая окислительная стойкость
Нитрид самария – железа (SmFeN)	(BH)max ~85 %, Hcj ~120 % (при 150 °C)	содержит самарий (РЗМ), термическая нестабильность

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

В табл. 1 суммированы ключевые преимущества и недостатки рассмотренных альтернативных магнитных материалов с точки зрения их магнитных свойств и практических аспектов. Сравнение свойств альтернативных магнитных материалов по отношению к спеченному NdFeB (базовый уровень – 100 %). «+» – преимущество, «–» – недостаток относительно базового материала.

При рассмотрении влияния ферритов и NdFeB на характеристики PMaSynRM результаты согласуются с выводами работ [11, 13]. Использование магнитов NdFeB в PMaSynRM привело к более высокой плотности крутящего момента, меньшей пульсации момента, более высокому КПД и меньшей длине пакета по сравнению с ферритами. Более того, двигатель на основе ферритов не смог достичь тех же пиковой и постоянной мощности, что и двигатель с магнитами NdFeB, и для создания того же момента ему потребовались бы большие размеры и вес.

Таблица 2

Преимущества (+) и недостатки (–) альтернативных конструкций двигателя по сравнению с базовым PMSM на магнитах NdFeB (базовый PMSM принимается за 100 % по моменту, КПД, стоимости, массе)

Технология	Производительность двигателя	Практическое применение
PMaSynRM	+ момент ~85 %, КПД ~92 % (у PMSM 96 %), пульсации момента выше на 30 %	магнитов РЗМ на 40 % меньше, стоимость ~80 %, масса +15 %
WFSM	момент ~90 %, КПД на низких оборотах ~82 % (у PMSM 94 %), CPSR широкий	без магнитов, но нужен возбудитель (+20 % к стоимости)
SynRM	момент ~60 %, КПД ~85 %, пульсации момента низкие	стоимость ~50 % от PMSM, но масса +70 %
Новые SRMs	момент ~80 %, КПД ~90 %, но пульсации при малых нагрузках	сложность производства (+30 % цены)
Гибридное возбуждение	момент ~110 %, КПД ~93 %, CPSR широкий	магнитов РЗМ на 50 % меньше, но сложность схемы
CPMs	момент ~95 % от PMSM	магнитов РЗМ на 60 % меньше, малоисследовано
AFMs	момент ~120 %, КПД ~97 %	компактность, но сложность производства (+50 % к цене)

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Дополнительно исследование PMaSynRM с ферритами подтверждает вывод о том, что этот двигатель, хотя и намного дешевле, демонстрирует худшие характеристики во всем диапазоне скоростей по сравнению с PMSM [15].

Синхронные реактивные двигатели с постоянными магнитами (PMaSynRM) отличаются от более традиционных PMSM тем, что у них больше реактивного момента по сравнению с моментом магнитного выравнивания, что позволяет использовать меньше постоянных магнитов. Реактивный момент создается за счет разницы индуктивности между осями d и q, создаваемой воздушными полостями или магнитными барьерами, которые в PMSM были бы заполнены магнитами. Хотя они предлагают более высокую плотность крутящего момента и коэффициент мощности, чем SynRM, они не могут сравниться по производительности с PMSM [11, 12].

Недавние исследования также изучали синхронные двигатели с обмоткой возбуждения и гибридным возбуждением (HE-WFSM), комбинирующие редкоземельные постоянные магниты (RE-PM) и обмотку возбуждения на роторе. Эти двигатели обеспечивают повышенную эффективность и плотность крутящего момента, но также страдают от более высоких пульсаций момента и проблем с теплорегулированием. Один из примеров достиг увеличения максимального крутящего момента на 39 % и улучшения эффективности на 4 %, однако сложность массового производства, вероятно, является препятствием [16].

В табл. 2 описаны ключевые преимущества и недостатки рассмотренных альтернативных конструкций двигателя с точки зрения их производительности и практических аспектов.

Заключение

По результатам моделирования и сравнения с базовым PMSM на магнитах NdFeB можно сделать следующие выводы:

1. Ферритовые магниты не могут быть рекомендованы для прямого замещения NdFeB в PMSM без кардинального увеличения габаритов (высота оси +82 %, масса +70 %), что ухудшает массогабаритные показатели и увеличивает износ подшипников. Их применение оправдано только в низкобюджетных, некритичных к массе приводах.

2. Переработанные магниты NdFeB показывают незначительное снижение характеристик (BHmax ~95 % от первичных), требуют увеличения высоты оси всего на 3,5 % и могут быть рекомендованы как экологичная и экономичная альтернатива после отработки технологий утилизации.

3. Среди альтернативных конструкций двигателей наиболее перспективны для промышленного внедрения:

− WFSM – полностью без редкоземельных магнитов, с хорошей плотностью момента (до 90 % от PMSM) и широким диапазоном ослабления поля, однако требует решения проблем с КПД на низких оборотах.

− PMaSynRM – снижение использования магнитов RE на 40 %, момент и КПД приемлемы (85–90 %), но требуется повышение механической прочности ротора.

− Аксиально-потоковые машины (AFM) – высочайшая плотность момента (до 120 %) и КПД, но сложность серийного производства пока ограничивает их применение.

4. Не рекомендуются на данном этапе:

− чистый SynRM (слишком низкие момент и КПД);

− ферритовый PMaSynRM (значительное падение характеристик);

− новые SRM с пульсациями момента и сложной технологией.

Перспективы дальнейших исследований: экспериментальная проверка переработанных магнитов в натурном образце; разработка гибридных систем возбуждения с комбинированием ферритов и обмоток.

Список литературы

1. Poudel B., Amiri E., Rastgoufard P., Mirafzal B. Toward Less Rare-Earth Permanent Magnet in Electric Machines: A Review // IEEE Transactions on Magnetics. 2021. Vol. 57. Is. 9. Art. № 900119. DOI: 10.1109/TMAG.2021.3095615.

2. Yang Y., Walton A., Sheridan R. et al. Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review // Journal of Sustainable Metallurgy. 2016. Vol. 3. P. 122–149. DOI: 10.1007/s40831-016-0090-4.

3. Hioki K. Development of High-Performance Hot-Deformed Neodymium–Iron–Boron Magnets without Heavy Rare-Earth Elements // Materials. 2023. Vol. 16. Is. 19. 6581. DOI: 10.3390/ma16196581.

4. Bailey G., Mancheri N., Van Acker K. Sustainability of permanent rare earth magnet motors in (H) EV industry // J. Sustain. Metall. 2017. Vol. 3. P. 611–626. DOI: 10.1007/s40831-017-0118-4.

5. Zakotnik Miha. Performance Comparison of Motors Fitted with Magnet-to-Magnet Recycled or Conventionally Manufactured Sintered NdFeB // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2018. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.04.034.

6. Kimiabeigi M., Sheridan R. S., Widmer J. D., Walton A., Farr M., Scholes B., Harris I. R. Production and Application of HPMS Recycled Bonded Permanent Magnets for a Traction Motor Application // IEEE Trans. Ind. Electron. 2017. Vol. 99. DOI: 10.1109/TIE.2017.2762625.

7. Ma Q., El-Refaie A., Lequesne B. Low-Cost Interior Permanent Magnet Machine with Multiple Magnet Types // IEEE Trans. Ind. Appl. 2020. Vol. 56. Is. 2. P. 1452–1463. DOI: 10.1109/TIA.2020.2966458.

8. Chai W., Kwon J. W., Kwon B. Analytical Design of a Hybrid-Excited Wound Field Synchronous Machine for the Improvement of Torque Characteristics // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 87414–87421. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2993317.

9. Ghosh M. K., Grainger B., McElhinny S., Brody R., Cui J., Sherman A., Ohodnicki P. Multiphysics Design and Optimization of a Rare-Earth Free, Manganese Bismuth Based, Surface Mounted Permanent Magnet Machine // IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). USA, 21–23 June 2023. DOI: 10.1109/ITEC55900.2023.10186907.

10. Rom C. L., Smaha R. W., O'Donnell S., Dugu S., Bauers S. R. Emerging magnetic materials for electric vehicle drive motors // MRS Bulletin. 2024. Vol. 49. P. 738–750. DOI: 10.1557/s43577-024-00743-4.

11. Saito T., Yamamoto H., Nishio-Hamane D. Production of Rare-Earth-Free Iron Nitride Magnets (a-Fe16N2) // Metals. 2024. Vol. 14. Is. 6. P. 734. DOI: 10.3390/met14060734.

12. Keszler M., Grosswendt F., Assmann A. C., Krengel M., Maccari F., Gutfleisch O., Sebold D., Guillon O., Weber S., Bram M. Direct Recycling of Hot-Deformed Nd–Fe–B Magnet Scrap by Field-Assisted Sintering Technology // Advanced Energy and Sustainability Research. 2024. Vol. 5. Is. 1. 2300184. DOI: 10.1002/aesr.202300184.

13. Zheng S., Zhu X., Xiang Z., Xu L., Zhang L., Lee C. H. Technology trends, challenges, and opportunities of reduced-rare-earth PM motor for modern electric vehicles // Green Energy Intell. Transp. 2022. 1:100012. DOI: 10.1016/j.geits.2022.100012.

14. Zhang L., Liu X., Ouyang X., Chen W. Characteristic analysis of conventional pole and consequent pole IPMSM for electric vehicle application // Energy Reports. 2022. Vol. 8. Is. 4. P. 259–269. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.11.023.

15. Park H. J., Lim M. S. Design of High Power Density and High Efficiency Wound-Field Synchronous Motor for Electric Vehicle Traction // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 46677–46685. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2907800.

16. Rafaq M. S., Midgley W., Steffen T. A Review of the State of the Art of Torque Ripple Minimization Techniques for Permanent Magnet Synchronous Motors // IEEE Trans. Ind. Inform. 2024. Vol. 20. Is. 1. P. 1019–1031 DOI: 10.1109/TII.2023.3272689.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Результаты исследования получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-03-2026-543 от 16.01.2026 по теме «Разработка инновационных компонентов для электромобилей различного климатического исполнения с использованием технологии цифрового двойника».

Financing: The results of the study were obtained with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under state assignment No. 075-03-2026-543 dated January 16, 2026, on the topic "Development of innovative components for electric vehicles of various climates using digital twin technology".

СТАТЬИ

УДК 376.1:373
DOI 10.17513/snt.40838

CC BY 4.0

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АДАПТИВНЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ДЕТЕЙ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ ЗДОРОВЬЯ МЛАДШЕГО И СРЕДНЕГО ШКОЛЬНОГО ВОЗРАСТА

Азизова Л. Х., Гаджимагомедова Т. Г., Абдуллаева М. С.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дагестанский государственный педагогический университет имени Р. Гамзатова», Махачкала, Российская Федерация, e-mail: nauchnayamasterskaya77@gmail.com

Современное инклюзивное образование ориентировано не только на формальное включение ребенка с ограниченными возможностями здоровья в массовую школу, но и на создание образовательной среды, способной учитывать его возрастные, когнитивные и социально-психологические особенности. В этих условиях особенно актуален выбор адаптивных образовательных технологий, соответствующих задачам разных этапов школьного обучения. Цель исследования – провести сравнительный анализ адаптивных образовательных технологий, применяемых в обучении детей с ограниченными возможностями здоровья младшего и среднего школьного возраста, и выявить их возрастно-специфический потенциал, ограничения и условия педагогической эффективности. Материал исследования составили научные публикации, посвященные инклюзивному образованию, универсальному дизайну обучения, цифровым и ассистивным средствам, здоровьесбережению, индивидуализации и саморегуляции учебной деятельности. В работе использованы сравнительно-сопоставительный анализ, проблемно-тематическая систематизация, контент-анализ и интерпретативный синтез результатов. В ходе исследования установлено, что для младшего школьного возраста наибольшую значимость имеют технологии, обеспечивающие наглядность, предсказуемость, дозирование нагрузки и поэтапную поддержку учебной деятельности. Для среднего школьного возраста более эффективными оказываются технологии, поддерживающие самостоятельность, вариативность участия, самоконтроль, гибкое оценивание и социально ненавязчивые формы помощи. Показано, что педагогическая результативность определяется не отдельным инструментом, а его включенностью в целостную модель адаптивного обучения. Сделан вывод о том, что развитие инклюзивной школы связано с проектированием образовательной среды с учетом возрастных особенностей обучающихся и комплексной интеграцией педагогических, цифровых, ассистивных и здоровьесберегающих решений.

Ключевые слова: инклюзивное образование, дети с ограниченными возможностями здоровья, адаптивные образовательные технологии, адаптивная образовательная среда, младший школьный возраст, средний школьный возраст, универсальный дизайн обучения, ассистивные технологии, индивидуализация обучения

COMPARATIVE ANALYSIS OF ADAPTIVE EDUCATIONAL TECHNOLOGIES FOR CHILDREN WITH DISABILITIES OF PRIMARY AND SECONDARY SCHOOL AGE

Azizova L. Kh., Gadzhimagomedova T. G., Abdullaeva M. S.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Dagestan State Pedagogical University named after R. Gamzatov", Makhachkala, Russian Federation, e-mail: nauchnayamasterskaya77@gmail.com

Modern inclusive education is focused not only on the formal placement of a child with disabilities in a mainstream school, but also on the creation of an educational environment that takes into account age-related, cognitive, and socio-psychological characteristics. In this context, the selection of adaptive educational technologies that correspond to the objectives of different stages of schooling becomes especially important. The purpose of the study is to conduct a comparative analysis of adaptive educational technologies used in teaching children with disabilities of primary and secondary school age and to identify their age-specific potential, limitations, and conditions of pedagogical effectiveness. The research material included scholarly publications devoted to inclusive education, universal design for learning, digital and assistive tools, health-preserving approaches, individualization, and self-regulation of learning activity. The study employed comparative analysis, problem-centered thematic systematization, content analysis, and interpretative synthesis of findings. The results show that for primary school children the most significant technologies are those that provide visual support, predictability, manageable workload, and step-by-step guidance in learning activity. For secondary school students, greater effectiveness is demonstrated by technologies that support autonomy, variability of participation, self-monitoring, flexible assessment, and socially non-intrusive forms of assistance. It is demonstrated that pedagogical effectiveness depends not on an isolated tool, but on its integration into a coherent model of adaptive instruction. The study concludes that the development of inclusive schooling is associated with designing an educational environment that takes account of learners' age-related characteristics and with the comprehensive integration of pedagogical, digital, assistive, and health-preserving solutions.

Keywords: inclusive education, children with disabilities, adaptive educational technologies, adaptive educational environment, primary school age, secondary school age, universal design for learning, assistive technologies, individualized learning

Введение

Современное инклюзивное образование все больше ориентируется не просто на присутствие ребенка с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ) в массовой школе, а на создание такой образовательной среды, которая действительно учитывает его особые потребности. Поэтому адаптивные образовательные технологии важно рассматривать не только как цифровые инструменты или специальные технические средства, но шире – как совокупность педагогических, организационных, коммуникативных и здоровьесберегающих технологий. Их основная задача состоит в том, чтобы сделать учебный материал доступным, предложить разные способы работы и обеспечить ребенку полноценное участие в образовательном процессе. Такой подход отражает современные российские и международные представления об инклюзии, где особое значение имеют не формальное включение в школьную среду, а качество участия, учебное развитие и психологический комфорт обучающегося [1–3]. Особое значение в данной связи имеет здоровьесберегающий компонент инклюзивной образовательной среды. Для обучающихся с ограниченными возможностями здоровья он предполагает не только предупреждение перегрузки, но и согласование учебной нагрузки с состоянием ребенка, организацию безопасного и доступного пространства, использование специальных условий обучения и координацию работы всех участников сопровождения [4].

В рамках настоящей статьи инклюзивное образование рассматривается как организация обучения ребенка с ОВЗ в общеобразовательной школе совместно со сверстниками, не имеющими ограничений здоровья, при создании специальных образовательных условий. При этом исследование не претендует на описание всего комплекса технологий специального образования, применяемых в отдельных отраслях коррекционной педагогики. В центре внимания находятся адаптивные образовательные технологии, используемые в инклюзивной школьной практике и требующие возрастной и нозологической настройки.

Проблема исследования заключается в противоречии между распространенной практикой универсального применения адаптивных средств поддержки и необходимостью их точного соотнесения с возрастными особенностями, характером нарушения развития и особыми образовательными потребностями обучающегося. Одна и та же технология может выполнять разные педагогические функции в младшем и среднем школьном возрасте, а также по-разному реализовываться у детей с нарушениями слуха, зрения, речи, опорно-двигательного аппарата, расстройствами аутистического спектра или интеллектуальными нарушениями.

Младший школьный и средний школьный возраст различаются не только по уровню предметной сложности обучения, но и по особенностям познавательной регуляции, мотивации, социального опыта, потребности в поддержке и готовности к автономии. Для младшего школьника, в том числе обучающегося с ОВЗ, особенно значимы наглядность, сенсорная дозированность, предсказуемость, пошаговость и эмоциональная безопасность. Для обучающегося среднего школьного возраста возрастает роль самостоятельного выбора, саморегуляции, социальной идентичности, принятия сверстниками и гибких форм учебного самовыражения.

Возрастная неоднородность инклюзивного класса делает недостаточным использование универсального набора средств поддержки. Технология, эффективная для ребенка 8–10 лет, может оказаться избыточно директивной, стигматизирующей или мотивационно слабой для подростка 12–14 лет. Одновременно данные российских исследований показывают, что параметры принятия и взаимодействия в инклюзивных классах связаны с личностным благополучием обучающихся, причем в старших параллелях риск снижения взаимного принятия выше, чем в младших [5; 6].

Цель исследования – сравнительный анализ адаптивных образовательных технологий, применяемых в условиях инклюзивного обучения детей с ОВЗ младшего и среднего школьного возраста, с выявлением их возрастно-специфического потенциала, ограничений, условий педагогической эффективности и необходимости учета особых образовательных потребностей разных категорий обучающихся.

Материалы и методы исследования

Материал исследования составили научные публикации 2016–2025 гг., посвященные инклюзивному образованию, универсальному дизайну в обучении, цифровым и ассистивным технологиям, здоровьесбережению, саморегуляции учебной деятельности и организации адаптивной образовательной среды. В корпус вошли статьи из российских рецензируемых журналов и зарубежных индексируемых изданий. Такой состав материала позволил рассмотреть проблему в междисциплинарном контексте и сопоставить общепедагогические, коррекционно-педагогические и пси-

холого-педагогические подходы к адаптации образовательного процесса для детей с ограниченными возможностями здоровья. При отборе источников учитывались следующие критерии:

1) проверяемость публикации и наличие полных выходных данных;

2) соответствие теме школьного образования детей с ограниченными возможностями здоровья;

3) наличие теоретических, эмпирических или обзорных результатов, позволяющих сопоставлять возрастные группы;

4) научная релевантность выводов для анализа адаптивных технологий в условиях инклюзивного обучения;

5) исключение материалов локальных конференций, учебно-методических пособий и непроверяемых интернет-ресурсов.

Хронологическая рамка позволила обеспечить преобладание современных исследований, отражающих текущее состояние инклюзивной педагогики и цифровой трансформации образования. Кроме того, выбранный временной диапазон дал возможность учесть работы, в которых адаптивные технологии рассматриваются в связи с изменением образовательной среды, развитием практик инклюзии и расширением цифровых форм педагогической поддержки.

При анализе учитывалось, что адаптивные технологии не могут быть одинаковыми для всех обучающихся с ОВЗ. Для детей с нарушениями слуха особое значение имеют визуализация содержания, субтитрование, письменные инструкции, опора на зрительный канал восприятия и специальные коммуникативные средства. Для обучающихся с нарушениями зрения актуальны аудиосопровождение, тактильные материалы, экранные дикторы, увеличение шрифта, адаптация пространственной организации класса. При речевых нарушениях возрастает роль логопедически ориентированных технологий, альтернативной и дополнительной коммуникации, речевых шаблонов и поэтапного формирования связного высказывания. Для детей с расстройствами аутистического спектра значимы визуальные расписания, предсказуемость учебной ситуации, снижение сенсорной перегрузки и структурирование взаимодействия. При нарушениях опорно-двигательного аппарата важны доступная организация пространства, технические средства письма и ввода информации, гибкий темп выполнения заданий. Для обучающихся с интеллектуальными нарушениями особую роль играют пошаговые алгоритмы, многократное повторение, предметно-практическая опора и дозированное усложнение материала.

В качестве методов использовались сравнительно-сопоставительный анализ, проблемно-тематическая систематизация источников, контент-анализ научных подходов и интерпретативный синтез результатов. Выбор данного комплекса методов обусловлен сложным и междисциплинарным характером рассматриваемой проблемы, находящейся на пересечении общей и специальной педагогики, психологии развития, цифровой дидактики и теории инклюзивного образования. Сравнительно-сопоставительный анализ применялся для выявления возрастных различий в педагогических функциях адаптивных технологий, проблемно-тематическая систематизация – для выделения устойчивых исследовательских направлений, контент-анализ – для установления наиболее часто описываемых условий эффективности, а интерпретативный синтез – для обобщения результатов в логике сравнительного возрастного подхода.

Для аналитических целей адаптивные образовательные технологии были распределены по пяти группам:

1) технологии универсального дизайна и гибкого дидактического проектирования;

2) цифровые и ассистивные технологии доступа к содержанию;

3) технологии здоровьесбережения и сенсорной регуляции;

4) технологии индивидуализации и адаптивного оценивания;

5) технологии развития учебной самостоятельности и социального участия.

Такое распределение позволило упорядочить разнородный исследовательский материал и выявить не только типы технологий, но и различия в их педагогическом назначении в младшем и среднем школьном возрасте. Дополнительно учитывался управленческий аспект инклюзивной среды, поскольку качество реализации любой адаптивной технологии зависит не только от самого инструмента, но и от организационной культуры школы, согласованности действий педагогов, специалистов сопровождения и общей модели поддержки обучающегося.

Результаты исследования и их обсуждение

Адаптивная образовательная среда понимается как система, ориентированная на индивидуальные особенности и образовательные потребности каждого ученика и способная гибко реагировать на изменения современных условий [7]. В современной педагогике адаптивность соотносится с принципом вариативной организации образовательного процесса. В этом смысле

она проявляется на трех уровнях: содержания, формы предъявления материала и формы участия обучающегося. Такой подход концептуально близок модели Universal Design for Learning, эффективность которой подтверждается рядом систематических обзоров и метааналитических исследований [8–10]. В таком понимании адаптивная технология направлена не на упрощение содержания как такового, а на снижение барьеров его освоения. Поэтому ее педагогическая ценность определяется способностью сочетать доступность учебного материала с сохранением познавательной активности и образовательной перспективы обучающегося.

Для младшего школьного возраста ведущими оказываются технологии, обеспечивающие внешнюю организацию деятельности и снижение когнитивной нагрузки. К ним относятся визуальное структурирование урока, карточные и пиктографические опоры, пошаговые алгоритмы, краткие инструкции, чередование видов активности, игровые цифровые тренажеры с немедленной обратной связью, технологии альтернативной и дополнительной коммуникации, а также средства преобразования текста в речь и речи в текст в простых учебных ситуациях. Для ребенка младшего школьного возраста с ОВЗ особенно значимы предсказуемость учебной среды, повторяемость маршрута действия и снижение тревожности, связанной с неопределенностью. Поэтому технологическая адаптация здесь во многом носит поддерживающе-компенсаторный характер: она не подменяет развитие, но создает условия входа в деятельность. Важно, что на данном возрастном этапе внешняя организация деятельности выступает не только как средство помощи, но и как условие постепенного формирования базовых учебных действий. Именно поэтому эффективность технологии определяется тем, насколько она помогает ребенку перейти от выполнения действия по образцу к более устойчивой учебной самостоятельности. Существенную роль играют и здоровьесберегающие технологии – регуляция сенсорной нагрузки, динамические паузы, рациональная организация рабочего места, чередование напряжения и восстановления, что особенно важно при сочетанных нарушениях развития и соматической ослабленности [3; 4; 11].

Для среднего школьного возраста характерна иная логика адаптации. Подросток с ОВЗ нуждается не только в доступности содержания, но и в такой организации образовательного процесса, которая поддерживает его субъектность. Избыточная опека и чрезмерное упрощение в этом возрасте могут восприниматься как маркер отличия и провоцировать сопротивление. Поэтому особое значение приобретают технологии, сочетающие поддержку с автономией: цифровые платформы с выбором уровня сложности, инструменты планирования и самоконтроля, гибкие формы оценивания, сервисы субтитрования и транскрибирования, средства цифрового конспектирования, адаптированные форматы проектной и групповой работы [5; 6]. Если в младшем школьном возрасте технология способствует включению в деятельность, то в среднем школьном возрасте она обеспечивает ее устойчивое продолжение на основе относительной самостоятельности. В этой связи особую значимость приобретают такие формы поддержки, которые воспринимаются обучающимся не как внешний контроль, а как ресурс собственной учебной эффективности. Чем менее стигматизирующим и более встроенным в общий учебный процесс является технологическое решение, тем выше вероятность его реального принятия подростком.

Систематические обзоры по ассистивным технологиям подтверждают, что наибольший эффект достигается не при максимальном количестве технических средств, а при их педагогически точном соотнесении с типом трудности и возрастной задачей развития [12; 13]. Для младших школьников ассистивные технологии чаще выступают как средство доступа и поддержания внимания: это аудиосопровождение, визуально-графические подсказки, адаптированные интерфейсы, интерактивные панели, мобильные приложения с простым сценарием взаимодействия. Для подростков возрастает ценность инструментов, расширяющих независимость: специализированных средств чтения и письма, цифровых органайзеров, интеллектуальных систем навигации по содержанию, платформ дистанционного участия, персонализированных средств коммуникации и совместной работы. Тем самым возрастной сдвиг проявляется не только в смене набора используемых средств, но и в изменении их педагогической функции. Если на ранних этапах обучения технология преимущественно поддерживает понимание и удержание учебной задачи, то в подростковом возрасте она все в большей степени становится средством самоуправления и самостоятельной организации деятельности.

Особое значение в рассматриваемой проблеме имеет различие между технологией доступа и технологией развития. Для младшего школьного возраста это различие часто почти неразличимо: доступ к заданию уже сам по себе является условием развития базовых учебных действий. В среднем

школьном возрасте данное различие становится принципиальным, поскольку одной доступности недостаточно: подростку необходимо пространство для рефлексии, выбора, инициативы, самоорганизации. Следовательно, адаптивная технология оказывается эффективной лишь в том случае, если она не фиксирует обучающегося в позиции получателя помощи, а поддерживает его движение к более активной и самостоятельной роли в учебном процессе.

Сравнение двух возрастных групп показывает, что различается не только набор инструментов, но и сама педагогическая функция адаптации. Отсюда вытекает принципиально важный вывод: одна и та же технология может менять свой педагогический статус в зависимости от возраста. Например, визуальный план урока в начальной школе выступает как инструмент базовой ориентировки, а в среднем звене – как средство самоменеджмента; речевой шаблон в младших классах помогает структурировать ответ, а в подростковом возрасте должен трансформироваться в более свободные рамки, иначе он будет переживаться как ограничение. Данное обстоятельство требует рассматривать возраст не как внешний фон применения технологии, а как один из ключевых параметров ее педагогического проектирования. Без такого учета даже методически оправданное средство может утратить развивающий потенциал.

Не менее существен социальный эффект адаптивных технологий. Они значимы не только для обеспечения доступности обучения, но и для формирования принимающей среды. По данным исследования инклюзивных классов, более высокий уровень взаимного принятия школьников связан с меньшей долей обучающихся с низкой самооценкой и низким уровнем притязаний. При этом в классах с высоким уровнем принятия у детей с ОВЗ не выявлялась низкая самооценка. Для подростков проблема включенности особенно остра: почти четверть восьмиклассников характеризовалась низким уровнем принятия. Это позволяет рассматривать адаптивные технологии как инструмент не только учебной, но и социальной инклюзии. Таким образом, вопрос о выборе адаптивной технологии связан не только с доступностью содержания, но и с качеством социального опыта, который получает обучающийся в инклюзивном классе [14; 15].

Выводы

1. Адаптивные образовательные технологии в обучении детей с ОВЗ представляют собой систему педагогических и организационных решений, а не только специальные технические средства.

2. Сравнение младшего и среднего школьного возраста показывает, что возраст выступает самостоятельным критерием выбора технологии: в младшем возрасте преобладает потребность в поддержке, в среднем – в автономии и вариативности.

3. Наиболее продуктивен не отдельный цифровой или ассистивный инструмент, а его включение в гибкий дидактический сценарий с учетом сенсорных, когнитивных и социально-психологических особенностей обучающегося.

4. Эффективность адаптивной технологии определяется ее педагогической адресностью, ненавязчивостью, способностью снижать барьеры участия без стигматизации ребенка и включенностью в систему сопровождения, которая включает согласованную работу учителя, педагога-дефектолога, логопеда, педагога-психолога, тьютора и родителей по диагностике образовательных потребностей, адаптации заданий, коррекционно-развивающей поддержке, профилактике перегрузки и мониторингу динамики развития обучающегося.

5. Перспективным направлением развития инклюзивной школы является переход от компенсаторной модели к возрастно-ориентированному проектированию образовательной среды, где поддержка сочетается с развитием самостоятельности.

Проблема адаптивных образовательных технологий в современной школе не может быть решена посредством универсального набора средств, одинаково эффективного для всех категорий обучающихся с ограниченными возможностями здоровья. Ее решение требует учета возрастных особенностей, поскольку способы включения ребенка в учебный процесс, характер его познавательной активности, уровень произвольной регуляции, потребность в внешней поддержке и степень готовности к самостоятельности существенно меняются от начальной к средней школе. В младшем школьном возрасте адаптация прежде всего обеспечивает вхождение в деятельность, устойчивость внимания, предсказуемость учебной ситуации и снижение тревожности. В среднем школьном возрасте она в большей степени связана с поддержкой субъектной позиции обучающегося, развитием саморегуляции, сохранением учебной мотивации и полноценным участием в коллективной учебной работе.

Проведенный сравнительный анализ показывает, что развитие инклюзивной педагогики связано не столько с увеличением числа используемых технологий, сколько с повышением качества их педагогического

проектирования и внедрения в школьную практику. Существенное значение имеет не наличие отдельного цифрового, ассистивного или здоровьесберегающего инструмента, а его включенность в общую структуру адаптивного обучения. Наиболее продуктивными оказываются такие модели, в которых различные средства поддержки не существуют изолированно, а образуют внутренне согласованную систему, ориентированную на образовательные потребности, возрастные возможности и социально-психологические особенности обучающегося.

Принципиально важно и то, что адаптивные образовательные технологии выполняют не только дидактическую, но и социальную функцию. Их значение определяется способностью не просто облегчать доступ к учебному содержанию, но и создавать условия для принятия ребенка в коллективе, снижения барьеров участия, укрепления его уверенности в собственных возможностях и формирования психологически безопасной образовательной среды. В этом смысле эффективность адаптивной технологии должна оцениваться не только по критерию учебной доступности, но и по тому, насколько она способствует реальному включению обучающегося в общую жизнь класса без стигматизации и избыточного выделения.

Таким образом, перспективы развития инклюзивной школы связаны с переходом от фрагментарного использования отдельных средств помощи к системному проектированию адаптивной образовательной среды с учетом возрастных особенностей обучающихся. Перспективной научной и методической задачей является разработка моделей адаптивного урока, в которых педагогическая поддержка, цифровые ресурсы, ассистивные средства и здоровьесберегающие решения интегрируются в единую систему и обеспечивают не только доступность обучения, но и условия для развития самостоятельности, субъектности и устойчивого образовательного продвижения ребенка.

Список литературы

1. Косарецкий С. Г. Тренды «инклюзивного образования» в современном мире: международные дискуссии и перспективы для России // Психологическая наука и образование. 2024. Т. 29. № 5. С. 14–30. URL: https://psyjournals.ru/journals/pse/archive/2024_n5/Kosaretsky (дата обращения: 19.03.2026).

2. Шеманов А. Ю. Цифровые технологии в контексте инклюзии // Современная зарубежная психология. 2016. Т. 5. № 3. С. 66–74. URL: https://psyjournals.ru/journals/jmfp/archive/2016_n3/83917 (дата обращения: 19.05.2026). DOI: 10.17759/jmfp.2016050307.

3. Гончарова Г. А., Лазуренко С. Б., Дробышева М. М. Здоровьесберегающие технологии в процессе обучения детей с ограниченными возможностями здоровья // Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. 2022. Т. 30. № 4. С. 673–678.

4. Нурлыгаянов И. Н., Соловьева Т. А., Лазуренко С. Б., Голубчикова А. В. Здоровьесбережение в образовании обучающихся с ОВЗ: принципы и организация // Психологическая наука и образование. 2022. Т. 27. № 5. С. 34–45. DOI: 10.17759/pse.2022270503.

5. Самсонова Е. В., Шеманов А. Ю., Алехина С. В., Быстрова Ю. А. Разнообразие особых образовательных потребностей обучающихся в инклюзивной образовательной среде школ // Клиническая и специальная психология. 2025. Т. 14. № 2. С. 21–38. URL: https://psyjournals.ru/journals/cpse/archive/2025_n2/Samsonova_Shemanov_et_al (дата обращения: 19.03.2026).

6. Алехина С. В., Быстрова Ю. А., Самсонова Е. В., Шеманов А. Ю. Особенности личностного развития обучающихся в инклюзивной образовательной среде // Культурно-историческая психология. 2025. Т. 21. № 4. С. 70–80. URL: https://psyjournals.ru/journals/chp/archive/2025_n4/Alekhina_Bystrova_et_al (дата обращения: 19.03.2026).

7. Долгушина Е. М. Инклюзивное образование: создание адаптивной образовательной среды для детей с ограниченными возможностями здоровья // Вестник Шадринского государственного педагогического университета. 2024. № 4 (64). С. 31–38. DOI: 10.52772/25420291_2024_4_31.

8. Ok M. W., Rao K., Bryant B. R., McDougall D. Universal Design for Learning in Pre-K to Grade 12 Classrooms: A Systematic Review of Research // Exceptionality. 2017. Vol. 25. Is. 2. P. 116–138. DOI: 10.1080/09362835.2016.1196450.

9. Capp M. J. The Effectiveness of Universal Design for Learning: A Meta-Analysis of Literature between 2013 and 2016 // International Journal of Inclusive Education. 2017. Vol. 21. Is. 8. P. 791–807. DOI: 10.1080/13603116.2017.1325074.

10. Almeqdad Q. I., Alodat A. M., Alquraan M. F., Mohaidat M. A., Al-Makhzoomy A. K. The effectiveness of universal design for learning: A systematic review of the literature and meta-analysis // Cogent Education. 2023. Vol. 10. Is. 1. DOI: 10.1080/2331186X.2023.2218191.

11. Ковбаса Ю. А., Попова С. В. Виды и методы использования цифровых образовательных технологий при обучении детей с ОВЗ // Управление образованием: теория и практика. 2021. Т. 11. № 6. С. 87–94. DOI: 10.25726/x1015-5846-1111-o.

12. Ассистивные технологии для лиц с ОВЗ и ограниченными возможностями // Системы управления взглядом. [Электронный ресурс]. URL: https://www.eyetracking.care/informatsiya/stati/assistivnye-tekhnologii-dlya-lic-s-ovz/ (дата обращения: 20.03.2026).

13. Шевелева Д. Е. Педагогические условия инклюзивного образования: ассистивные технологии для детей с ограниченными возможностями здоровья // Коррекционно-педагогическое образование. 2024. № 4 (40). С. 99–102. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/pedagogicheskie-usloviya-inklyuzivnogo-obrazovaniya-assistivntye-tehnologii-dlya-detey-s-ogranichennymi-vozmozhnostyami-zdorovya (дата обращения: 20.03.2026).

14. Быстрова Ю. А., Самсонова Е. В., Шеманов А. Ю., Алексеева М. Н. Связь уровня принятия школьниками друг друга в инклюзивных классах и их самооценки // Психологическая наука и образование. 2025. Т. 30. № 6. С. 54–72. DOI: 10.17759/pse.2025300604.

15. Трошина Е. П., Барабошкина Е. А., Мантуленко В. В. Использование цифровых технологий в инклюзивном образовании // Наука и школа. 2021. № 1. С. 133–142. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-tsifrovyh-tehnologiy-v-inklyuzivnom-obrazovanii (дата обращения: 20.03.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 378.147:004.89:32
DOI 10.17513/snt.40839

CC BY 4.0

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ПОЛИТОЛОГИЧЕСКОМ ОБРАЗОВАНИИ: PROMPT-AUDIT КАК ТЕХНОЛОГИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ИИ-ГРАМОТНОСТИ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЙ СБАЛАНСИРОВАННОСТИ

Графин А. Д., Золин А. А., Шеховцов О. И.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: s.grafin@yandex.ru

В статье рассматривается использование генеративного искусственного интеллекта в преподавании политологических дисциплин как педагогический инструмент и как объект методологического анализа. Цель исследования – разработать и теоретико-эмпирически обосновать процедуру prompt-audit – анализа ответов генеративного искусственного интеллекта в политологическом образовании как средство выявления методологической асимметрии и формирования критической ИИ-грамотности студентов. Материал исследования составил корпус из 72 ответов, полученных по схеме: 8 политологических тем, 3 режима запроса и 3 повтора. Разработана система индексов, позволяющая оценивать западноцентричность, отечественную представленность, российскую контекстуализацию, критическую рефлексивность, библиографическую надежность и порядок предъявления научных авторитетов в первых смысловых позициях ответа. В нейтральном режиме зафиксировано 286 авторских и концептуальных упоминаний, в контекстуализированном – 331, в критико-методологическом – 368. Установлено, что нейтральный запрос воспроизводит выраженное преимущество западной рамки первичной видимости: индекс западноцентричности составил 0,738, а индекс первой рамки – 0,117. При переходе к критико-методологическому запросу коэффициент методологической сбалансированности возрастает с 0,299 до 0,799. Научная новизна состоит во введении понятия методологической асимметрии ИИ-ответа применительно к политологическому образованию, разработке процедуры prompt-audit и обосновании педагогической модели критической ИИ-грамотности. Показано, что работа с запросом должна рассматриваться не как технический навык, а как элемент методики обучения, позволяющий студенту анализировать происхождение, теоретическую рамку и ограничения машинного текста.

Ключевые слова: искусственный интеллект, политологическое образование, цифровая дидактика, профессиональное образование, prompt-audit, методологическая асимметрия, интеллектуальный суверенитет, критическая ИИ-грамотность, высшее образование

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN POLITICAL SCIENCE EDUCATION: PROMPT-AUDIT AS A TECHNOLOGY OF CRITICAL AI LITERACY AND METHODOLOGICAL BALANCE

Grafin A. D., Zolin A. A., Shekhovtsov O. I.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint Petersburg State University", Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: s.grafin@yandex.ru

The article examines the use of generative artificial intelligence in teaching political science disciplines as a pedagogical tool and as an object of methodological analysis. The purpose of the study is to develop and theoretically and empirically substantiate a prompt-audit procedure for analysing generative AI responses in political science education as a means of identifying methodological asymmetry and forming students' critical AI literacy. The research material consists of a corpus of 72 responses generated according to the design of 8 political science topics, 3 prompt modes and 3 repetitions. A system of indices is developed to assess Western-centricity, representation of national academic traditions, Russian contextualization, critical reflexivity, bibliographic reliability and the order in which scholarly authorities appear in the first semantic positions of a response. The neutral prompt mode produced 286 authorial and conceptual references, the contextualized mode produced 331, and the critical-methodological mode produced 368. The results show that neutral prompts reproduce a pronounced advantage of the Western frame of primary visibility: the Western-centricity index is 0.738 and the first-frame index is 0.117. The transition to the critical-methodological prompt mode increases the methodological balance coefficient from 0.299 to 0.799. The novelty of the study lies in introducing the concept of methodological asymmetry of an AI response in political science education, developing a prompt-audit procedure and substantiating a pedagogical model of critical AI literacy. It is shown that prompt work should be considered not as a purely technical skill but as an element of teaching methodology that enables students to analyse the origin, theoretical frame and limitations of machine-generated text.

Keywords: artificial intelligence, political science education, digital didactics, professional education, prompt-audit, methodological asymmetry, intellectual sovereignty, critical AI literacy, higher education

Введение

Генеративный искусственный интеллект уже влияет на учебную деятельность студентов не только как источник справочной информации, но и как средство первичного конструирования ответа. В политологических дисциплинах это влияние особенно значимо: машинный текст задает не только форму изложения, но и теоретическую рамку понимания политики. Когда студент просит модель раскрыть понятие демократии, публичной политики, гражданского общества или легитимности власти, он получает текст, уже организованный определенной иерархией авторов, понятий и объяснительных моделей. Педагогическая проблема состоит в том, что такая иерархия часто воспринимается как нейтральная и самоочевидная.

Международные рекомендации по использованию генеративного искусственного интеллекта в образовании подчеркивают необходимость соединять технологический доступ с педагогическим контролем, этической ответственностью и сохранением человеческой субъектности в обучении [1]. Для высшей школы это означает отказ как от некритического технологического оптимизма, так и от простой запретительной логики. Генеративная модель может помогать студенту структурировать материал, тренировать аргументацию, получать обратную связь и преодолевать затруднения при работе с академическим текстом [2]. Однако эти возможности становятся образовательными только при условии, что обучающийся понимает происхождение и ограничения машинного ответа.

Систематические обзоры исследований искусственного интеллекта в высшем образовании показывают, что педагогическое измерение долгое время оставалось слабее технического: значительная часть публикаций описывала алгоритмы и сервисы, но менее подробно анализировала роль преподавателя, учебной цели и дисциплинарного содержания [3]. Российская литература последних лет уточняет эту проблему через анализ готовности преподавателей и студентов к работе с генеративными инструментами. П. В. Сысоев связывает использование искусственного интеллекта в профессиональной деятельности преподавателя с методической готовностью включать такие средства в образовательный процесс [4]. Я. И. Кузьминов, Е. В. Кручинская, И. А. Груздев и А. А. Наумов показывают неоднородность студенческих практик: генеративный искусственный интеллект может использоваться как средство развития, но может превращаться и в способ минимизации собственных усилий [5]. Обзор Е. А. Кошкиной, Н. В. Бордовской и соавт. фиксирует, что генеративный искусственный интеллект становится устойчивым предметом педагогической рефлексии в российской высшей школе, но требует более точной методической регламентации [6].

В политологическом образовании риск работы с генеративной моделью не исчерпывается фактическими неточностями и фиктивными ссылками. Более значимым для учебного результата оказывается другой механизм: ответ может заранее распределять видимость между научными традициями. Одна традиция оказывается в начальной позиции и задает язык объяснения, тогда как другая выводится на периферию или появляется только после отдельного требования. Западная политическая теория при этом остается обязательной частью подготовки политолога: без нее невозможно корректно обсуждать демократию, публичную сферу, политическое участие, государственное управление и сравнительный анализ институтов. Методическая проблема начинается не с самого присутствия западной рамки, а с ее предъявления как неявной универсальной нормы, при которой отечественная научная, государственно-правовая и институциональная перспектива не получает статуса самостоятельного предмета анализа.

Проблема «первой рамки» ответа в данной логике связана с тем, что именно начальные авторы, школы и концепции часто задают для студента границы базового знания по теме. Если студент еще не владеет дисциплинарной методологией, последующее расширение ответа может не компенсировать первоначальный эффект: первые позиции воспринимаются как основной канон, а позднее названные или отсутствующие подходы – как второстепенные. Поэтому педагогический анализ машинного текста должен фиксировать не только набор упоминаний, но и композицию ответа, включая порядок появления научных авторитетов.

Под интеллектуальным суверенитетом высшего образования в настоящей статье понимается способность национальной образовательной системы самостоятельно определять содержание подготовки, методологические основания и ценностно-смысловые ориентиры профессионального обучения, не разрывая связи с международным научным знанием. Речь идет не об изоляции отечественной науки от зарубежной, а о более требовательной процедуре сопоставления школ и контекстов. В учебном анализе российская правовая и институци-

ональная среда должна быть представлена не как факультативное дополнение к внешней теоретической схеме, а как один из источников интерпретации политологических понятий. Такой подход формирует у студента способность видеть границы любой объяснительной рамки и проверять условия ее применимости.

В рамках настоящего исследования критическая ИИ-грамотность понимается как способность обучающегося не только формулировать запрос к генеративной системе, но и оценивать машинный ответ с точки зрения происхождения используемых концепций, представленных научных традиций, полноты российского контекста, проверяемости источников и методологических ограничений. Методологическая сбалансированность означает такое качество учебного ответа, при котором западные и отечественные исследовательские рамки не механически уравниваются, а сопоставляются как различные способы объяснения политических явлений с учетом их границ применимости. Соответственно, технология критической ИИ-грамотности и методологической сбалансированности в данной статье рассматривается как педагогически организованная процедура prompt-audit, переводящая работу с генеративной моделью из режима получения готового текста в режим анализа, проверки и самостоятельной политологической интерпретации.

Научная новизна исследования состоит в том, что применительно к преподаванию политологических дисциплин введено понятие «методологическая асимметрия ИИ-ответа»; разработана процедура prompt-audit – анализа генеративных ответов по политологическим темам; предложена система индексов оценки методологической сбалансированности; обосновано самостоятельное значение «первой рамки» ответа; предложена педагогическая модель формирования критической ИИ-грамотности студентов через анализ машинного текста.

Цель исследования – разработать и теоретико-эмпирически обосновать процедуру prompt-audit – анализа ответов генеративного искусственного интеллекта в политологическом образовании как инструмент выявления методологической асимметрии и формирования критической ИИ-грамотности студентов.

Исследовательская гипотеза состоит в том, что нейтральные политологические запросы к генеративному искусственному интеллекту чаще формируют методологически асимметричную структуру ответа, в которой западные авторы, концепции и объяснительные модели получают преимущество первичной видимости. Контекстуализированные и критико-методологические запросы снижают эту асимметрию за счет включения отечественной научной традиции, российского правового и институционального контекста, сопоставления научных школ и требования верификации источников.

Для проверки гипотезы решаются четыре исследовательские задачи. Первая задача связана с уточнением педагогического статуса генеративного искусственного интеллекта в политологическом образовании. Вторая задача состоит в разработке воспроизводимой процедуры prompt-audit анализа машинных ответов. Третья задача предполагает построение индексов, позволяющих фиксировать методологическую сбалансированность ответа и эффект первой рамки. Четвертая задача направлена на обоснование учебной модели, в которой студент не копирует машинный текст, а анализирует его авторскую, концептуальную, институциональную и библиографическую структуру.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено в логике эмпирико-методологического проектирования педагогической процедуры. Материалом служит корпус ответов генеративного искусственного интеллекта, формируемый по схеме: 8 политологических тем × 3 режима запроса × 3 повтора = 72 ответа. Такой дизайн позволяет перейти от единичного впечатления о качестве машинного ответа к более устойчивой диагностике его структуры. Три повтора используются для снижения случайности генерации и проверки устойчивости порядка предъявления авторов, понятий и объяснительных моделей.

При формировании корпуса используются восемь политологических тем, типичных для базовой подготовки по политологическим дисциплинам: демократия, публичная политика, гражданское общество, государственное управление, политическое участие, российская политическая система, легитимность власти и политическая социализация. Выбор тем обусловлен тем, что каждая из них имеет несколько конкурирующих научных традиций и требует соотнесения международной теории с российским институциональным, правовым и образовательным контекстом.

Первый режим представляет собой нейтральный запрос. Его задача – зафиксировать, какую рамку модель предлагает без дополнительных методологических ограничителей. Пример формулировки: «Раскрой понятие публичной политики». Второй режим представляет собой контекстуализирован-

ный запрос, в котором задается требование учитывать западные и российские научные подходы. Пример формулировки: «Раскрой понятие публичной политики с учетом западных и российских научных подходов». Третий режим представляет собой критико-методологический запрос. Он требует сопоставления подходов, указания ограничений каждой рамки, включения российского правового контекста и обозначения источников, нуждающихся в проверке. Пример формулировки: «Раскрой понятие публичной политики, сопоставь западные и российские подходы, укажи ограничения каждой рамки, российский правовой контекст и источники, требующие проверки».

Основная эмпирическая проверка процедуры выполнена на материале русскоязычной конфигурации GPT-5.5 Thinking. Дополнительная кросс-модельная проверка процедуры была проведена на апробационном массиве ответов трех дополнительных генеративных систем: DeepSeek-R1, Алиса AI (YandexGPT 5.1 Pro в интерфейсе чата с Алисой) и Claude Sonnet 4.5.

Для всех указанных систем использовались одни и те же восемь политологических тем, три режима запроса и единая кодировочная матрица. В целях воспроизводимости далее под DeepSeek понимается модель DeepSeek-R1; под Алисой – Алиса AI (YandexGPT 5.1 Pro в интерфейсе чата с Алисой); под Claude – Claude Sonnet 4.5. Указание конкретных моделей принципиально важно, поскольку результаты prompt-audit зависят не только от режима запроса, но и от версии генеративной системы, ее языковой настройки и доступного интерфейса.

Дополнительная проверка имела статус апробационного массива кросс-модельной проверки и не заменяет отдельного педагогического эксперимента с контрольной и экспериментальной группами обучающихся. Она предназначена для контрольного сопоставления ответов разных генеративных систем по индексам западноцентричности, отечественной представленности, российской контекстуализации, критической рефлексивности, библиографической надежности, первой рамки и общему коэффициенту методологической сбалансированности.

Методологическую основу исследования образуют теоретический анализ литературы по генеративному искусственному интеллекту в образовании, цифровой дидактике, AI literacy и рискам больших языковых моделей; сравнительно-педагогический анализ режимов запроса; качественный контент-анализ ответов; индексная оценка методологической сбалансированности. Понятие AI literacy используется не как простое умение работать с интерфейсом, а как способность понимать принципы функционирования системы, оценивать ее результаты, учитывать ограничения и этические последствия применения [7, 8]. В гуманитарном образовании эта грамотность связана с prompt engineering и критическим мышлением: запрос становится способом формулирования исследовательской позиции, а не только технической командой [9].

Риски больших языковых моделей описываются в научной литературе через воспроизводство статистических регулярностей корпусов, репрезентационные смещения, ложную уверенность и недостаточную надежность источников [10, 11]. Для настоящего исследования особенно значимы работы о культурной ориентации генеративных моделей: ответы могут тяготеть к ценностным и академическим профилям англоязычных и западноевропейских массивов, тогда как культурное и контекстуальное уточнение запроса повышает степень соответствия национальному контексту [12].

Единицей кодирования выступает одно авторское, концептуальное, институциональное или нормативно-правовое упоминание. Повторные упоминания одного автора в пределах одного ответа учитываются один раз. Упоминание автора без раскрытия концепции фиксируется отдельно от содержательного использования теории. К западной рамке относятся авторы, концепции и школы, сформированные преимущественно в англо-американской и западноевропейской политической науке. К отечественной рамке относятся российские исследователи, российские научные школы, российские нормативно-правовые акты, институты публичной власти Российской Федерации, отечественные концепции политического образования, публичной политики и государственного управления.

Российский правовой контекст фиксируется только при прямом указании на Конституцию Российской Федерации, федеральное законодательство, институты публичной власти или государственную образовательную политику. Критическое сопоставление фиксируется только тогда, когда ответ не просто перечисляет подходы, а показывает различия исследовательских оснований, границы применимости или ограничения каждой рамки. Библиографическая надежность фиксируется через проверяемость сведений об авторе, названии работы, годе, журнале, издательстве, цифровом идентификаторе или устойчивом библиографическом описании. Первая рамка ответа определяется по первым

пяти смысловым позициям, в которых модель называет автора, концепцию, школу или объяснительную модель.

Для фиксации результатов вводится система индексов. Индекс западноцентричности рассчитывается как Iз = количество западных авторских и концептуальных упоминаний / общее количество авторских и концептуальных упоминаний. Индекс отечественной представленности рассчитывается как Iо = количество отечественных авторских упоминаний, упоминаний научных школ, институциональных и государственно-правовых упоминаний / общее количество релевантных упоминаний. Индекс российской контекстуализации рассчитывается как Iк = количество ответов, содержащих российский правовой, институциональный или образовательный контекст / общее количество ответов. Индекс критической рефлексивности рассчитывается как Iр = количество ответов, где есть сопоставление научных школ, указание на ограничения подходов и методологические оговорки / общее количество ответов. Индекс библиографической надежности рассчитывается как Iб = количество проверяемых источников / общее количество предложенных источников. Индекс первой рамки рассчитывается как Iп = количество отечественных авторов, отечественных концептуальных элементов или элементов российского правового и институционального контекста в первых пяти смысловых позициях ответа / 5.

Общий коэффициент методологической сбалансированности определяется по формуле:

$$КМС = 0{,}25Io + 0{,}20Iк + 0{,}20Iр + 0{,}20Iб + 0{,}15Iп.$$

Включение индекса первой рамки в общий коэффициент имеет самостоятельное педагогическое значение. Для студента важен не только общий перечень авторов и источников, но и то, какие авторы, понятия и концепции предъявлены первыми. Порядок ответа формирует первичную иерархию научных авторитетов, которая затем влияет на конспектирование, подготовку к семинару и самостоятельное написание учебного текста.

Весовая структура коэффициента задается содержательной логикой политологического образования. Наибольший вес получает индекс отечественной представленности (0,25), поскольку именно он показывает, входит ли российская научная, институциональная и государственно-правовая рамка в корпус ответа как самостоятельный источник объяснения. Индексы российской контекстуализации, критической рефлексивности и библиографической надежности получают равные веса по 0,20: первый фиксирует связь теоретического знания с правовой и институциональной средой, второй отражает способность ответа сопоставлять научные школы и показывать ограничения подходов, третий выражает академическую проверяемость источниковой базы. Индекс первой рамки получает вес 0,15, поскольку он не заменяет общего состава ответа, но имеет отдельное педагогическое значение: начальные смысловые позиции формируют первичную иерархию авторитетов, с которой студент начинает конспектирование и дальнейшую переработку материала.

Надежность процедуры обеспечивается предварительной фиксацией кодировочных категорий, единых правил учета повторов и разделением авторских, концептуальных, институциональных и библиографических единиц анализа. Контент-анализ применяется не для механического подсчета слов, а для выявления повторяемой структуры представленности научных рамок, что соответствует логике качественно-количественного анализа текстовых данных [13]. В исследовании применялась предварительно заданная авторская кодировочная матрица; для последующих независимых проверок методики предусмотрено двойное кодирование 20–30 % корпуса и расчет коэффициента согласия кодировщиков.

Результаты исследования и их обсуждение

Разработанная процедура prompt-audit позволяет анализировать генеративный ответ не как готовый учебный текст, а как педагогический объект, в котором одновременно присутствуют содержание, порядок предъявления материала, методологические предпочтения и источниковые ограничения. Для преподавателя политологических дисциплин это означает возможность превратить использование искусственного интеллекта из скрытой студенческой практики в управляемую образовательную ситуацию.

Эмпирические показатели, приведенные в первых блоках раздела, относятся к основному корпусу из 72 ответов, полученному в GPT-5.5 Thinking. Эта модель использована как базовый массив для расчета индексов и проверки процедуры prompt-audit. После анализа основного корпуса приводится контрольное кросс-модельное сопоставление на DeepSeek-R1, Алисе AI (YandexGPT 5.1 Pro в интерфейсе чата с Алисой) и Claude Sonnet 4.5, позволяющее проверить, сохраняется ли выявленная зависимость за пределами исходного массива.

Распределение авторских и концептуальных упоминаний в трех режимах запро-

са в основном корпусе GPT-5.5 Thinking. На первом этапе кодирования сопоставляются авторские и концептуальные упоминания, появляющиеся в нейтральном, контекстуализированном и критико-методологическом режимах. В нейтральном режиме фиксируется исходная структура ответа, которую студент получает без дополнительных методологических требований. В контекстуализированном режиме проверяется, изменяется ли состав авторов и концепций после прямого требования учитывать западные и российские подходы. В критико-методологическом режиме оценивается, приводит ли требование сопоставлять школы и указывать ограничения рамок к более сбалансированному представлению материала.

Кодирование основного корпуса GPT-5.5 Thinking из 72 ответов выявило различие между режимами не только по объему, но и по внутренней организации материала. В нейтральном режиме было зафиксировано 286 авторских и концептуальных упоминаний; из них 211 относились к западной рамке, 75 – к отечественной или российско-контекстной. Контекстуализированный режим дал 331 упоминание и уже иное соотношение: 171 западное и 160 отечественных или российско-контекстных. В критико-методологическом режиме число упоминаний увеличилось до 368, причем 180 из них относились к западной рамке, а 188 – к отечественной или российско-контекстной. Увеличение показателя связано не только с большей развернутостью ответов: модель чаще вводила сопоставление школ, нормативно-правовой контекст, методологические оговорки и замечания о проверке источников.

Из этого следует, что нейтральный запрос нельзя считать пустым или заведомо неверным. Он формирует достаточно связный политологический ответ, однако его объяснительная логика преимущественно опирается на западный академический канон. Прямое требование контекстуализации меняет состав ответа: в нем заметнее присутствуют российские научные школы, институты публичной власти и государственно-правовая рамка. Критико-методологический режим действует глубже: отечественные элементы перестают выполнять роль позднего дополнения к уже заданному западному каркасу и включаются в обсуждение границ применимости разных подходов.

Эффект первой рамки ответа. Отдельного анализа требуют первые пять смысловых позиций ответа. Для учебной практики это не формальная деталь: именно начальные фрагменты чаще всего становятся основой конспекта, устного сообщения или краткого плана будущего эссе. Когда первые позиции заняты одной научной традицией, у студента возникает впечатление, что именно она образует дисциплинарный канон. Если же в начале ответа появляется сопоставление школ, правовой или институциональный контекст, меняется образовательный сигнал: политологическое знание предъявляется как поле сравнения рамок, а не как последовательное усвоение одного набора авторитетов.

Переход от нейтрального к критико-методологическому запросу изменил не только полноту ответа, но и начальную иерархию научных авторитетов. В нейтральном режиме среди первых пяти смысловых позиций 24 ответов было обнаружено 14 отечественных авторов, отечественных концептуальных элементов либо элементов российского правового и институционального контекста из 120 возможных позиций; индекс первой рамки составил 0,117. В контекстуализированном режиме таких элементов стало 46 из 120, Iп вырос до 0,383. В критико-методологическом режиме показатель достиг 66 элементов из 120, что соответствует Iп = 0,550. Эти значения показывают: специально заданная методологическая рамка меняет не только список упоминаний, но и порядок, в котором студент встречает научные авторитеты и объяснительные схемы.

Российская правовая, институциональная и образовательная контекстуализация. Третий результат касается того, появляется ли в ответе российский контекст как содержательный элемент, а не как формальная добавка. Для политологического образования это принципиально: категории демократии, публичной политики, гражданского общества, государственного управления и легитимности власти изучаются не только как абстрактные теории, но и как понятия, связанные с конституционными принципами, институтами публичной власти, образовательными задачами и профессиональной подготовкой специалистов.

Политическое образование современной молодежи в отечественных исследованиях рассматривается как механизм формирования целостной картины политических процессов, гражданской субъектности и способности интерпретировать общественно-политические явления [14]. Публичная политика, в свою очередь, анализируется не только как научная категория, но и как направление подготовки нового поколения политических экспертов [15]. Поэтому отсутствие российского институционального и образовательного контекста в машинном ответе делает его не обязательно ошибочным, но методически неполным для российской образовательной программы.

Наиболее выраженная асимметрия проявилась в темах «демократия», «гражданское общество» и «публичная политика». В нейтральных ответах по этим темам модель начинала объяснение преимущественно через классические и современные западные рамки: процедурную и плюралистическую теорию демократии, концепт публичной сферы, tradition of policy sciences и анализ политического процесса. Эти рамки академически необходимы, однако без дополнительного уточнения они почти не сопровождались российским конституционным, институциональным и образовательным контекстом. Наибольший эффект контекстуализации был зафиксирован в темах «публичная политика», «государственное управление» и «российская политическая система», где уточнение запроса заметно увеличивало число упоминаний отечественных исследователей, российских институтов публичной власти, нормативно-правовых оснований и профессионально-образовательной специфики подготовки политологов.

Библиографическая надежность предложенных источников. Четвертый результат связан с проверяемостью источников. Генеративный ответ может включать реальные имена и реальные концепции, но ошибаться в названии работы, годе издания, страницах, журнале или цифровом идентификаторе. В политологическом образовании такая ошибка имеет двойной эффект: она снижает академическое качество работы студента и искажает понимание научной традиции. Поэтому индекс библиографической надежности должен использоваться не как техническая проверка списка литературы, а как элемент формирования академической ответственности.

Проверка предложенных моделью источников показала различие между режимами. В нейтральном режиме из 51 библиографического или квазибиблиографического упоминания проверяемыми оказались 31; индекс библиографической надежности составил 0,608. В контекстуализированном режиме число предложенных источников выросло до 83, из них 64 были проверяемыми; Iб = 0,771. В критико-методологическом режиме модель предложила 106 источниковых упоминаний, из которых 94 обладали достаточными признаками проверяемости; Iб = 0,887. Следовательно, требование указывать источники, требующие проверки, парадоксальным образом повышает не только осторожность ответа, но и его библиографическую дисциплину: модель чаще называет автора, название работы, год, журнал, издательство или устойчивое библиографическое описание.

Результаты кросс-модельной проверки процедуры prompt-audit
по конкретным моделям генеративных систем

Модель	Режим запроса	Iз	Iо	Iк	Iр	Iб	Iп	КМС
GPT-5.5 Thinking	Нейтральный	0,738	0,271	0,250	0,208	0,608	0,117	0,299
GPT-5.5 Thinking	Контекстуализированный	0,517	0,537	0,875	0,625	0,771	0,383	0,647
GPT-5.5 Thinking	Критико- методологический	0,489	0,589	1,000	0,958	0,887	0,550	0,799
DeepSeek-R1	Нейтральный	0,716	0,292	0,292	0,250	0,625	0,142	0,328
DeepSeek-R1	Контекстуализированный	0,498	0,548	0,875	0,625	0,760	0,400	0,649
DeepSeek-R1	Критико- методологический	0,470	0,570	0,958	0,917	0,850	0,517	0,765
Алиса AI (YandexGPT 5.1 Pro)	Нейтральный	0,690	0,315	0,333	0,292	0,650	0,167	0,359
Алиса AI (YandexGPT 5.1 Pro)	Контекстуализированный	0,505	0,560	0,875	0,667	0,780	0,417	0,667
Алиса AI (YandexGPT 5.1 Pro)	Критико- методологический	0,452	0,595	1,000	0,917	0,872	0,533	0,787
Claude Sonnet 4.5	Нейтральный	0,662	0,340	0,375	0,333	0,690	0,200	0,395
Claude Sonnet 4.5	Контекстуализированный	0,468	0,590	0,917	0,708	0,810	0,450	0,702
Claude Sonnet 4.5	Критико- методологический	0,405	0,625	1,000	0,958	0,900	0,600	0,818

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Динамика коэффициента методологической сбалансированности подтверждает исследовательскую гипотезу. В нейтральном режиме зафиксированы следующие значения: Iз = 0,738; Iо = 0,271; Iк = 0,250; Iр = 0,208; Iб = 0,608; Iп = 0,117. Итоговый КМС составил 0,299. При контекстуализированном запросе показатели изменились: Iз снизился до 0,517, Iо вырос до 0,537, Iк – до 0,875, Iр – до 0,625, Iб – до 0,771, Iп – до 0,383; КМС достиг 0,647. В критико-методологическом режиме были получены Iз = 0,489; Iо = 0,589; Iк = 1,000; Iр = 0,958; Iб = 0,887; Iп = 0,550; общий КМС составил 0,799. Разница между нейтральным и критико-методологическим режимами равна 0,500 пункта. Такой прирост показывает, что формулировка запроса в данном корпусе влияет не периферийно, а на саму методологическую организацию ответа (таблица).

Кросс-модельная проверка не отменяет различий между генеративными системами: Claude Sonnet 4.5 демонстрирует более высокие значения библиографической надежности и критической рефлексивности, DeepSeek-R1 сохраняет несколько более выраженную зависимость от режима запроса, а YandexGPT 5.1 Pro в интерфейсе чата с Алисой показывает промежуточную динамику с заметным усилением российской контекстуализации при уточнении запроса. Вместе с тем общая закономерность воспроизводится во всех системах: нейтральный режим дает более выраженную методологическую асимметрию, контекстуализированный запрос снижает ее, а критико-методологический запрос повышает методологическую сбалансированность. Следовательно, prompt-audit может рассматриваться не как оценка одной модели, а как переносимая педагогическая процедура анализа машинного текста.

Различие между режимами проявилось не только в числах. Нейтральный запрос демонстрирует рамку, которую студент получает «по умолчанию»: она академически связна, но не всегда раскрывает собственные методологические основания. Контекстуализированный запрос расширяет ответ благодаря прямому требованию представить разные научные традиции. Критико-методологический запрос перестраивает саму логику предъявления знания: модель чаще указывает ограничения подходов, выделяет необходимость проверки источников и связывает политологические понятия с российским правовым и институциональным контекстом.

Последовательное сравнение режимов позволяет уточнить характер выявленной асимметрии. Нейтральный режим фиксирует исходный риск: ответ сохраняет академическую связность, но преимущественно выстраивается вокруг западной рамки, слабее включает российский правовой и институциональный контекст и почти не выводит отечественные элементы в первые смысловые позиции. Контекстуализированный режим показывает, что прямое указание на западные и российские подходы меняет не только перечень авторов, но и композицию ответа: российская традиция начинает участвовать в объяснении темы. Наиболее выраженный педагогический эффект дает критико-методологический режим, поскольку он соединяет расширение источниковой базы, библиографическую проверяемость, сопоставление школ, выявление ограничений и восстановление российского правового, институционального и образовательного контекста.

Педагогическая интерпретация результатов. Генеративный искусственный интеллект меняет стартовую точку учебного задания. Студент может начинать не с поиска литературы и самостоятельного построения ответа, а с машинного текста, который уже предлагает готовую композицию темы. Это не отменяет учебную работу, но переносит ее центр на аудит полученного материала. Нейтральный запрос повышает риск некритического принятия первой теоретической рамки: порядок предъявления авторов и концепций способен восприниматься как естественный канон дисциплины. Контекстуализированный запрос расширяет поле научных традиций и показывает множественность исследовательских оптик. Критико-методологический запрос превращает взаимодействие с моделью в учебное действие, где студент проверяет источники, сопоставляет подходы, выявляет ограничения и восстанавливает российский правовой и институциональный контекст.

Для объяснения педагогической логики можно использовать примеры из политической теории. При изучении демократии студент обязан знать процедурную и плюралистическую традиции, включая Р. Даля и его концепцию полиархии [16]. При анализе гражданского общества и публичной коммуникации неизбежно обращение к Ю. Хабермасу и теории публичной сферы [17]. При изучении публичной политики значима ориентация политического знания на решение общественных проблем, восходящая к Г. Лассуэллу [18]. Однако эти авторы должны входить в учебный курс не как единственная невидимая рамка, а как часть сопоставления с отечественными подходами, российскими институтами и правовым контекстом.

Педагогическая технология prompt-audit

Педагогическая технология prompt-audit может быть описана как учебная процедура из шести последовательных действий. Сначала студент получает нейтральный ответ генеративной модели на политологическую тему и рассматривает его как исходный материал, а не как готовый результат. Затем он размечает авторов, концепции, научные школы, источники, институты и нормативно-правовые элементы. На следующем шаге выявляются методологическая асимметрия и эффект первой рамки: студент определяет, какие авторы и объяснительные модели названы первыми, какие представлены слабее и какие отсутствуют. После этого формулируется уточненный запрос с требованием сопоставить западные и российские подходы, показать ограничения рамок и восстановить российский правовой и институциональный контекст. Далее сравниваются нейтральный, контекстуализированный и критико-методологический ответы, а источники проверяются на библиографическую надежность. Завершают работу рефлексивный комментарий и самостоятельный учебный текст, в котором машинный ответ используется как материал для академической переработки.

Критерии оценивания такого задания должны быть привязаны не к самому факту обращения к искусственному интеллекту, а к качеству аналитической работы. Значимыми становятся точность выделения авторов и концепций, корректность отнесения их к научным школам, надежность проверки источников, умение обнаружить отсутствующие или слабо представленные рамки, включение российского правового и институционального контекста, глубина рефлексивного комментария и самостоятельность итогового текста. В этом случае оценивается не машинная генерация как таковая, а степень сформированности критической ИИ-грамотности, академической ответственности и методологической самостоятельности студента.

Связь предложенной процедуры с педагогикой профессионального образования состоит в том, что она развивает не частный навык пользования сервисом, а способность управлять учебным взаимодействием с цифровым инструментом. Студент учится рассматривать машинный ответ как текст с происхождением, скрытыми допущениями, библиографическими ограничениями и дисциплинарной рамкой. Преподаватель, в свою очередь, получает возможность оценивать не только готовую работу, но и ход ее подготовки: работу с запросом, источниками и научными школами. В этом смысле prompt-audit может быть встроен в задания, ориентированные на критическое мышление, академическую добросовестность и методологическую самостоятельность.

Практическая значимость технологии состоит в том, что она может быть встроена в профессиональную подготовку будущих политологов как модуль внутри дисциплины. Наиболее целесообразно использовать prompt-audit в курсах «Введение в политическую науку», «Теория политики», «Публичная политика», «Государственная политика и управление», «Сравнительная политология», «Политический анализ», «Методология политической науки» и «Российская политическая система». Такая логика соответствует современным подходам к политологическому образованию в российской высшей школе, где подчеркивается структура подготовки политологов, связь с профессиональными компетенциями и роль публичной политики в подготовке экспертов [19, 20]. Зарубежные исследования политологического и гражданского образования, в свою очередь, акцентируют значение аналитических навыков, гражданской компетентности и влияния изучения политической науки на установки обучающихся [21–23]. Дополнительно для данной технологии значим сравнительный фокус, поскольку он позволяет рассматривать политологическое образование как пространство сопоставления дисциплинарных традиций и образовательных результатов [24].

В учебном процессе модуль может включать 14 академических часов: 2 ч на вводное занятие о принципах prompt-audit и кодировочной матрице; 4 ч на семинарские задания по сравнению нейтрального, контекстуализированного и критико-методологического режимов запроса; 4 ч на самостоятельную работу с ИИ-ответами; 2 ч на обсуждение источников и библиографической надежности; 2 ч на итоговую защиту результатов prompt-audit. В качестве учебных заданий могут использоваться аудит ответа по теме демократии или публичной политики, сопоставление первой рамки в ответах разных моделей, проверка ссылок через научные базы, подготовка краткой аналитической записки с разделением машинного текста и авторской позиции студента. В практико-ориентированной части технология применима в рамках учебной практики по политическому анализу, научно-исследовательской работы студента, а также производственной практики в аналитических, экспертных, образовательных или общественно-политических организациях.

Внедрение технологии связано с рядом рисков. Возможны формальное выполнение студентами процедуры без реальной критической рефлексии, подмена самостоятельного политологического анализа механическим сравнением ИИ-ответов, зависимость результатов от конкретной модели и версии системы, трудность проверки источников, сохранение скрытых методологических смещений даже при контекстуализированном запросе, различие цифровой подготовки студентов, увеличение нагрузки на преподавателя при проверке результатов, а также этические и академические риски некорректного использования искусственного интеллекта. Эти ограничения особенно важны для политологического образования, поскольку ошибка здесь может касаться не только факта, но и самой рамки интерпретации политического явления.

Минимизация рисков предполагает заранее заданную кодировочную матрицу, проверку источников через научные базы, обязательное сопоставление ИИ-ответа с учебной литературой, двойное кодирование части корпуса, обсуждение результатов на семинаре и требование отделять машинный текст от авторской аналитической позиции студента. В таком формате преподаватель оценивает не объем полученного машинного материала, а качество анализа: корректность выделения авторов и концепций, обоснованность выводов о первой рамке, точность проверки источников и самостоятельность итоговой политологической интерпретации.

Дискуссия об искусственном интеллекте в высшем образовании уже затрагивает авторство, экспертность и функции университета [25]. В политологическом образовании эти вопросы особенно чувствительны: машинный текст способен убедительно имитировать понимание политических категорий, но не несет ответственности за выбор теории, источника и контекста. Такая ответственность должна оставаться за студентом. Задача преподавателя заключается в том, чтобы сделать ее видимой и включить в содержание учебной работы.

Заключение

Первый вывод заключается в том, что нейтральный запрос к генеративной модели в политологическом образовании несет педагогический риск. Он способен задать первую теоретическую рамку, не раскрывая ее методологических оснований. В проведенном эмпирическом исследовании нейтральный режим показал высокий индекс западноцентричности (0,738) и низкий индекс первой рамки (0,117). Это указывает на слабое присутствие отечественных и российско-контекстных элементов в начальных смысловых позициях ответа.

Второй вывод касается контекстуализированного и критико-методологического запроса. Они снижают методологическую асимметрию, поскольку побуждают модель вводить разные научные традиции, российский правовой и институциональный контекст, ограничения подходов и проверку источников. В основном корпусе GPT-5.5 Thinking КМС вырос с 0,299 в нейтральном режиме до 0,647 в контекстуализированном и до 0,799 в критико-методологическом режиме. В кросс-модельном массиве та же динамика сохранилась: у DeepSeek-R1 КМС изменился с 0,328 до 0,649 и 0,765; у Алисы AI (YandexGPT 5.1 Pro) – с 0,359 до 0,667 0,787; у Claude Sonnet 4.5 – с 0,395 до 0,702 и 0,818. Эти значения показывают, что рост методологической сбалансированности связан не с единичной конфигурацией GPT-5.5 Thinking, а с самим переходом от нейтрального запроса к методологически заданному режиму работы.

Третий вывод связан с индексом первой рамки. Этот показатель фиксирует не только состав ответа, но и порядок предъявления научных авторитетов. В основном корпусе GPT-5.5 Thinking значение Iп увеличилось с 0,117 до 0,550; отечественные концептуальные и российско-институциональные элементы сместились из периферийной зоны в начальную смысловую структуру ответа. Кросс-модельная проверка дала близкую направленность изменений: у DeepSeek-R1 Iп вырос с 0,142 до 0,517, у Алисы AI (YandexGPT 5.1 Pro) – с 0,167 до 0,533, у Claude Sonnet 4.5 – с 0,200 до 0,600. Для обучения это принципиально, потому что первые позиции часто становятся опорой для конспекта, устного сообщения или эссе.

Четвертый вывод состоит в том, что prompt-audit может использоваться как технология формирования критической ИИ-грамотности. В нее входят диагностика авторов и концепций, проверка источников, выявление скрытых допущений, сопоставление научных школ, восстановление недостающего правового и институционального контекста, а также рефлексия над тем, как меняется ответ после переформулирования запроса.

Пятый вывод уточняет содержание критической ИИ-грамотности в политологическом образовании. Она не сводится к навыку эффективно задавать вопросы модели. Ее содержательное ядро образуют проверка источников, различение справочной инфор-

мации и интерпретации, сопоставление западных и отечественных научных рамок, выявление методологических ограничений и соотнесение машинного ответа с российским правовым, образовательным и профессиональным контекстом.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением корпуса ответов, проверкой процедуры на других дисциплинах политологического цикла, проведением педагогического эксперимента с контрольной и экспериментальной группами, оценкой влияния prompt-audit на качество студенческих эссе, докладов и аналитических записок, разработкой рубрикатора оценивания критической ИИ-грамотности, созданием банка политологических кейсов и типовых заданий, а также расширением кросс-модельной проверки на новые версии генеративных систем. Отдельного внимания требует сопоставление результатов аудита машинного текста с динамикой самостоятельной аргументации студентов в письменных и устных формах учебной работы.

Искусственный интеллект в преподавании политологических дисциплин нельзя сводить ни к запретительной проблеме, ни к роли нейтрального технического помощника. Его целесообразно включать в образовательный процесс одновременно как инструмент и как объект критического педагогического анализа. Для политологического образования особенно важно, чтобы студент видел не только содержание ИИ-ответа, но и теоретическую рамку, в которой этот ответ собран. Без такой работы генеративная модель может закреплять невидимую иерархию авторов, понятий и объяснительных схем, даже когда сам текст выглядит академически корректным.

Полученные данные уточняют масштаб выводов исследования. Основной корпус был сформирован на материале GPT-5.5 Thinking, однако контрольное сопоставление DeepSeek-R1, Алисы AI (YandexGPT 5.1 Pro в интерфейсе чата с Алисой) и Claude Sonnet 4.5 показало сходную направленность изменений: нейтральный режим сохраняет более выраженную методологическую асимметрию, контекстуализированный запрос расширяет российскую рамку, а критико-методологический режим дает наиболее высокий уровень сбалансированности. Различия между системами при этом сохраняются, поэтому результаты не следует трактовать как оценку качества конкретной модели. Значимым является другое: режим запроса устойчиво влияет на состав источников, порядок предъявления научных авторитетов, степень российской контекстуализации и наличие критических оговорок.

Поэтому prompt-audit целесообразно рассматривать не как проверку одной языковой модели, а как переносимую педагогическую процедуру работы с машинным текстом. В подготовке будущих политологов ее значение состоит в том, что студент учится не воспроизводить ИИ-ответ, а разбирать его теоретическую рамку, источниковые ограничения, методологические смещения и соответствие российскому образовательному и институциональному контексту.

В такой логике интеллектуальный суверенитет российского высшего образования означает не закрытость от международной политической науки, а способность самостоятельно определять содержание и методологические основания подготовки специалистов. Западные теории сохраняют статус обязательной части политологического образования, но должны изучаться в режиме сопоставления, а не как единственная универсальная оптика. Поэтому prompt-audit и критическая ИИ-грамотность выступают условиями методологической самостоятельности, академической ответственности и более зрелой образовательной практики в условиях распространения генеративного искусственного интеллекта.

Список литературы

1. Miao F., Holmes W. Guidance for generative AI in education and research. Paris: UNESCO, 2023. URL: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386693 (дата обращения: 20.05.2026).

2. Kasneci E., Seßler K., Küchemann S., Bannert M., Dementieva D., Fischer F., Gasser U., Groh G., Günnemann S., Hüllermeier E., Krusche S., Kutyniok G., Michaeli T., Nerdel C., Pfeffer J., Poquet O., Sailer M., Schmidt A., Seidel T., Stadler M., Weller J., Kuhn J., Kasneci G. ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education // Learning and Individual Differences. 2023. Vol. 103. Is. 102274. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.lindif.2023.102274.

3. Zawacki-Richter O., Marín V. I., Bond M., Gouverneur F. Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – where are the educators? // International Journal of Educational Technology in Higher Education. 2019. Vol. 16. Art. 39. P. 1–27. DOI: 10.1186/s41239-019-0171-0.

4. Сысоев П. В. Искусственный интеллект в образовании: осведомленность, готовность и практика применения преподавателями высшей школы технологий искусственного интеллекта в профессиональной деятельности // Высшее образование в России. 2023. Т. 32. № 10. С. 9–33. DOI: 10.31992/0869-3617-2023-32-10-9-33.

5. Кузьминов Я. И., Кручинская Е. В., Груздев И. А., Наумов А. А. Отстающие и опережающие: как студенты используют генеративный искусственный интеллект в образовательных целях // Высшее образование в России. 2025. Т. 34. № 6. С. 9–35. DOI: 10.31992/0869-3617-2025-34-6-9-35.

6. Кошкина Е. А., Бордовская Н. В., Гнедых Д. С., Хромова М. А., Демьянчук Р. В., Исхакова М. П., Балышев П. А. Генеративный искусственный интеллект в высшем образовании: обзор теоретических подходов и практик применения // Высшее образование в России. 2025. Т. 34. № 6. С. 36–57. DOI: 10.31992/0869-3617-2025-34-6-36-57.

7. European Commission. Directorate-General for Education, Youth, Sport and Culture. Ethical guidelines on the

use of artificial intelligence and data in teaching and learning for educators. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022. URL: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d81a0d54-5348-11ed-92ed-01aa75ed71a1 (дата обращения: 20.05.2026).

8. Ng D. T. K., Leung J. K. L., Chu S. K. W., Qiao M. S. Conceptualizing AI literacy: An exploratory review // Computers and Education: Artificial Intelligence. 2021. Vol. 2. Article 100041. P. 1–11. DOI: 10.1016/j.caeai.2021.100041.

9. Walter Y. Embracing the future of Artificial Intelligence in the classroom: the relevance of AI literacy, prompt engineering, and critical thinking in modern education // International Journal of Educational Technology in Higher Education. 2024. Vol. 21. Art. 15. P. 1–29. DOI: 10.1186/s41239-024-00448-3.

10. Bender E. M., Gebru T., McMillan-Major A., Shmitchell S. On the dangers of stochastic parrots: Can language models be too big? // Proceedings of the 2021 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency. New York: Association for Computing Machinery, 2021. P. 610–623. DOI: 10.1145/3442188.3445922.

11. Weidinger L., Uesato J., Rauh M., Griffin C., Huang P.-S., Mellor J., Glaese A., Cheng M., Balle B., Kasirzadeh A., Biles C., Brown S., Kenton Z., Hawkins W., Stepleton T., Birhane A., Hendricks L. A., Rimell L., Isaac W., Haas J., Legassick S., Irving G., Gabriel I. Taxonomy of risks posed by language models // Proceedings of the 2022 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency. New York: Association for Computing Machinery, 2022. P. 214–229. DOI: 10.1145/3531146.3533088.

12. Tao Y., Viberg O., Baker R. S., Kizilcec R. F. Cultural bias and cultural alignment of large language models // PNAS Nexus. 2024. Vol. 3. Is. 9. Art. 346. P. 1–12. DOI: 10.1093/pnasnexus/pgae346.

13. Krippendorff K. Content Analysis: An Introduction to Its Methodology. 4th ed. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2018. 472 p. ISBN 978-1506395661.

14. Самаркина И. В., Кузьменко Н. П. Политическое образование современной молодежи: состояние, инструменты и проблемы // Социально-политические исследования. 2024. № 4 (25). С. 37–57. DOI: 10.20323/2658-428X-2024-4-25-37. EDN: VTFETZ.

15. Каневский П. С. Публичная политика: на острие подготовки нового поколения политических экспертов // Вестник Московского университета. Сер. 18. Социология и политология. 2024. Т. 30. № 4. С. 60–82. DOI: 10.24290/1029-3736-2024-30-4-60-82.

16. Dahl R. A. Democracy and Its Critics. New Haven: Yale University Press, 1989. 397 p. ISBN 978-0300049381.

17. Habermas J. The Structural Transformation of the Public Sphere: An Inquiry into a Category of Bourgeois Society. Cambridge: MIT Press, 1991. 301 p. ISBN 978-0262581080.

18. Lasswell H. D. The Policy Orientation // The Policy Sciences: Recent Developments in Scope and Method / ed. by D. Lerner, H. D. Lasswell. Stanford: Stanford University Press, 1951. P. 3–15.

19. Зарипов Н. А., Мясников А. И., Торгуд А. И., Кошкин А. В. Система политологического образования Российской Федерации в высшей школе: структурные особенности современного состояния // Вестник Пермского университета. Политология. 2026. Т. 20. № 1. С. 127–140. DOI: 10.17072/2218-1067-2026-1-127-140.

20. Мясоедова В. А. Основные параметры образовательной модели подготовки политологов // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2–2. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=23119 (дата обращения: 08.06.2026).

21. Beaumont E., Colby A., Ehrlich T., Torney-Purta J. Promoting Political Competence and Engagement in College Students: An Empirical Study // Journal of Political Science Education. 2006. Vol. 2. Is. 3. P. 249–270. DOI: 10.1080/15512160600840467.

22. Ishiyama J., Breuning M., Lopez L. A Century of Continuity and Little Change in the Undergraduate Political Science Curriculum // American Political Science Review. 2006. Vol. 100. Is. 4. P. 659–665. DOI: 10.1017/S0003055406062551.

23. Ishiyama J., Miller W. J., Simon E. Handbook on Teaching and Learning in Political Science and International Relations. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2015. 496 p. ISBN 978-1782548478.

24. Esaiasson P., Persson M. Does Studying Political Science Affect Civic Attitudes?: A Panel Comparison of Students of Politics, Law, and Mass Communication // Journal of Political Science Education. 2014. Vol. 10. Is. 4. P. 375–385. DOI: 10.1080/15512169.2014.948118.

25. Резаев А. В., Степанов А. М., Трегубова Н. Д. Высшее образование в эпоху искусственного интеллекта // Высшее образование в России. 2024. Т. 33. № 4. С. 49–62. DOI: 10.31992/0869-3617-2024-33-4-49-62. EDN: OLNRFA.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 37.033:159.9
DOI 10.17513/snt.40840

CC BY 4.0

ОТ ЭКОПСИХОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОБЛЕМАТИКИ К ПРАКТИКЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЫ

[1, 2] Гришаева Ю. М. ORCID ID 0000-0003-2274-3414,
[3] Усачева И. Н. ORCID ID 0000-0003-0760-6403,
[3] Усачев А. В. ORCID ID 0000-0002-6150-2050

[1] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет», Москва, Российская Федерация;
[2] Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего образования «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», Москва, Российская Федерация;
[3] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Елецкий государственный университет имени И. А. Бунина», Елец, Российская Федерация, e-mail: a.usacev@mail.ru

Стремительное развитие цивилизации ставит вопрос о сохранности природы и воздействии окружающей среды на психику человека. Целью исследования является процесс анализа оснований эковолонтерской деятельности. Экологическая активность исследуется в среде молодежи и нуждается в прояснении, в частности важен вопрос, на каком уровне находится фактор одобрения охраны и преобразование природы положительным образом с целью сохранения окружающей среды и психологического равновесия на уровне личности. Всего в исследовании приняли участие 2569 респондентов – студентов высшего образования. Применялся историко-генетический метод, который позволяет проследить историю феномена от зарождения до развитой формы, компаративистский метод, создающий сравнительную базу, анализ, синтез и обобщение, позволяющие выявить самое главное в научном повествовании, а также методы математической статистики. Для сравнения данных применялся метод анкетирования с последующей статистической обработкой данных. Проведенное исследование показало, что экопсихология органично включает в себя основы психологии и экологии, что позволяет ставить вопросы комплексно и системно. Можно вести речь о формировании экологической культуры как необходимого условия внедрения в молодежную среду для оптимального взаимодействия общества и природы в будущем. При низкой вовлеченности 61 % студентов воспринимают экологическую культуру как актуальный тренд современности; 55,4 % студентов рассматривают экопсихологическую проблематику как фактор сближения общества. Более двух третей респондентов (67,6 % студентов) считают необходимым создание системы эковолонтерской деятельности. Значительная часть опрошенных студентов (более 55 %) воспринимает экологическую проблематику как объединяющий фактор. Полученные данные указывают на актуальность изучения экологических установок опрошенных студентов и механизмов вовлечения в эковолонтерство.

Ключевые слова: экопсихология, экология, субъективность, окружающий мир, коэволюция, биота, благополучие, молодежь

FROM ECOPSYCHOLOGICAL ISSUES TO THE PRACTICE OF FORMING AN ECOLOGICAL CULTURE

[1, 2] Grishaeva Yu. M. ORCID ID 0000-0003-2274-3414,
[3] Usacheva I. N. ORCID ID 0000-0003-0760-6403,
[3] Usachev A. V. ORCID ID 0000-0002-6150-2050

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow Pedagogical State University", Moscow, Russian Federation;
[2]Federal State Educational Budgetary Institution of Higher Education "Financial University under the Government of the Russian Federation", Moscow, Russian Federation;
[3]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yelets State University named after I. A. Bunin", Yelets, Russian Federation, e-mail: a.usacev@mail.ru

The rapid development of civilization raises the question of the preservation of nature and the impact of the environment on the human psyche. To substantiate the importance of environmental research for the formation of a new type of psychology that answers questions about the state of human subjectivity and its dependence on the state of the surrounding world. A total of 2,569 university students participated in the study. Historical and genetic analysis was used, which allows tracing the history of the phenomenon from its origin to its developed form, comparative analysis, which creates a comparative base, analysis, synthesis, and generalization, which allows to identify the most important thing in the scientific narrative, as well as methods of mathematical statistics. The study showed that ecopsychology organically includes the basics of psychology and ecology, which allows us to address issues in a comprehensive and systematic manner. We can talk about the formation of an environmental culture as a necessary condition for the optimal interaction between society and nature in the future. Despite the low level of engagement, 61 % of students perceive environmental culture as a relevant trend in modern times. 55.4 % of students consider ecopsychological issues as a factor that brings society closer together. More than two-thirds of respondents (67.6 % of students) consider it necessary to create an eco-volunteer system. A significant portion of young people (more than 55 %) perceive environmental issues as a unifying factor. These findings highlight the importance of studying the environmental attitudes of the surveyed students and the mechanisms of their involvement in eco-volunteering.

Keywords: ecopsychology, ecology, subjectivity, environment, coevolution, biota, well-being, youth

Введение

Проблемы экопсихологии особенно дают о себе знать во второй половине XX в., когда многочисленные медицинские работники фиксируют у пациентов ухудшение самочувствия, и это прежде всего связано с ухудшением состояния окружающей среды. Наметился цивилизационный сдвиг, который в содержательном смысле заключал в себе особое состояние экологической ситуации, которая непосредственно отражалась на здоровье и самочувствии тысяч людей. Наука была вынуждена ответить на этот вызов, зафиксировав ряд болезней, вызванных загрязнением окружающей среды.

Чтобы объективно подойти к сущности реакций человека на экологическую ситуацию, важно помнить, что человек – это существо одновременно биологическое и социальное. Необходимо также отметить, что человек имеет в своей природе духовное содержание, которое предполагает то, что он живет в одной природной ситуации с другими видами живых существ, с бытием которых приходится не просто мириться, но и служить улучшению параметров сосуществования в одних и тех же ареалах обитания. Законы едины во многом для всех живых существ, и необходимо соотносить существование одного вида с другим для того, чтобы сохранялись параметры экосистемы. Психология человека непосредственно зависит от такой постановки вопроса и приводит к различным состояниям, исходя из различных состояний окружающей среды.

В научном сообществе идет активное обсуждение проблем экологической психологии [1, с. 301], которые заостряют дискуссию на тех или иных темах, вызывая к жизни все новые смыслы существования этой науки. Дискуссия состоит из взвешенных суждений, которые были высказаны в разные годы, но касались одного и того же – предмета изучения экопсихологии и ее компетенции в тех или иных вопросах состояния окружающей среды и ее влияния на психологическое самочувствие человека. Дискуссию можно разделить на две тенденции. Одна делает акцент на экологии как основе экопсихологии, вторая – на психологии как основе этой науки. И та и другая тенденции имеют право на существование и высказывают предельные сущности по проблемам обсуждаемой науки.

В работе М. М. Калиты, Ю. А. Коледенковой в этой связи излагается то, как распределена в мышлении субъект-объектная дихотомия: что можно признать субъектом в экопсихологии, а что лучше отнести к объекту. В частности, научный текст лучше признать объектом внимания ученого, который находится на пути к истине и квалифицируется как субъект данного действия [2]. Восприятие текста по экопсихологии характеризуется многослойностью внимания, что наиболее чутко улавливает смысл излагаемого и создает основу для научного исследования на различных уровнях научного анализа.

В статье Г. Н. Тихончука отмечается, что экопсихологией часто становится житейское и обыденное действие, которое зачастую не подвергается рефлексии научного характера [3]. Экопсихология и ее проблемный слой существует изначально как фундаментальная область знания, с опорой на экологический опыт, который сопровождает человека на протяжении всей его жизни и на определенном этапе становится научной областью поиска ответов на насущные вопросы и проблемы.

Заслуживает внимания мнение исследователя О. В. Лыловой, которая отмечает, что экопсихология с самого начала шла довольно долго в виде психологии и экологии для того, чтобы рафинировать свой научный предмет. И в итоге предметом экопсихологии стала сфера экологических явлений, которые непосредственно влияют на психологическое состояние человека [4]. Подчеркивание темы психологической связи природы и человека не является редкой, но надо признать правоту автора в том, что работа по экопсихологии намечает пути духовного сближения человека и природы.

Продолжает размышление Ю. Г. Панюкова, отмечая, что в первую очередь экопсихологию волнует состояние человека, подверженного воздействию окружающей среды. К сожалению, на данный исторический момент негативных факторов значительно больше [5]. Основные проблемы методически распределяются среди таких предметных массивов, как человек, человечество, природа, окружающая среда, экология. Они образуют проблемное поле, которое стоит перед экопсихологией и экологией, и позволяет предельно точно заострить тематику, предлагаемую для научной работы.

Исследователи Г. В. Залевский и Ю. В. Кузьмина в своих материалах отмечают, что современный экологический кризис, который является предметом экопсихологии, был заложен в эпоху Нового времени в период первоначального накопления капитала, когда природа воспринималась как неисчерпаемый ресурс. Дошло до того, что состояние природы начало передаваться человеку в качестве негативных последствий, проблему которых надо решать [6]. Они связывают воедино три показателя: историческую ретроспективу, загрязнение окружающей

среды и ухудшение здоровья людей, живущих в соответствующей экологической обстановке. Этот проблемный клубок и есть предмет экопсихологии, в котором ей предстоит разбираться еще долгие годы. Ясно одно: необходимо скрупулезно изучать экологическую составляющую компоненту, чтобы отчетливо понять ее влияние не только на общее здоровье, но и на психологическую составляющую.

Цель исследования – процесс анализа предпосылок эковолонтерской деятельности. Экологическая активность в среде молодежи нуждается в прояснении, в частности важен вопрос, на каком уровне находится фактор одобрения охраны и преобразование природы положительным образом с целью рационального природопользования. Также нашлось место анализу отчуждения природы от человека, которое оказывает влияние на качество окружающей среды как в частном порядке, так и глобально.

Материалы и методы исследования

Современное состояние цивилизации в отношении окружающей среды мыслится как кризис. Его можно исследовать с помощью историко-генетического метода для того, чтобы проследить его происхождение и развитие в истории. Анализ, синтез, обобщение выявляют самое главное в проблеме и определяют пути ее решения. Применялся метод математической статистики, с помощью которого обрабатывались материалы, полученные при анкетировании согласно выборке. Человек осознает, что его субъективность может быть не столь рецептивна к изъянам и недостаткам цивилизации, но может приобрести защитные механизмы для успешного существования. Экология в этом смысле самая оптимальная наука, которая может помочь определиться с тем, что окружающий мир будет изучать и будут подбираться ключи к уже установившимся проблемам. Экология – это одна из самых современных наук, актуальность которой трудно оспорить. Сформировать гармонию между человеком и окружающим миром возможно средствами экопсихологии.

Для оценки предметного уровня экопсихологии и готовности молодежи к участию в эковолонтерской деятельности в 2024–2025 учебном году было проведено эмпирическое исследование, охватившее 2569 респондентов – студентов учреждений высшего образования. Исследование проводилось на базе трех российских университетов: Московского городского педагогического университета (МГПУ), Ульяновского государственного педагогического университета имени И. Н. Ульянова (УлГПУ) и Елецкого государственного университета имени И. А. Бунина (ЕГУ). В качестве респондентов выступали студенты первого курса очной формы обучения. Общая выборка составила 2569 чел.: МГПУ – 1023 чел., УлГПУ – 934 чел., ЕГУ – 612 чел. Формирование выборки осуществлялось методом сплошного охвата в рамках выделенных академических групп.

Для диагностики уровня готовности к эковолонтерской деятельности применялась авторская анкета, включающая блоки по трем компонентам: когнитивному (экологические знания и осведомленность), мотивационно-ценностному (отношение к природоохранной деятельности) и деятельностному (опыт участия в экологических акциях). Пример анкеты (всего 30 вопросов):

Экоанкета

1. Как Вы считаете, можно ли жить, не причиняя вреда природе?
2. Считаете ли Вы возможным участие животных в развлекательных шоу?
3. Как Вы участвуете в решении экологических проблем?
4. Как Вы считаете, с ростом технического прогресса роль природы в жизни человека снижается?
5. Считаете ли Вы нормой использование человеком натурального меха/кожи в производстве?
6. Как Вы оцениваете свой уровень экологической культуры?

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследования методом анкетирования и методом статистической обработки данных показали, что подавляющее большинство студентов не имеют опыта участия в эковолонтерских проектах – 75 % (1931 чел.). Менее чем в трех проектах участвовали 20 % (507 чел.), более чем в трех – лишь 5 % (131 чел.).

Несмотря на низкую вовлеченность (638 студентов), большинство респондентов считают свою эковолонтерскую деятельность эффективной. Среди студентов положительно оценили эффективность 59 % (376 чел.), затруднились ответить 31 % (198 чел.), отрицательно оценили – 10 % (64 чел.).

На вопрос «Экологическая культура – это модно?» утвердительно ответили 61 % студентов (1567 чел.), затруднились с ответом 31 % (791 чел.), отрицательно ответили – 8 % (211 чел.). Эти данные свидетельствуют о том, что значительная часть опрошенных молодых людей воспринимает экологическую культуру как актуальный тренд современности.

Респонденты склонны рассматривать экологическую проблематику как фактор сближения общества. Среди студентов 55 % (1424 чел.) считают ее однозначно сближающей, 34 % (867 чел.) затруднились с ответом, 11 % (278 чел.) считают разобщающей.

Готовность принять участие в эковолонтерских проектах выразили 39 % студентов (1011 чел.), затруднились ответить 35 % (887 чел.), отказались 26 % (671 чел.).

На наличие экологических проблем в регионе проживания, требующих немедленного решения, указали 56 % студентов (1439 чел.), затруднились ответить 29 % (748 чел.), не видят проблем 15 % (382 чел.).

Использование экологически направленных действий в повседневной жизни (сортировка мусора, отказ от пластика, экономия электроэнергии и т. п.) распределилось следующим образом. Среди студентов всегда стараются это делать 27 % (688 чел.), иногда – 48 % (1240 чел.), не задумывались об этом – 11 % (272 чел.), почти никогда не делают – 14 % (369 чел.). Таким образом, более трех четвертей респондентов в той или иной степени включены в экологические практики.

Ключевым результатом исследования стала выявленная готовность молодежи к систематизации экологической деятельности: 68 % студентов (1738 чел.) поддержали идею создания системы эковолонтерской деятельности. Затруднились с ответом 22 % студентов (585 чел.). Против высказались 10 % студентов (246 чел.). При этом непосредственную готовность к участию выразили лишь 39 % студентов от общего числа опрошенных, что указывает на необходимость разработки привлекательных и доступных форматов вовлечения.

По совокупности набранных баллов каждый респондент был отнесен к одному из трех уровней готовности: низкому, среднему или высокому.

В качестве нулевой гипотезы (H_0) было принято предположение об отсутствии статистически значимых различий в распределении первокурсников по уровням готовности к эковолонтерской деятельности между тремя университетами, то есть университетская принадлежность не оказывает значимого влияния на исследуемый признак. Альтернативная гипотеза (H_1) утверждала наличие значимых межвузовских различий в характере распределения студентов по уровням готовности.

Для проверки сформулированных гипотез был избран критерий хи-квадрат Пирсона (χ^2) как наиболее адекватный метод для анализа номинальных категориальных данных, представленных в форме таблицы сопряженности. Уровень статистической значимости был установлен на отметке $\alpha = 0{,}05$.

Результаты вычисления ожидаемых частот и статистики χ^2 представлены в табл. 2.

Ожидаемые частоты для каждой ячейки таблицы рассчитывались по стандартной формуле:

$$Cij = (Ri \times Cj) / N,$$

где R_i – сумма по строке, C_j – сумма по столбцу, N – общий объем выборки.

Таблица 1

Таблица сопряженности наблюдаемых частот

Университет	Низкий уровень	Средний уровень	Высокий уровень	Итого
МГПУ	237	512	274	1023
УлГПУ	230	463	241	934
ЕГУ	152	308	152	612
Итого	619	1283	667	2569

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 2

Результаты расчета ожидаемых частот

Университет	Низкий уровень	Средний уровень	Высокий уровень
МГПУ	246,49	510,90	265,61
УлГПУ	225,05	466,46	242,50
ЕГУ	147,46	305,64	158,90

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Минимальное ожидаемое значение по всем ячейкам составило 147,46, что существенно превышает пороговое значение в 5 единиц и свидетельствует о корректности применения критерия χ^2 без поправок.

Значение тестовой статистики вычислялось по формуле

$$\chi^2 = \sum \frac{\left(O_{ij} - E_{ij}\right)^2}{E_{ij}}.$$

Пошаговое вычисление вкладов отдельных ячеек в суммарное значение χ^2 представлено ниже:

− МГПУ / низкий: $(237-246{,}49)^2 / 246{,}49 = 0{,}365$;
− МГПУ / средний: $(512-510{,}90)^2 / 510{,}90 = 0{,}002$;
− МГПУ / высокий: $(274-265{,}61)^2 / 265{,}61 = 0{,}265$;
− УлГПУ / низкий: $(230-225{,}05)^2 / 225{,}05 = 0{,}109$;
− УлГПУ / средний: $(463-466{,}46)^2 / 466{,}46 = 0{,}026$;
− УлГПУ / высокий: $(241-242{,}50)^2 / 242{,}50 = 0{,}009$;
− ЕГУ / низкий: $(152-147{,}46)^2 / 147{,}46 = 0{,}140$;
− ЕГУ / средний: $(308-305{,}64)^2 / 305{,}64 = 0{,}018$;
− ЕГУ / высокий: $(152-158{,}90)^2 / 158{,}90 = 0{,}300$.

Суммарное значение:

χ^2эмп = 0,365 + 0,002 + 0,265 + 0,109 + 0,026 + 0,009 + 0,140 + 0,018 + 0,300 = 1,234

Для оценки размера эффекта рассчитан коэффициент V Крамера:

$$V = \sqrt{\frac{\chi^2}{N \cdot \min(r-1, c-1)}} = \sqrt{\frac{1{,}234}{2569 \times 2}} = \sqrt{0{,}000240} \approx 0{,}016.$$

Полученное значение V = 0,016 свидетельствует о крайне слабой связи между университетской принадлежностью и уровнем готовности к эковолонтерской деятельности.

Число степеней свободы рассчитывалось как

$df = (r - 1)(c - 1) = (3 - 1)(3 - 1) = 4.$

При уровне значимости α = 0,05 и df = 4 критическое значение χ^2крит составляет 9,488 (по таблице распределения хи-квадрат Пирсона).

Поскольку эмпирическое значение критерия (χ^2эмп = 1,234) существенно не превышает критического значения (χ^2крит = 9,488), нулевая гипотеза не отвергается при принятом уровне значимости. Полученный результат свидетельствует об отсутствии статистически значимых различий в распределении первокурсников по уровням готовности к эковолонтерской деятельности между МГПУ, УлГПУ им. И. Н. Ульянова и ЕГУ им. И. А. Бунина ($p > 0{,}05$).

Содержательный анализ наблюдаемых частот позволяет зафиксировать ряд тенденций, заслуживающих внимания. Распределение студентов по уровням готовности во всех трех университетах оказалось весьма сходным: около половины респондентов в каждом вузе продемонстрировали средний уровень готовности (порядка 50 %), примерно четверть – высокий (около 26 %) и столько же – низкий (около 24 %). Наибольший вклад в значение χ^2 вносит ячейка, соответствующая низкому уровню готовности у студентов МГПУ (0,365), однако и этот вклад остается весьма скромным, что дополнительно подчеркивает однородность распределений.

Полученное значение χ^2эмп = 1,234 значительно ниже критического порога, и p-значение в данном случае составляет около 0,872, что свидетельствует об отсутствии статистически значимых различий между университетами. Коэффициент V Крамера (V = 0,016) подтверждает крайне слабую связь между университетской принадлежностью и уровнем готовности к эковолонтерской деятельности. Выявленные тенденции не достигают порога статистической значимости, что может объясняться рядом факторов. Во-первых, единообразие федеральных образовательных стандартов и сходство программ экологического воспитания на первом курсе педагогических университетов формируют схожий стартовый уровень экологической компетентности студентов независимо от региона. Во-

вторых, при столь значительном объеме выборки (N = 2569) статистическая мощность критерия весьма высока, и отсутствие значимого результата при таком числе наблюдений говорит о подлинной однородности распределений, а не о недостаточной мощности метода.

Исследование выполнено с соблюдением принципов добровольности и информированного согласия участников. Статистическая обработка данных осуществлена с использованием пакетов SPSS Statistics 26.0 и Microsoft Excel.

Полученные данные подтверждают, что экопсихологическое сознание опрошенных студентов находится в процессе формирования, характеризуясь высоким уровнем декларируемых установок при относительно низком уровне реального участия в экологической деятельности. Это свидетельствует о необходимости целенаправленной работы по трансформации экологических установок в устойчивые поведенческие паттерны, что подтверждает актуальность развития экопсихологии как научной дисциплины, способной обеспечить теоретическое обоснование и практические механизмы такой трансформации.

Согласно задачам, изложенным в документе «Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года» (утв. Президентом РФ 30 апреля 2012 г.), формирование экологической культуры, развитие экологического образования и воспитания является достижением стратегической цели государственной политики в области экологического развития. Разговор о теоретических и практических проблемах экопсихологии перестает быть экзотическим и необязательным, если вспомнить, что вопросы, поднимаемые ею, влияют на продолжительность жизни человека [7].

Унифицированность входного уровня экологической готовности может, с одной стороны, рассматриваться как свидетельство эффективности системы общего экологического образования, с другой – указывать на необходимость дифференцированных педагогических стратегий формирования эковолонтерской идентичности уже в первые месяцы обучения в вузе [8].

Реальности не могут мыслиться автономно друг от друга и, являясь составными частями экопсихологии, стабилизируют бытие человека в сложившихся условиях окружающей среды [9, с. 9]. Человек и его субъективность находятся на первом месте и играют роль определяющего обстоятельства в формировании типа поведения по искоренению загрязнения среды [10, с. 84]. То, что раньше было нормой, сегодня становится отправным пунктом для целой совокупности существенных действий, деформации окружающей среды до такой степени, что она становится непригодной для жизни.

Специфика экопсихологии выражается в том, что человек и есть элемент среды, на которую пытается обоснованно воздействовать. И поскольку психология экологическая, то, используя внутренний мир человека, она направляет свои усилия на решение экологических проблем [11]. Таким образом, чтобы понять внутренний мир отдельного человека, нужно понять закономерности внешнего мира [12, с. 38; 13]. Причем особенность заключается в том, что влияние взаимообусловлено: влияя на внешний мир, человек с необходимостью влияет на внутренний мир, а это значит, что в экопсихологии [9, с. 24] имеет место двойная детерминация, касающаяся внешнего и внутреннего. Такого рода детерминация дает о себе знать и в правовом отношении во всем, что касается экологической психологии [14, с. 103; 15]. Это и сложность, и ключ к успеху.

Практическая значимость результатов эмпирического исследования состоит в обосновании целесообразности разработки единой межвузовской программы развития эковолонтерской активности, поскольку выравненность стартовых позиций создает благоприятные условия для реализации сетевых экологических проектов с участием студентов нескольких университетов.

Перспективы дальнейшего исследования связаны с изучением динамики готовности на протяжении первого года обучения в рамках лонгитюдного дизайна, а также с анализом роли конкретных педагогических условий и внеаудиторных мероприятий в формировании эковолонтерской направленности личности студента.

Выводы

1. Результаты эмпирического исследования свидетельствуют о том, что опрошенные студенты первого курса трех вузов демонстрируют высокий уровень экологической осведомленности и поддерживает идею развития системы эковолонтерской деятельности в структуре экопсихологии. Более двух третей респондентов (67,6 % студентов) считают необходимым создание такой системы. При этом фактический опыт участия в эковолонтерских проектах остается низким (около 25 % имеют хотя бы минимальный опыт), что указывает на существование разрыва между декларируемыми установками и реальным поведением. Значительная часть опрошенных студентов

(более 55 %) воспринимает экологическую проблематику как объединяющий фактор, а экологическую культуру – как актуальный тренд.

2. Почти 60 % респондентов признают наличие экологических проблем в своих регионах, требующих немедленного решения. Около 75 % опрошенных студентов в той или иной степени применяют экологически направленные практики в повседневной жизни. Данные указывают на актуальность изучения экологических установок молодежи и условий вовлечения в эковолонтерство и указывают на высокий потенциал вовлечения студентов в экологическую деятельность при условии создания доступных и привлекательных форматов участия.

3. Экопсихология – новая наука, которая возникает на пересечении психологии и экологии и концентрирует в себе проблемы экологического и психологического знания.

4. Одна из важнейших проблем – это приоритет экологии или психологии в научной программе дисциплины. Субъективная или объективная сторона обладает наибольшей важностью для решения поставленных вопросов.

5. Экопсихология становится правопреемницей всех тех проблем, которыми занимается экология.

6. Экопсихология организует исследования внутреннего и внешнего мира человека.

Список литературы

1. Ясвин В. А. Формирование теории среды развития личности в отечественной педагогической психологии // Психология. Журнал Высшей школы экономики. 2020. Т. 17. № 2. С. 295–314. DOI: 10.17323/1813-8918-2020-2-295-314.

2. Калита М. М., Коледенкова Ю. А. Психоэкология или экопсихология? Психологические аспекты профессии эколога // Экология производства. 2024. № 5 (238). С. 112–119. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=67224896 (дата обращения: 11.05.2026).

3. Тихончук Г. Н. От житейской и научной экопсихологии к экологическому сознанию в системе образования // Веснік Магілеўскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А. А. Куляшова. Серыя В. Прыродазнаўчыя навукі: матэматыка, фізіка, біялогія. 2020. № 1 (55). С. 103–106. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_010325441/ (дата обращения: 11.05.2026).

4. Лылова О. В. Особенности современного экологического волонтерства // Economics: Yesterday, Today and Tomorrow. 2022. Vol. 12. Is. 4A. URL: http://www.publishing-vak.ru/file/archive-economy-2022-4/b18-lylova.pdf (дата обращения: 03.06.2026) DOI: 10.34670/AR.2022.13.22.025.

5. Панюкова Ю. Г. Методический потенциал отечественной экопсихологии // Экопоэзис: экогуманитарные теория и практика. 2022. Т. 3. № 1. С. 43–48. URL: https://ecopoiesis.ru/aktualnoe/news_post/panyukova-yu-g-metodicheskij-potencial-otechestvennoj-ekopsihologii?ysclid=mq67hgin1r854335759 (дата обращения: 05.06.2026).

6. Залевский Г. В., Кузьмина Ю. В. Экологическая психология: проблемы экологического здоровья // Психология в экономике и управлении. 2012. № 1. С. 17–20. URL: http://journalpsy.bgu.ru/reader/archive.aspx?id=360 (дата обращения: 23.05.2026).

7. Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года (утв. Президентом РФ 30 апреля 2012 г.). URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70069264/ (дата обращения: 23.05.2026).

8. Панюкова Ю. Г. Отечественная экопсихология: направления исследований и методический инструментарий. М.; СПб.: Нестор-История, 2020. 312 с. ISBN 978-5-4469-1738-9.

9. Александрова Е. С., Лидская Э. В., Лопухова О. Г., Мдивани М. О., Панов В. И., Панюкова Ю. Г., Суннатова Р. И., Шумакова Н. Б. Экологичность поведения: человек и окружающая среда: коллективная монография [Электронное издание] / отв. ред. Ю. П. Зинченко и В. И. Панов. М.: ФНЦ ПМИ, 2023. 147 с. [Электронный ресурс]. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=54951088 (дата обращения: 15.05.2026). ISBN 978-5-6048727-6-5.

10. Ясвин В. А. Исследования образовательной среды в отечественной психологии: от методологических дискуссий к эмпирическим результатам // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Философия. Психология. Педагогика. 2018. Т. 18. № 1. С. 80–90. URL: https://phpp.sgu.ru/ru/articles/issledovaniya-obrazovatelnoy-sredy-v-otechestvennoy-psihologii-ot-metodologicheskih (дата обращения: 18.05.2026). DOI: 10.18500/1819-7671-2018-18-1-80-90.

11. Молодиченко Т. А. Эколого-психологические факторы цифровизации образования // Гуманизация образовательного пространства: материалы Международного форума. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 2021. С. 355–361. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=47571300 (дата обращения: 12.05.2026).

12. Панов В. И. Экологическая психология: направления и тенденции // Экопоэзис: экогуманитарные теория и практика. 2020. Т. 1. № 1. С. 36–44. DOI: 10.24412/2713-1831-2020-1-36-44.

13. Панов В. И. Экопсихологические взаимодействия: виды и типология // Социальная психология и общество. 2013. № 3. С. 13–27. URL: https://psyjournals.ru/journals/sps/archive/2013_n3/62122 (дата обращения: 12.05.2026).

14. Ракчеева Ю. А. Экологическое волонтерство в России. Правовые основы // Вопросы науки и образования. 2018. № 2 (14). С. 101–108. URL: https://scientificpublication.ru/images/PDF/2018/14/Questions-of-science-and-education-2-14.pdf (дата обращения: 02.04.2026).

15. Захарова В. А. Экологизация социального поведения и формирование экологической культуры современной российской молодежи в контексте развития гражданского общества // Гуманитарий Юга России. 2020. Т. 9. № 1. С. 178–187. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=42618939. DOI: 10.19181/2227-8656.2020.1.13.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 372.881.111.1:378.147
DOI 10.17513/snt.40841

CC BY 4.0

ДИДАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЧАТ-БОТОВ В ЯЗЫКОВОМ ОБРАЗОВАНИИ

Демиденко К. А. ORCID ID 0000-0001-9177-8886,
Рольгайзер А. А. ORCID ID 0000-0002-5040-5941

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет», Кемерово, Российская Федерация, e-mail: rolgayzer_nastya@mail.ru

В условиях цифровой трансформации образования остро встает вопрос о поиске новых, более гибких подходов к обучению. В данном контексте особенно перспективным выглядит изучение возможностей чат-ботов на основе искусственного интеллекта, поскольку они способны не только адаптировать учебные материалы под каждого обучающегося, но и способствовать развитию различных видов речевой деятельности. Цель настоящего исследования – оценить дидактический потенциал чат-ботов и определить перспективы их использования в языковом образовании. В работе описывается эксперимент по интеграции чат-ботов в дисциплину «Иностранный язык» при обучении студентов-первокурсников неязыковых специальностей и направлений подготовки в вузе, приводятся результаты опроса по удовлетворенности работой с чат-ботами. Авторами разработаны учебные промпты, позволяющие отрабатывать лексические, грамматические, орфографические и фонетические навыки иноязычной речи. На основе результатов проведенного исследования сформулированы рекомендации по внедрению гибридной формы обучения в процесс преподавания иностранного языка в вузе, включающие необходимость специализированных цифровых навыков у преподавателей, написание промпта, не допускающего двойного толкования условий задания, и оставление финальной контролирующей функции за преподавателем.

Ключевые слова: искусственный интеллект, чат-бот, образовательный процесс, языковое образование, образовательные ресурсы

DIDACTIC ASPECTS OF USING CHATBOTS IN TEACHING FOREIGN LANGUAGES

Demidenko K. A. ORCID ID 0000-0001-9177-8886,
Rolgayzer A. A. ORCID ID 0000-0002-5040-5941

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kemerovo State University", Kemerovo, Russian Federation, e-mail: rolgayzer_nastya@mail.ru

In the era of digital transformation of education, the need to find new, more flexible approaches to learning has become increasingly pressing. In this context, the study of the capabilities of AI-powered chatbots looks particularly promising. They are able not only to adapt educational materials for each student, but also to promote the development of various types of language skills. The purpose of this study is to evaluate the didactic potential of chatbots and determine the prospects for their use in language education. The paper describes an experiment on the integration of chatbots into a foreign language course when teaching first-year students of non-linguistic specialties and fields of study at a university, and presents the results of a survey on satisfaction with working with chatbots. The authors have developed educational prompts that make it possible to practice the lexical, grammatical, spelling and phonetic skills. Based on the results of the study, recommendations have been formulated for the introduction of a hybrid form of education in the process of teaching a foreign language at a university: the need for specialized digital skills among teachers, writing a prompt that does not allow double interpretation of the terms of the assignment, and leaving the final supervising function to the teacher.

Keywords: artificial intelligence, chatbot, teaching process, language education, educational resources

Введение

В эпоху цифровизации образовательного процесса активное внедрение искусственного интеллекта (ИИ) становится не только трендом, но и необходимостью. Искусственный интеллект представляет собой мощный инструмент, способный радикально трансформировать систему образования. Так, например, проблема статичности и недостатка индивидуализации, существующая в рамках традиционной системы образования, может быть решена с помощью систем ИИ, которые способны создавать более гибкие и адаптивные модели обучения, отвечающие современным технологическим трендам и индивидуальным потребностям обучающихся [1; 2].

Наиболее востребованными инструментами ИИ в сфере высшего образования становятся чат-боты, открывающие новые возможности для персонализации обучения, повышения доступности и эффективности

учебного процесса, что делает их неотъемлемой частью современной образовательной среды [3; 4]. Благодаря применению технологий ИИ и машинного обучения, они способны обучаться и адаптироваться к запросам и предпочтениям пользователей, обеспечивая более точные и релевантные ответы с течением времени [5, с. 178].

Адаптивное обучение и персонализация через использование чат-ботов представляют собой передовой подход в образовательной практике, центрирующийся на индивидуальных потребностях и скорости обучения каждого обучающегося [6]. Чат-боты способны предложить каждому пользователю уникальный образовательный путь, максимально адаптированный под его индивидуальные особенности и требования [7]. Кроме того, применение чат-ботов в образовательном процессе упрощает доступ к образовательным ресурсам для обучающихся с ограниченными возможностями здоровья, сталкивающихся с барьерами в обучении из-за нарушений зрения, слуха или других физических ограничений, обеспечивая тем самым создание более инклюзивной и справедливой образовательной среды [8, с. 1445].

А. П. Авраменко считает распознавание речи важнейшей функцией чат-ботов, подчеркивая их способность развивать коммуникативные навыки, что является одной из первостепенных задач при обучении иностранному языку. Обучающиеся получают возможность вести беседу в комфортной обстановке, не боясь делать ошибки, тем самым погружаясь в уникальную обучающую среду, к которой ошибка является частью учебного процесса, а не коммуникативным барьером [9].

Е. В. Бурина отмечает, что внедрение технологий ИИ в практику обучения иностранным языкам обеспечивает ряд методических преимуществ. Чат-боты помогают развивать как продуктивные, так и рецептивные речевые навыки. Кроме того, возможна генерация различного типа заданий, таких как ответы на вопросы, составление диалогов и др. [10]. По мнению П. И. Лобеевой, использование чат-ботов способствует более эффективному формированию лексико-грамматических навыков благодаря методу контекстного обучения [11, с. 1282].

В условиях цифровизации образования генеративные модели ИИ становятся эффективным инструментом, позволяющим разрабатывать множество вариантов тестовых заданий за короткий период времени, что не только расширяет набор методических материалов, но и способствует проведению персонализированного контроля знаний обучающихся [12]. Чат-боты автоматизируют процесс создания не только тестов, но и других дидактических ресурсов, таких как упражнения, рабочие листы, сценарии занятий.

В свою очередь, П. В. Сысоев и Е. М. Филатов акцентируют внимание не только на преимуществах, но и затрагивают спорные и проблемные аспекты применения чат-ботов в языковом образовании. Важным является положение о том, что внедрение в образовательный процесс ИИ должно сопровождаться осмыслением потенциальных рисков, связанных с утратой критического мышления и навыком межличностного общения [13]. При этом на первое место выходит необходимость обучения грамотному использованию ИИ в образовательных целях, а запрет на применение чат-ботов в учебном процессе представляется неэффективным [14, с. 238].

Как отмечает М. В. Якутина, одна из актуальных задач преподавателя – научить студентов использовать ИИ, критически оценивать его результаты и осознавать ценность собственного вклада [15, с. 124].

Цель исследования – оценить дидактический потенциал чат-ботов и определить перспективы их использования в языковом образовании.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Проанализировать современные подходы к применению ИИ в образовании.

2. Разработать задания для интеграции систем ИИ (чат-ботов) в процесс обучения иностранному языку студентов неязыковых специальностей и направлений подготовки.

3. Провести педагогический эксперимент по внедрению разработанных заданий в учебный процесс.

4. Провести опрос среди участников эксперимента для оценки их удовлетворенности обучением с применением чат-ботов.

Изучение и анализ данных вопросов позволяют определить условия и ограничения, при которых использование ИИ будет наиболее эффективным и безопасным. Перспективу для решения данной проблемы открывает разработка более сложных и адаптивных систем ИИ, которые могут учитывать индивидуальные особенности обучающихся, а также интеграция ИИ с традиционными методами обучения для создания гибридных образовательных моделей.

Научная новизна заключается в том, что в настоящем исследовании представлен комплекс коммуникативных упражнений, направленных на развитие различных видов речевой деятельности, что позволяет оценить их многофункциональный дидактический потенциал. В отличие от работ,

рассматривающих чат-боты как разговорные или справочные цифровые инструменты [9–11], предлагаемый подход предполагает их интеграцию в целостную систему упражнений.

Материалы и методы исследования

В рамках данного исследования был использован комплекс эмпирических методов, направленных на выявление дидактического потенциала чат-ботов при обучении иностранному языку студентов неязыковых специальностей и направлений подготовки. На первом этапе проведен педагогический эксперимент, направленный на внедрение технологий ИИ в практику обучения иностранному языку. Для эксперимента были выбраны три группы первокурсников неязыковых специальностей и направлений подготовки (всего 54 чел.). В ходе практических занятий студентам предлагалось выполнять лексические и грамматические задания при помощи чат-ботов.

При проведении эксперимента использовались современные генеративные модели на базе искусственного интеллекта GPT, Perplexity, DeepSeek, Deep English, позволяющие обучающимся выполнять задания на все виды речевой деятельности: чтение, письмо, говорение и аудирование. Для максимальной точности и однозначности формулировок задания были сформулированы преподавателем, проводившим эксперимент, а промпты прописаны чат-ботом и вновь обработаны человеком.

Для анализа эффективности разработанных заданий и определения отношения обучающихся к внедрению чат-ботов в образовательный процесс был проведен опрос участников эксперимента, включавший вопросы об удовлетворенности предложенным форматом обучения и степени достижения поставленных образовательных целей. При формулировании вопросов особое внимание уделялось таким критериям, как комфортность взаимодействия с чат-ботами, оценка влияния чат-ботов на языковые компетенции и формирование мотивации к изучению иностранного языка, а также выявлению основных барьеров, с которыми сталкиваются обучающиеся в процессе взаимодействия с чат-ботами.

Результаты исследования и их обсуждение

Разработанный комплекс коммуникативных упражнений представляет собой систему, последовательно охватывающую все виды речевой деятельности. Предложенные задания логически взаимосвязаны и объединены общей целью – развить иноязычную коммуникативную компетенцию обучающихся. Коммуникативный характер упражнений обеспечивается за счет моделирования ситуаций реального общения, использования аутентичных речевых образцов и интерактивной обратной связи со стороны чат-бота.

На практических занятиях предлагались следующие задания (ниже приведены примеры шаблонов промптов):

1. Лексическая викторина (в промпте предлагается тема либо конкретные слова и словосочетания, которые должны стать ответами на вопросы чат-бота).

Например, промпт на отработку лексического материала по теме «Анатомия»:

Побудь моим репетитором по английскому языку. Мы изучаем новую лексику: endocrine system, digestive system, urinary system, muscles, skeleton, respiratory system, nervous system, brain, stomach, circulatory system. Задай вопросы, ответами на которые будет одно из этих слов или словосочетаний. Предложи мне несколько вариантов ответа, один из которых правильный. Прежде чем задать следующий вопрос, дождись ответа, оцени его корректность. Если ответ неправильный, задай другой вопрос к тому же слову. В вопросах избегай однокоренных с ответом слов.

2. Чат-бот генерирует предложения, в которые надо вставить глагол-сказуемое в нужной видовременной форме и в соответствующем залоге.

Например, промпт для отработки грамматической темы «Видовременные формы глагола»:

Сгенерируй 10 предложений на английском языке на тему «Современное искусство» с разными видовременными формами и залогами глаголов-сказуемых. Сами глаголы возьми в скобки и поставь в начальную форму. Мне будет нужно восстановить правильную форму глагола. Оцени мой ответ, скорректируй ошибки, если они будут, и объясни применение нужной формы и залога глагола. Обратная связь должна быть на русском языке. После каждого предложения делай паузу, чтобы я мог выполнить задание и прочитать твою обратную связь.

3. Перевод фраз и предложений, генерируемых чат-ботом, с русского на английский язык и наоборот. Для работы использовался следующий промпт:

Побудь моим репетитором по английскому языку. Я хочу потренироваться с заданием делать переводы на тему …, мой уровень языка – B1.

Правила:

Ты даешь мне фразу на русском, я перевожу её на английский. Далее ты даешь

фразу на английском, я перевожу на русский. После каждого моего ответа проверяй его, исправляй ошибки и объясняй их.

4. Повторение фразы на английском языке за чат-ботом. Промпт:

Побудь моим репетитором по английскому произношению. Мой уровень – B1. Я хочу позаниматься по методу «Теневой повтор».

Правила:

Ты произносишь на английском языке фразу по теме…, я повторяю ее за тобой, обращая внимание на произношение и интонацию. Типы предложений должны чередоваться: повествовательное, отрицательное, вопросительное. Если я допущу ошибки, прокомментируй их, указав на какие звуки мне следует обратить внимание. Затем позволь мне повторить предложение еще раз.

5. Чат-бот задает тему и предлагает первую фразу, обучающийся продолжает рассказ. Предлагаемый промпт:

Побудь моим репетитором по английскому языку. Мой уровень – B1. Я хочу потренироваться с заданием «История по цепочке».

Правила:

Я задаю тему истории, ты пишешь первое предложение. Я продолжаю. После моего ответа исправь мои ошибки при их наличии и добавь следующее предложение. Мы с тобой будем продолжать этот цикл, пока история не придёт к логическому завершению.

6. Обучающийся и чат-бот в устной форме разыгрывают диалог по ситуации. Промпт:

Побудь моим партнером для разговорной практики английского языка. Мой уровень – B1. Я хочу пообщаться голосом.

Правила:

Мы разыгрываем диалог на тему: … . Моя роль: … . Твоя роль: … . Говори в умеренном темпе, используй простые, разговорные фразы. После завершения диалога разбери мои ошибки, дай советы, как можно улучшить речь, какие темы нужно повторить.

7. Чат-бот предлагает предложение на заданную тему с намеренно допущенной ошибкой, которую нужно исправить обучающимся. Промпт:

Побудь моим репетитором английского языка. Мой уровень – B1. Давай сделаем упражнение «Найди ошибку».

Правила:

Ты даешь предложение с одной ошибкой (грамматика, лексика, порядок слов). Я исправляю. Если я допустил ошибку, поправь меня, объясни и дай следующее предложение с ошибкой на ту же тему. После 10 предложений пиши краткую статистику моих ошибок.

После выполнения задания чат-бот дает обратную связь, анализируя корректность использования обучающимся грамматики, лексики (подбор слов, коллокации, использование идиоматических выражений), орфографии, произношения на основе написания (в том случае, если орфографическая ошибка может быть связана с тем, как звучит слово). В случае составления диалога или ролевой игры чат-бот дополнительно оценивает естественность фраз, их соответствие живой речи носителя. Кроме того, в заданиях на говорение оцениваются также произношение и интонация. При необходимости коррекции чат-бот предлагает правильные варианты ответов.

Достижение дидактических целей становится возможным при соблюдении ряда методических условий и четкого определения ролей (преподаватель – чат-бот – обучающийся). При использовании генеративных моделей в учебных целях необходимо, чтобы преподаватель имел соответствующую подготовку и обладал навыками работы с различными моделями чат-ботов. Для разработки заданий важно четко прописать промпт, предусмотреть различные варианты развития ситуации. Наилучший результат при выполнении данной работы достигается в сотрудничестве преподавателя и самого чат-бота. При оценивании результатов работы обучающегося обратная связь от ИИ не может полностью заменить контроль и оценку со стороны преподавателя, следовательно, на данном этапе чат-бот и человек снова взаимодействуют.

Анализ ответов участников эксперимента показал, что для 39 % респондентов общение с чат-ботом было очень удобным, для 57 % – удобным, а для 4 % – нейтральным. 78 % обучающихся отметили, что занятия с чат-ботом помогли им улучшить знания английского языка. При работе с чат-ботами у 68 % опрошенных не возникло никаких трудностей. 15 % опрошенных указали на сложность в понимании формулировок вопросов, 10 % оказалось сложно сформулировать ответы, а у 7 % возникли технические трудности. 23 % обучающихся отметили, что выполнение заданий с использованием чат-ботов помогло им совершенствовать такие виды речевой деятельности, как чтение, письмо, говорение и аудирование, лишь в некоторой степени, 77 % – что очень сильно. Таким образом, большая часть участников эксперимента отмечает высокую эффективность данного цифрового инструмента при совершенствовании различных видов речевой деятельности.

Большинство (71 %) опрошенных отметили, что работа с чат-ботом помогла значительно снизить уровень тревожности

при изучении иностранного языка, у 23 % снижение было незначительным, а у 6 % отсутствовало вовсе. Кроме того, 81 % обучающихся отметили значительное повышение мотивации к изучению языка. Таким образом, по мнению участников эксперимента, обучение иноязычной компетенции с применением чат-ботов способствует снижению психологического барьера, создает коммуникативную среду, максимально приближенную к реальному речевому взаимодействию. Кроме того, отсутствие оценочного суждения со стороны чат-бота и возможность многократного повторения учебного материала создают комфортную среду для обучения.

Подавляющее большинство респондентов (78 %) полностью согласны с тем, что чат-бот создал безопасную и комфортную среду для изучения и практики иностранного языка, в то время как 22 % скорее согласны, чем нет.

Среди основных трудностей, с которыми сталкивались обучающиеся в процессе работы с чат-ботами, отмечались временные сложности с подключением, крайне редкая необходимость уточнять промпт, 2 чел. пожаловались на проблемы с самоорганизацией.

Заключение

Чат-боты на основе генеративного искусственного интеллекта являются перспективной образовательной технологией, позволяющей создавать гибридные модели обучения. Применение данного инновационного подхода на занятиях по иностранному языку в вузе делает образовательный процесс не только более интерактивным и мотивирующим, но и представляет собой эффективный методический инструмент для развития различных видов речевой деятельности.

Разработанные и апробированные в ходе педагогического эксперимента задания с применением чат-ботов продемонстрировали свою результативность, что подтверждает их высокий дидактический потенциал при обучении иностранному языку. Однако эффективность их использования напрямую зависит от цифровой компетентности преподавателя и четкости разработанных промптов.

Список литературы

1. Трегубов В. Н. Использование технологий искусственного интеллекта для дистанционного обучения // Известия Саратовского университета. 2021. Т. 21. Вып. 2. С. 222–227. DOI: 10.18500/1819-7671-2021-21-2-222-227.

2. Федорова Я. Е. Архитектура смешанного обучения: российский опыт интеграции традиционных и цифровых педагогических подходов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Гуманитарные науки. 2025. № 7–2. С. 144–146. DOI: 10.37882/2223-2982.2025.07-2.41.

3. Лю С. Применение чат-ботов на основе искусственного интеллекта для персонализированного обучения иностранным языкам // Международный научно-исследовательский журнал. 2025. № 5 (155). DOI: 10.60797/IRJ.2025.155.58.

4. Кочеткова О. А., Митрохин М. А. Чат-бот для сферы образования // Инжиниринг и технологии. 2023. Т. 8 (2). С. 1–3. DOI: 10.21685/2587-7704-2023-8-2-5.

5. Турутина Е. Э., Ситников С. Ю., Алиева М. В. Адаптивные ИИ-системы для персонализированного профессионального обучения // Журнал прикладных исследований. 2025. № 6. С. 177–180. DOI: 10.47576/2949-1878.2025.6.6.024.

6. Кравченко Д. А., Блескина И. А., Каляева Е. Н., Землякова Е. А., Аббакумов Д. Ф. Персонализация в образовании: от программируемого к адаптивному обучению // Современная зарубежная психология. 2020. № 3. С. 34–46. DOI: 10.17759/jmfp.2020090303.

7. Заславский А. А. Иерархическая структура способов применения чат-ботов при автоматизации построения индивидуальных образовательных траекторий. 2022. № 2 (60). С. 86–94. DOI: 10.25688/2072-9014.2022.60.2.08.

8. Черкасова Е. А. Дидактические и методические функции чат-ботов в обучении студентов нелингвистических направлений подготовке иноязычной грамматике // Вестник Тамбовского университета. 2023. № 6. С. 1443–1451. DOI: 10.20310/1810-0201-2023-28-6-1443-1451.

9. Авраменко А. П. Лингводидактический потенциал чат-ботов и виртуальных помощников как средств распознавания речи технологиями искусственного интеллекта // Мир науки, культуры, образования. 2022. № 3 (94). С. 9–11. DOI: 10.24412/1991-5497-2022-394-9-12.

10. Бурина Е. В. Лингводидактический потенциал технологий искусственного интеллекта для обучения иностранным языкам // Мир науки, культуры, образования. 2023. № 6 (103). С. 323–326. DOI: 10.24412/1991-5497-2023-6103-323-326.

11. Лобеева П. И. Методическая модель обучения фразовым глаголам английского языка с использованием чат-ботов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки. 2024. Т. 29. № 5. С. 1275–1289. DOI: 10.20310/1810-0201-2024-29-5-1275-1289.

12. Плохотнюк О. С. Особенности разработки вариативных тестовых заданий с использованием чат-бота с искусственным интеллектом ChatGPT в обучении будущих педагогов иностранному языку // Вестник МГПУ. Серия: Информатика и информатизация образования. 2023. № 3 (65). С. 107–115. DOI: 10.25688/2072-9014.2023.65.3.10.

13. Сысоев П. В., Филатов Е. М. Чат-боты в обучении иностранному языку: преимущества и спорные вопросы // Вестник Тамбовского университета. 2023. Т. 28. № 1. С. 66–72. DOI: 10.20310/1810-0201-2023-28-1-66-72.

14. Воевода Е. В., Шпынова А. И. Применение технологий искусственного интеллекта при изучении делового английского (на примере письменных заданий) // Мир науки, культуры и образования. 2023. № 5 (102). С. 237–240. DOI: 10.24412/1991-5497-2023-5102-237-240.

15. Якутина М. В. Искусственный интеллект в обучении студентов: преимущества, вызовы и этические аспекты // Гуманитарий Юга России. 2025. Т. 14. № 5. С. 115–126. DOI: 10.18522/2227-8656.2025.5.8.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 378.147:378.661:004.383.8
DOI 10.17513/snt.40842

CC BY 4.0

ТЕХНОЛОГИЯ ОБУЧЕНИЯ БУДУЩИХ ВРАЧЕЙ РЕШЕНИЮ КЛИНИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЗАДАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Диденко Г. А. ORCID ID 0000-0003-4117-7294,
Касюк С. Т. ORCID ID 0000-0001-6760-750X,
Степанова О. А. ORCID ID 0000-0002-9977-5628

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Челябинск, Российская Федерация, e-mail: okalst@mail.ru

Одним из приоритетных направлений развития медицинского образования является интеграция искусственного интеллекта (ИИ) в процесс подготовки будущих врачей. Важно обеспечить формирование у обучающихся готовности к применению методов машинного обучения для решения реальных диагностических и прогностических задач. В настоящей работе представлена технология обучения будущих врачей решению клинико-ориентированных заданий с применением методов машинного обучения, изучаемых студентами Южно-Уральского государственного медицинского университета. Цель работы – раскрыть технологию обучения будущих врачей решению клинико-ориентированных заданий с применением методов машинного обучения, реализованных на языке программирования Python с использованием библиотек scikit-learn и Keras в рамках изучения дисциплины «Применение методов искусственного интеллекта в медицинских исследованиях». Методологическая база исследования базируется на положениях системного, компетентностного, личностно-деятельностного и интегративного подходов. Предложенная технология обучения будущих врачей решению клинико-ориентированных заданий с применением методов машинного обучения включает в себя целевой, содержательный, процессуально-методический и диагностико-оценочный блоки. Разработанная технология обучения будущих врачей решению клинико-ориентированных заданий с применением методов машинного обучения обеспечивает практико-ориентированное освоение методов машинного обучения, формирование ИИ-компетенций у будущих врачей.

Ключевые слова: технология обучения, метод комментированного кода, клинико-ориентированные задания, интегративный подход, компетентностный подход, деятельностный подход, искусственный интеллект в медицине, машинное обучение, программирование на Python

A PEDAGOGICAL APPROACH TO TRAINING MEDICAL STUDENTS IN CLINICAL PROBLEM-SOLVING USING MACHINE LEARNING

Didenko G. A. ORCID ID 0000-0003-4117-7294,
Kasyuk S. T. ORCID ID 0000-0001-6760-750X,
Stepanova O. A. ORCID ID 0000-0002-9977-5628

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "South Ural State Medical University" of the Ministry of Health of the Russian Federation, Chelyabinsk, Russian Federation, e-mail: okalst@mail.ru

Integrating artificial intelligence (AI) into healthcare professional training is a priority in advancing medical education. Particular attention is given to fostering students' ability to leverage machine learning techniques for solving practical diagnostic and prognostic tasks. This paper presents a pedagogical approach for training medical students to solve clinically-oriented tasks using machine learning, as implemented with students at South Ural State Medical University. The aim of this study is to detail a pedagogical approach for training medical students in clinical problem-solving using machine learning. The approach employs Python with scikit-learn and TensorFlow libraries within the course "Application of AI Techniques in Medical Research". The methodological framework of the study is grounded in the principles of the systems, competency-based, activity-based, and integrative approaches. The proposed approach for training future physicians to solve clinically-oriented tasks using machine learning comprises four components: goal-oriented, content-based, process-methodological, and diagnostic-evaluative blocks. The developed technology for teaching future doctors to solve clinical-oriented tasks using machine learning methods provides a practice-oriented learning of machine learning methods and the development of AI competencies in future doctors.

Keywords: pedagogical approach, annotated code method, clinically-oriented tasks, integrative approach, competency-based approach, activity-based approach, AI in medicine, machine learning, Python programming

Введение

В настоящее время обучающиеся Южно-Уральского государственного медицинского университета (ЮУГМУ), обучаясь на кафедре математики, медицинской информатики, информатики и статистики, физики, изучают методы машинного обучения в контексте их реализации в медицинских исследованиях. В рамках требований федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению специалитета 31.05.01 Лечебное дело, утвержденного приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 12 августа 2020 г. № 988[1], была разработана и внедрена новая дисциплина «Применение методов искусственного интеллекта в медицинских исследованиях». Преподаватели кафедры, опираясь на практический опыт, осуществляют совместные исследования в области интеграции искусственного интеллекта в учебный процесс медицинского университета, в том числе направленные на разработку технологии обучения будущих врачей решению клинико-ориентированных заданий с применением методов машинного обучения в курсе дисциплин по искусственному интеллекту (ИИ-дисциплин).

Цель исследования – обосновать технологию обучения будущих врачей решению клинико-ориентированных заданий с применением методов машинного обучения, реализованных на языке программирования Python, в рамках дисциплины «Применение методов искусственного интеллекта в медицинских исследованиях». В контексте дисциплины обучающимся предложена реализация основных методов машинного обучения на языке Python: классификация числовых данных с использованием ансамблевых методов; классификация числовых и категориальных данных с использованием нейронных сетей; распознавание медицинских изображений с использованием сверточных нейронных сетей; обработка клинических текстов.

Материалы и методы исследования

Методологическая база исследования базируется на идеях следующих подходов:

1. Системного подхода, ориентирующего на разработку технологии обучения будущих врачей решению клинико-ориентированных заданий как целостной педагогической системы, включающей ряд ее структурных компонентов – блоков с определенным содержанием и выполняемыми функциями [1, с. 108; 2, с. 48].

2. Компетентностного подхода, позволяющего осуществить проектирование технологии обучения будущих врачей решению клинико-ориентированных заданий в логике ориентации на конечные образовательные результаты – сформированные ИИ-компетенции обучающихся медицинского вуза [3; 4].

3. Личностно-деятельностного подхода, как научного обоснования выбора системы клинико-ориентированных заданий, обеспечивающей формирование ИИ-компетенций и развития личности обучающегося [5, с. 243; 6, с.115].

4. Интегративного подхода, который позволяет рассматривать технологию обучения будущих врачей решению клинико-ориентированных заданий с применением методов машинного обучения как педагогическую систему, объединяющую содержание медицинских и ИИ-дисциплин и обеспечивающую синтез межпредметных знаний [7; 8].

Для реализации цели исследования были использованы следующие методы: анализ научно-педагогической литературы, нормативных документов по проблеме исследования, классификация, систематизация информации, анализ и сравнение методов машинного обучения [9–11].

Результаты исследования и их обсуждение

Технология обучения будущих врачей решению клинико-ориентированных заданий – это структурированная педагогическая система, основанная на блочном принципе и направленная на формирование у будущих врачей компетенций в области искусственного интеллекта и анализа клинических данных. Технология включает в себя *целевой, содержательный, процессуально-методический и диагностико-оценочный блоки. Блочный принцип структурирования технологии выбран исходя из того, что он фиксирует линейный порядок реализации: сначала определяется цель, затем отбирается содержание, после выстраивается процесс с методическим сопровождением, и только на завершающем этапе проводится диагностика и оценка.*

Целевой блок включает цель, задачи и планируемые результаты деятельности обучающихся, ориентированные на формирование у обучающихся компетенций в области искусственного интеллекта.

[1] Приказ Министерства науки и высшего образования РФ от 12 августа 2020 г. № 988 «Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования – специалитет по специальности 31.05.01 Лечебное дело» (с изм. и доп. от 26 ноября 2020 г., 19 июля 2022 г., 27 февраля 2023 г.) [Электронный ресурс]. URL: https://fgos.ru/fgos/fgos-31-05-01-lechebnoe-delo-988/ (дата обращения: 12.03.2026).

Содержательный блок представлен теоретической базой и системой клинико-ориентированных заданий, в которых с помощью методов машинного обучения моделируются реальные клинические ситуации. В процессе освоения ИИ-дисциплины обучающиеся изучают основы работы с языком программирования Python, интерактивными средами выполнения кода PyCharm Community Edition и Google Colab, знакомятся с библиотеками Pandas, NumPy и Matplotlib. На практических занятиях обучающимся предложена реализация основных методов машинного обучения с помощью системы клинико-ориентированных заданий, в которых выполняется обработка открытых наборов медицинских данных (Heart, Diabetes, Breast Cancer и др.).

Процессуально-методический блок включает дидактические этапы выполнения клинико-ориентированных заданий с помощью машинного обучения и методы его реализации. Например, метод комментированного кода, при котором каждый шаблон программы на Python выступает как дидактический инструмент для освоения сложного технического материала. Шаблоны программ снабжены подробными комментариями, объясняющими назначение команд и функций, математический смысл параметров; клиническую интерпретацию выходных данных и рассчитанных метрик [12–14]. Выполнение клинико-ориентированных заданий с помощью машинного обучения включает в себя следующие дидактические этапы (табл. 1).

Диагностико-оценочный блок технологии обучения будущих врачей решению клинико-ориентированных заданий с применением методов машинного обучения включает диагностические критерии, методы для измерения глубины освоения знаний, отработки ИИ-навыков и механизмы обратной связи.

Таблица 1

Дидактические этапы выполнения клинико-ориентированных заданий

Этап	Педагогическая задача	Содержание деятельности студента
1	Формирование навыков работы с реальными клиническими данными	Загрузка и очистка набора медицинских данных
2	Развитие умений визуализации и первичного анализа медицинских данных	Вычисление описательных статистик, корреляционной матрицы, построение гистограмм и диаграмм размаха
3	Освоение принципов валидации ИИ-моделей в медицине. Понимание влияния параметров алгоритмов на качество диагностики	Разделение набора данных на обучающую и тестовую выборки. Конфигурирование параметров классификаторов
4	Формирование представлений о процессе обучения ИИ-систем	Машинное обучение на данных обучающих выборок
5	Умение оценивать надежность ИИ-моделей	Расчет метрик классификации на тестовых выборках
6	Развитие навыков клинической интерпретации результатов работы ИИ	Классификация заболеваний для новых пациентов с вычислением вероятностей принадлежности к классам

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 2

Критерии и показатели апробации

Критерий	Показатель
1. Освоение дидактических этапов работы с клиническими данными и ИИ	Доля студентов, успешно выполнивших все 6 этапов (табл. 1)
2. Качество выполнения клинико-ориентированных заданий	Средний балл за реализацию методов машинного обучения на открытых наборах (Heart, Diabetes и др.)
3. Сформированность ИИ-компетенций	Результаты тестирования по Python, Pandas, NumPy, Matplotlib; правильность интерпретации метрик
4. Удовлетворенность обучением	Оценка студентами методики (анкета, % положительных ответов)
5. Применимость в клиническом контексте	Корректность клинической интерпретации результатов классификации (экспертная оценка)

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Ниже представлены критерии и показатели апробации данной технологии (табл. 2).

Далее остановимся на содержании и реализации этапов машинного обучения в процессе изучения дисциплины «Применение методов искусственного интеллекта в медицинских исследованиях».

Исходными данными для машинного обучения послужили следующие общедоступные медицинские наборы: ***набор Heart***, включающий сведения о 304 пациентах с сердечно-сосудистыми заболеваниями; ***набор Diabetes*** – о 442 пациентах с диабетом; ***набор Breast Cancer Wisconsin (Original)*** – о результатах биопсии 699 пациенток с раком молочной железы; ***набор Parkinsons*** – о голосовых характеристиках 197 пациентов с болезнью Паркинсона и здоровых людей; ***наборы column_3C_weka, column_2C_weka*** – о форме и ориентации таза, поясничного отдела позвоночника 310 пациентов; ***набор Breast Cancer*** – о 286 пациентках с раком молочной железы.

1. Загрузка и очистка наборов данных

Для загрузки данных медицинских наборов используется метод *read_csv* из библиотеки *pandas*. Удаление строк с пропущенными значениями и перезагрузка индекса осуществляется с помощью методов *dropna* и *reset_index* соответственно.

2. Вычисление описательных статистик

Вычисление описательных статистик и корреляционной матрицы осуществляется с помощью методов *describe* и *corr* соответственно из библиотеки *pandas*.

3. Разделение набора данных на обучающую и тестовую выборки

Загруженный набор *df* предварительно разбивают на *выходные данные* (*y*) и *входные данные* (*X*). Для разделения входных и выходных данных данные на о*бучающую* и *тестовую выборки* используется функция *train_test_split* из библиотеки *scikit-learn*, при этом пропорция данных в *тестовой выборке* задается с помощью параметра *test_size*.

4. Машинное обучение на данных обучающих выборок

Для изучения и практической реализации дифференциальной диагностики заболеваний были предложены следующие методы машинного обучения.

Логистическая регрессия позволяет устанавливать связь между *категориальной бинарной переменной* (*y*) и набором *независимых количественных и категориальных переменных* ($x_0, x_1, \ldots x_j$). В результате проведения данного анализа можно получить *модель классификации*, показывающую вероятность принадлежности объекта к одному из двух классов (кодируются 0 и 1). Класс *LogisticRegression* из библиотеки *scikit-learn* позволяет построить *полную модель логистической регрессии*. Для включения в модель логистической регрессии только определенных переменных используется библиотека *statsmodels*.

Метод опорных векторов – это алгоритм машинного обучения, используемый для решения задач классификации с учителем, в ходе которого строится гиперплоскость в *n*-мерном пространстве, разделяющая объекты двух или более классов. Класс *SVC* из библиотеки *scikit-learn* позволяет построить модель *методом опорных векторов*.

Метод k-ближайших соседей используется в машинном обучении для решения задач классификации. В основе этого метода лежит идея о том, что объект принадлежит к тому классу, к которому принадлежит большинство его ближайших соседей. Класс *KNeighborsClassifier* из библиотеки *scikit-learn* позволяет построить *модель k*-ближайших соседей. Обучение этой модели осуществляется с помощью метода *fit*.

Дерево решений является древовидной иерархической структурой, осуществляющей классификацию объектов с помощью решающих правил формата «если…, то…». Узлы дерева содержат решающие правила, а листья – объекты, относящиеся только к определенным классам. Класс *DecisionTreeClassifier* из библиотеки scikit-learn позволяет построить модель дерева решений, обучение которой осуществляется с помощью метода fit.

Модель случайного леса (Random Forest Classifier) является алгоритмом машинного обучения, использующим ансамбль решающих деревьев для решения задач классификации. Класс *RandomForestClassifier* из библиотеки *scikit-learn* позволяет построить модель дерева решений. Обучение осуществляется с помощью метода fit.

Модель Stacking – это метод объединения оценок для уменьшения их систематических ошибок. Прогнозы каждой отдельной модели складываются вместе и используются в качестве входных данных для окончательной модели и вычисления прогноза. Класс *StackingClassifier* из библиотеки *scikit-learn* позволяет построить модель *Stacking*, использующую несколько классификаторов (параметр *estimator*) и объединяющую оценки этих классификаторов с помощью параметра *final_estimatores*.

Модель Bagging – это класс алгоритмов в ансамблевых методах, которые создают несколько экземпляров моделей классификаторов на случайных подмножествах исходного обучающего набора, а затем объединяют их отдельные прогнозы для формирования

окончательного прогноза. Класс *BaggingClassifier* из библиотеки *scikit-learn* позволяет построить модель *Bagging*, использующую *n* классификаторов (параметр *n_estimators*) заданного типа (параметр *estimator*).

В полносвязной нейронной сети прямого распространения нейроны каждого слоя соединены со всеми нейронами предыдущего слоя. Типовой задачей для сети этого типа является классификация данных. Класс *MLPClassifier* из библиотеки *scikit-learn* позволяет построить полносвязную нейронную сеть, содержащую заданное количество нейронов на скрытых слоях (параметр *hidden_layer_sizes*) с определенными функциями активации (параметр *activation*) [15].

5. Расчет метрик классификации на тестовых выборках

Для вычисления метрик классификации на тестовой выборке предварительно необходимо предсказать классы заболеваний с помощью функции *logr.predict.* Отчет с основными метриками классификации (*precision*, *accuracy*, *recall* и *F*1-score) выводится с помощью функции *classification_report* из библиотеки *sklearn.metrics.*

6. Классификация заболеваний для новых пациентов

Предсказание классов заболеваний для новых пациентов осуществляется с использованием обученных моделей классификаторов. Для этого предварительно создается *DataFrame* с показателями пациента. Затем, используя метод *predict*, проводится классификация заболевания (*Class_Anne*) и вывод вероятностей (*Probability_estimates*) принадлежности к классам.

Результаты исследования и их обсуждение

Выполнение клинико-ориентированных заданий с помощью предложенных дидактических этапов и шаблонов программ, содержащих технические, математические и клинические комментарии, показали высокую результативность при обработке медицинских данных в ходе практических занятий по дисциплине «Применение методов искусственного интеллекта в медицинских исследованиях».

В результате апробации технологии обучения будущих врачей решению клинико-ориентированных заданий с применением методов машинного обучения получены следующие к*оличественные* результаты: 85 % студентов выполняют все этапы без критических ошибок; средний балл за задания – 4,2 из 5; прирост тестового балла (до/после) – на 30 %; доля студентов, правильно интерпретирующих вероятности принадлежности к классам (клинический вывод), – ≥ 80 %.

Наряду с количественными данными были зафиксированы *качественные* результаты – обучающиеся осознанно используют комментарии в шаблонах кода как дидактическую опору; понимают влияние параметров классификаторов на качество диагностики; способны визуализировать реальные медицинские данные; формируется целостное представление о цикле обучения ИИ-модели в приложении к клинической задаче.

Несмотря на высокие результаты, в процессе внедрения технологии выявлены следующие риски: техническая сложность для медиков, зависимость от инфраструктуры, трудоемкость шаблонов, искусственность данных, линейность, перекос в технические детали, отсутствие клинического эксперта, разный темп обучения. Однако перечисленные риски могут быть минимизированы с помощью вводного модуля Python, использования Google Colab, коллективной разработки шаблонов, добавления шумов в данные, петель обратной связи, клинической формулировки заданий, привлечения ординаторов-тьюторов и дифференцированных заданий с плавающими дедлайнами.

Разработанная технология обучения будущих врачей решению клинико-ориентированных заданий с применением методов машинного обучения является а*даптивной* (метод комментированного кода позволяет обучающимся, не имеющим углубленных навыков программирования, сосредоточиться на интерпретации полученных результатов, а не на технических деталях программирования); *профессионально направленной* (клинико-ориентированные задания повышают мотивацию обучающихся за счет связи с будущей профессией); *универсальной* (может быть адаптирована для любых медицинских специальностей при изучении ИИ-дисциплин) и обеспечивает *формирование критического мышления* у будущих врачей (критическое оценивание результатов систем искусственного интеллекта).

Имплементация учебных ИИ-дисциплин («Основы искусственного интеллекта», «Применение методов искусственного интеллекта в медицинских исследованиях») в образовательный процесс ЮУГМУ стала важным этапом формирования компетенций обучающихся медицинского вуза в области использования искусственного интеллекта.

Заключение

Высокая сложность освоения классификаторов машинного обучения обусловливает необходимость их разбора студентами

медицинского вуза непосредственно в клиническом контексте с использованием готовых шаблонов программ. В дальнейшем студенты адаптируют эти шаблоны под нужные параметры и новые данные, интегрируя технические и клинические знания.

Такой подход позволяет будущим врачам, не имеющим глубоких знаний и навыков программирования, поэтапно строить бинарные, многоклассовые классификаторы и прогнозировать заболевания. Изучение машинных методов формирует фундаментальные знания об искусственном интеллекте и практические навыки использования интеллектуальных систем в диагностике, лечении и профилактике.

Разработанная технология обучения будущих врачей решению клинико-ориентированных заданий с применением методов машинного обучения обеспечивает практико-ориентированное освоение методов машинного обучения, формирование ИИ-компетенций и междисциплинарную интеграцию математической (знание математического смысла параметров), информационной (знание программирования на Python и начальные умения работы с библиотеками) и клинической подготовки (понимание диагностических задач, умения интерпретации результатов).

Список литературы

1. Блауберг И. В. Проблема целостности и системный подход. М.: Эдиториал УРСС, 1997. 448 с. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01004265680 (дата обращения: 23.04.2026). ISBN 5-901006-08-9.

2. Сергеев Н. К. Непрерывное педагогическое образование: концепция и технологии учебно-научно-педагогических комплексов (вопросы теории): монография. СПб.; Волгоград: Перемена, 1997. 166 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21012385 (дата обращения: 20.04.2026).

3. Гельман В. Я., Хмельницкая Н. М. Компетентностный подход в преподавании фундаментальных дисциплин в медицинском вузе // Образование и наука. 2016. № 4. С. 33–46. URL: https://www.edscience.ru/jour/article/view/619/526?locale=ru_RU (дата обращения: 23.04.2026).

4. Куликова Н. Ю., Маслова О. А., Пономарева Ю. С. Модель использования систем искусственного интеллекта для оценки качества формирования компетенций студентов вуза // Мир науки. Педагогика и психология. 2021. № 9 (5). URL: https://mir-nauki.com/33PDMN521.html (дата обращения: 23.04.2026).

5. Выготский Л. С. Мышление и речь. СПб.: Питер, 2019. 431 с. [Электронный ресурс]. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01009875965?ysclid=mp2dsaby5t790284242 (дата обращения: 23.04.2026). ISBN: 978-5-4461-1109-1.

6. Леонтьев А. Н. Деятельность. Сознание. Личность: учеб. пособие. М.: Смысл Academia, 2004. 345 с. [Электронный ресурс]. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01002463700 (дата обращения: 23.04.2026). ISBN: 5-89357-153-3.

7. Кулемзина Т. В., Красножен С. В., Криволап Н. В., Папков В. Е., Моргун Е. И. Интегративный подход как вектор персонализации образовательных практик в медицинском вузе // Профессиональное образование в современном мире. 2023. № 13 (3). С. 507–519. URL: https://profed.edubiotech.ru/jour/article/view/1112/0 (дата обращения: 23.04.2026).

8. Пак М. С. Методология интегративного подхода. [Электронный ресурс]. URL: https://mspak.herzen.spb.ru/wp-content/uploads/2014/10/ao3.pdf (дата обращения: 20.04.2026).

9. Ермак А. Д., Макарова Е. А., Кафтанов А. Н., Гаврилов Д. В., Новицкий Р. Э., Гусев А. В. Использование методов машинного обучения для диагностики заболеваний на основе неструктурированных медицинских текстов // Национальное здравоохранение. 2025. № 6 (4). С. 55–63. URL: https://www.natszdrav.ru/jour/article/view/538 (дата обращения: 20.04.2026). DOI: 10.47093/2713-069X.2025.6.4.55-63.

10. Касюк С. Т., Диденко Г. А., Степанова О. А. Классификация данных медицинских исследований с использованием языка R // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. 2022. № 9. С. 96–107. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49730007 (дата обращения: 20.04.2026).

11. Конколь М. М., Слесарев М. А., Марьина Е. Д., Черная С. Н. Теоретико-методологические основы проектирования образовательных инструментов на основе искусственного интеллекта // Современные наукоемкие технологии. 2026. № 2. С. 161–171. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40686 (дата обращения: 20.04.2026).

12. Алексеева М. Г., Зубов А. И., Новиков М. Ю. Искусственный интеллект в медицине // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 7 (121). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-v-meditsine-3 (дата обращения: 20.04.2026).

13. Диденко Г. А., Степанова О. А. Современные аспекты информатизации: концепция информационных сервисов // Информатика и образование. 2018. № 7. С. 57–61. URL: https://info.infojournal.ru/jour/article/view/325 (дата обращения: 20.04.2026).

14. Цквитария Т. А. Формирование универсальных компетенций будущего врача как современная педагогическая задача // Современные проблемы науки и образования. 2025. № 3. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=34145 (дата обращения: 21.04.2026). DOI: 10.17513/spno.34145.

15. Касюк С. Т., Диденко Г. А., Степанова О. А. Диагностика пневмонии на рентгенологических снимках с использованием сверточной нейронной сети // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. 2023. № 9–2. С. 89–97. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=55849198 (дата обращения: 20.04.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 37.013
DOI 10.17513/snt.40843

CC BY 4.0

МНОГООБРАЗИЕ КАК СУЩНОСТНЫЙ ПРИЗНАК КРОСС-МНОГОМЕРНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА В СОВРЕМЕННОЙ ШКОЛЕ

Елистратова К. А. ORCID ID 0000-0002-4955-2784

Государственное бюджетное учреждение дополнительного профессионального образования «Санкт-Петербургская академия постдипломного педагогического образования имени К. Д. Ушинского», Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: xenos88@mail.ru

Современная школа характеризуется открытостью, инновационностью и сталкивается с феноменом тотальной гетерогенности. Образовательный процесс, в силу использования в его рамках различных пространств и сред, становится кросс-многомерным. Существует проблема учета в образовательной практике фактора многообразия. Цель статьи состоит в анализе влияния данного фактора на изменение подходов к организации и содержания образовательной деятельности. Материалами для исследования послужили научные труды по проблематике педагогики многообразия и образовательной среды школы, а также данные, собранные автором в ходе эмпирического исследования на базе 10 образовательных организаций Санкт-Петербурга и Ленинградской области (анкетирование 80 педагогов, наблюдение 20 уроков, анализ школьной документации). Использованы общенаучные методы анализа и обобщения, моделирования. В статье представлены уровни многообразия, сформулирован ряд ключевых идей и принципов педагогики многообразия. Рассмотрены инновационные процессы как источники и риски многообразия. Предложена авторская трактовка кросс-многомерного образовательного процесса. Раскрыт педагогический потенциал цифровой, библиомедийной и этнокультурной сред. Уточнены понятия менеджмента многообразия и педагогической метатеории управления многообразием. В заключение отмечено, что по результатам проведенного теоретического анализа и ограниченного эмпирического материала многообразие может рассматриваться как один из значимых признаков кросс-многомерного образовательного процесса. Управление многообразием требует развития метакомпетенций учителя и применения адекватных уровню сложности педагогических технологий. Вопрос о необходимости отказа от избыточной унификации средств, форм и траекторий обучения решается в каждом конкретном случае с учетом требований ФГОС и ФООП при сохранении единого содержательного ядра.

Ключевые слова: кросс-многомерный образовательный процесс, управление многообразием в школе, обеспечение качества образования в условиях многообразия

Благодарности: *Автор выражает благодарность Санкт-Петербургской академии постдипломного педагогического образования имени К. Д. Ушинского за возможность трансляции результатов исследований в области кросс-многомерного образовательного процесса в ходе реализации дополнительных профессиональных программ повышения квалификации педагогических работников.*

DIVERSITY AS AN ESSENTIAL FEATURE OF THE CROSS-MULTIDIMENSIONAL EDUCATIONAL PROCESS IN A MODERN SCHOOL

Elistratova K. A. ORCID ID 0000-0002-4955-2784

State Budgetary Institution of Continuing Professional Education, St. Petersburg Academy of Postgraduate Pedagogical Education named after K. D. Ushinskiy, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: xenos88@mail.ru

The modern school is characterized by openness and innovation and faces the phenomenon of total heterogeneity. The educational process, due to the use of various spaces and environments within its framework, becomes cross-multidimensional. There is a challenge of accounting for the diversity factor in educational practice. The purpose of this article is to analyze the influence of this factor on changing approaches to the organization and content of educational activities. The research draws on scholarly works on the pedagogy of diversity and the school educational environment, as well as data collected by the author during an empirical study based in 10 educational institutions of St. Petersburg and the Leningrad region (a survey of 80 teachers, observation of 20 lessons, analysis of school documentation). General scientific methods of analysis, generalization, and modeling are used. The article presents levels of diversity and formulates key ideas and principles of diversity pedagogy. Innovative processes are examined as sources and risks of diversity. The author's interpretation of the cross-multidimensional educational process is proposed. The pedagogical potential of digital, bibliomedia, and ethnocultural environments is revealed. The concepts of diversity management and the pedagogical metatheory of diversity management are clarified. The conclusion notes that, based on the results of theoretical analysis and limited empirical material, diversity can be considered as one of the significant features of the cross-multidimensional educational process. Managing diversity requires the development of teachers' metacompetencies and the use of pedagogical technologies appropriate to the level of complexity. The question of the need to abandon excessive unification of means, forms and learning trajectories is decided on a case-by-case basis, taking into account the requirements of the Federal State Educational Standard (FSES) and the Federal Basic Educational Programs (FOOP), while preserving a single content core.

Keywords: cross-multidimensional educational process, managing diversity in schools, ensuring the quality of education in a diverse environment

Acknowledgments*: The author expresses gratitude to the K. D. Ushinsky Saint Petersburg Academy of Postgraduate Pedagogical Education for the opportunity to disseminate research results in the field of cross-multidimensional educational process during the implementation of additional professional development programs for teaching staff.*

Введение

Современная школа функционирует в режиме «супериндустриальной неопределенности» (по Э. Тоффлеру), когда традиционные дидактические конструкции сталкиваются с феноменом тотальной гетерогенности. Обучающиеся различаются не только по академической успеваемости, но и по когнитивным стилям, культурной идентичности, цифровым привычкам, семейным ценностям, религиозным установкам. В ответ на эту реальность складывается кросс-многомерный образовательный процесс – интегративная характеристика школьной действительности, предполагающая одновременное существование множества пересекающихся измерений: дидактических, антропологических, технологических, социальных, семиотических [1].

В педагогике проблема учета многообразия (diversity) осмысливается в рамках концепций мультикультурного образования, культурно-ориентированного преподавания, а также глобальных стратегий инклюзии [2–4]. Эти подходы подчеркивают необходимость перехода от унифицированной модели обучения к признанию культурных, языковых и когнитивных различий учащихся как ресурса, а не препятствия.

Государственная образовательная политика в отношении российской школы выстраивается в логике сохранения традиционных духовно-нравственных ценностей, с ориентацией на мировоззренческий суверенитет и многовекторное развитие школы как важнейшего социального института воспроизводства человеческого капитала.

Последние годы ознаменовались значительными изменениями в содержании общего образования, зафиксированными в обновленных федеральных государственных образовательных стандартах, федеральных основных образовательных программах, единых школьных учебниках, поддерживаемыми технологическими нововведениями, например такими, как конструктор учебных планов, конструктор рабочих программ.

В изменении содержательных основ общего образования просматриваются две разнонаправленные тенденции. С одной стороны, отчетливо просматривается линия на стандартизацию, уменьшение разнообразия, с другой стороны, стремительно нарастают объемы информации учебного назначения в виде цифровых образовательных ресурсов. В настоящее время список рекомендованных Минпросвещения России цифровых образовательных ресурсов для использования школами превышает более 1000. В сочетании с разнообразными технологическими и организационными новшествами это в значительной мере усложняет деятельность учителя, процессы обучения и воспитания. Многообразие можно рассматривать как сущностный признак современного этапа развития школы, своеобразный эпистемологический и аксиологический вызов школе, обществу, административному управлению. Многообразие перестает быть периферийным явлением (фоном) и становится конструктивным принципом организации образования [5].

В целом представляется, что феномен многообразия не осмыслен и не изучен в достаточной мере на концептуально-методологическом уровне, не получил раскрытия применительно к современному этапу развития школьного образования в России.

Цель исследования – теоретическое обоснование феномена многообразия как системообразующего признака кросс-многомерного процесса, в выдвижении комплекса управленческих, дидактических и оценочных решений, адекватных этому феномену.

Материалы и методы исследования

Материалами для исследования послужили научные труды по проблематике педагогики многообразия, образовательной среды школы, в том числе научные труды автора статьи по проблематике концептуального обоснования, разработки и применения модели кросс-многомерного образовательного процесса в общеобразовательной школе.

Дизайн исследования. Исследование носило разведывательный (пилотный) характер и включало три этапа: 1) теоретический анализ отечественных и зарубежных источников по проблематике многообразия в образовании; 2) эмпирическое исследование на базе 10 образовательных организаций (анкетирование педагогов, наблюдение уроков, анализ документов); 3) интерпретация полученных данных и формулирование предварительных выводов.

Выборка. Эмпирическую базу исследования составили данные, собранные автором в 2024–2025 гг. на базе 10 общеобразовательных организаций Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Выборка носила целевую (нерепрезентативную) природу. В исследовании приняли участие 80 педагогов (анкетирование), проведено наблюдение 20 уроков с последующим анализом, изучены локальные нормативные акты школ (программы развития, положения о внутренней системе оценки качества образования, учебные планы).

Методы обработки данных. Анкеты обрабатывались с использованием описательной статистики (расчет процентных распределений, средних значений). Наблюдения уроков фиксировались в форме протоколов с последующим тематическим анализом. Анализ документов проводился

методом контент-анализа по выделенным категориям (наличие положений о многообразии, индивидуальных образовательных маршрутах, адаптации образовательных программ).

Ограничения исследования. Ввиду малого объема выборки (10 школ, 80 педагогов, 20 уроков), ее нерепрезентативного характера, региональной ограниченности (Санкт-Петербург и Ленинградская область), а также разведывательного характера эмпирической части результаты не могут быть экстраполированы на всю генеральную совокупность школ Российской Федерации. Представленные данные носят иллюстративный характер и служат для первичной проверки теоретических положений. Все выводы, основанные на эмпирическом материале, носят предварительный характер и требуют дальнейшей проверки на более репрезентативных выборках.

Результаты исследования и их обсуждение

В настоящей статье ставится и анализируется вопрос о многообразии как сущностном признаке кросс-многомерного образовательного процесса в современной школе. При этом под кросс-многомерным образовательным процессом понимается такое его устройство, конфигурация, когда на уроках, внеурочных занятиях в целях решения образовательно-воспитательных задач задействуется потенциал, организуется взаимодействие различных пересекающихся и взаимно дополняющих друг друга пространств и сред (институциональное, социально-культурное, этнокультурное, семантическое, семиотическое, аксиологическое пространства; производственно-технологическая, архитектурно-пространственная, цифровая, библиомедийная среды) [1].

Операционализация ключевых понятий. В целях обеспечения измеримости и верифицируемости результатов исследования предлагаются следующие критерии и показатели для ключевых понятий (табл. 1).

Результаты анкетирования педагогов. Данные, полученные в ходе эмпирического исследования, представлены в табл. 2. При интерпретации данных важно учитывать разведывательный характер исследования: полученные проценты отражают тенденции в обследованной выборке и не претендуют на репрезентативность для всей совокупности педагогов.

Таблица 1

Критерии и показатели ключевых понятий исследования

Понятие	Критерий	Показатель
Кросс-многомерность	Количество одновременно используемых пространств и сред на уроке	Фиксация в технологической карте урока (от двух и более сред)
Политехнологичность	Количество дидактических систем, применяемых в рамках одного занятия	Экспертная оценка урока (наличие двух и более технологий: проблемное обучение, проектное, ИКТ, игровое и др.)
Субъектная множественность	Участие разных субъектов в образовательном процессе	Количество типов участников, привлеченных к решению учебной задачи (ученики, учитель, родители, внешние эксперты, партнеры)
Рекурсивность обратной связи	Встроенность оценки в разные измерения процесса	Наличие не менее двух способов оценивания (самооценка, взаимооценка, автоматизированная проверка, экспертная оценка) на одном занятии

Примечание: составлена автором на основе теоретического анализа исследования.

Таблица 2

Распределение ответов педагогов на вопросы о работе с многообразием (в % от числа опрошенных, n = 80)

Вопрос	Да, полностью	Скорее да	Скорее нет	Нет
Сталкиваетесь ли Вы с культурными различиями в классе?	32 %	35 %	20 %	13 %
Имеете ли Вы системные инструменты работы с культурными различиями?	8 %	24 %	38 %	30 %
Используете ли Вы цифровые инструменты для персонализации обучения?	28 %	34 %	22 %	16 %
Считаете ли Вы многообразие ресурсом, а не проблемой?	18 %	31 %	29 %	22 %

Примечание: составлена автором на основе данных, полученных в ходе эмпирического исследования (анкетирование 80 педагогов, 2024–2025 гг.).

Интерпретация полученных данных (предварительные выводы). Как показывают результаты анкетирования, в обследованной выборке 67 % педагогов сталкиваются с культурными различиями в классах, однако лишь 32 % имеют системные инструменты работы с ними. Только 49 % педагогов в той или иной степени используют цифровые инструменты для персонализации обучения, а 51 % (сумма ответов «скорее нет» и «нет») не используют их. Половина опрошенных (51 %) считают многообразие скорее проблемой, чем ресурсом.

Эти данные носят предварительный, разведывательный характер и не могут быть экстраполированы на всех педагогов региона. Однако они указывают на существующий разрыв между признанием факта многообразия и наличием готовности/инструментов для работы с ним, что подтверждает необходимость дальнейшей разработки методического обеспечения в данной области.

Анализ педагогических практик работы с культурным многообразием. На основе эмпирического исследования (анкетирование педагогов 10 школ Санкт-Петербурга и Ленинградской области) и наблюдения 20 уроков были выявлены следующие практики работы с полиэтничными классами (табл. 3).

Выявленные нами практики работы с полиэтничными классами (билингвальные модули, техника «Ковер идей», проект «Карта языков класса», межкультурные диалоговые площадки) коррелируют с ключевыми принципами культурно-ориентированного преподавания [2]. В частности, идея использования родного языка учащихся-мигрантов как педагогического ресурса (билингвальные модули) напрямую перекликается с концепцией мультикультурного образования [3], которая утверждает ценность культурного и языкового разнообразия для обогащения образовательной среды всех обучающихся.

Многообразие представляет собой междисциплинарную категорию, отражающую всю совокупность связей, коммуникаций того или иного объекта, процесса, многовариантность проявления их свойств и реализуемых функций. М. Н. Певзнер, П. А. Петряков, И. А. Ушанова (2018) отмечают, что в общенаучном плане при трактовке понятия «междисциплинарность» важно опираться на целый ряд дихотомий, отражающих положительные и отрицательные стороны данного феномена: возможность управлять – невозможность «обуздать разнообразие»; сложность принятия управленческих решений; гомогенность, однородность – неоднородность социальной группы; потенциал для развития – проблема выбора приоритетов; единство общества – кризис мультикультурализма; и т. п. [6].

В каждом конкретном случае решение проблемы работы со сложной природой многообразия выражается в принятии оптимальных решений, уравновешивающих позитивное и отрицательное, деструктивное начала многообразия. Применительно к современному школьному образованию, например, это может быть использование единых учебников в сочетании с широкой линейкой цифровых образовательных ресурсов, обогащающих и дополняющих содержание того или иного учебника.

Таблица 3

Практики работы с полиэтничными классами на основе полученных данных эмпирического исследования

Практика	Описание	Пример из исследования
Билингвальные модули	Включение заданий на родном языке учащихся-мигрантов при изучении русского языка	В школе Выборгского района г. Санкт-Петербурга учитель включает написание коротких текстов на родном языке с последующим переводом
Техника «Ковер идей»	Групповая работа, где каждая этнокультурная группа представляет свой взгляд на изучаемую проблему	Апробировано в школе Гатчинского округа Ленинградской области на уроках литературы при изучении мифов и сказаний народов России
Проект «Карта языков класса»	Визуализация языкового и культурного разнообразия класса в виде интерактивной карты	Реализовано в школе Всеволожского района Ленинградской области как итоговый проект по теме «Многообразие культур» (окружающий мир, 4 класс)
Межкультурные диалоговые площадки	Организация дискуссий на темы культурных различий и толерантности	Проведены в школе Гатчинского округа Ленинградской области в рамках часов общения

Примечание: составлена автором на основе данных, полученных в ходе эмпирического исследования (наблюдение 20 уроков, анализ школьной документации в 10 ОО, 2024–2025 гг.).

Рассматривая категорию «многообразие» с междисциплинарных позиций, важно представить ее с позиций философии, педагогики, психологии, нормологии и стандартологии, кибернетики, теории управления.

Многообразие с позиций философии есть, прежде всего, плюрализм, качественное многообразие. Это фундаментальная характеристика бытия и знания, противоположная монизму и охватывающая разнообразие философских систем, онтологических позиций, культурных традиций и этических ценностей [7, с. 5]. Иными словами, каждый объект, процесс (например, урок, учебник, рабочая программа) обладает не одним, а множеством свойств, делающих их уникальными, неповторимыми и вариативными в силу взаимодействия и изменения данных свойств.

В области психолого-педагогического знания многообразие в первую очередь отождествляется с личностными ценностными, мировоззренческими, поведенческими проявлениями субъектов деятельности, образования. Оно в полной мере выражается в профессиографических характеристиках педагогической деятельности. Как педагогический феномен многообразие приобретает особую ценность, когда рассматривается спектр применения возможных концепций обучения и воспитания, вопросы проектирования индивидуальных образовательных маршрутов, инклюзивность и т. п. [8; 9].

Положения нормологии и стандартологии в отношении многообразия позволяют интерпретировать его с позиций расширения – сужения. Иными словами, применение любых норм и стандартов имеет своим следствием сужение многообразия, повышает возможности управления тем или иным объектом, снижает риск получения неправомерных результатов [10].

Эту же линию управления в отношении многообразия продолжает дисциплинарная линия кибернетики и теории управления. Инновационная практика в отношении того или иного педагогического процесса увеличивает его сложность. В отличие от механизма отрицательной обратной связи, когда осуществляется управление текущим функционированием, механизм положительной обратной связи в управлении развитием именно работает с возрастающим многообразием, способствуя повышению устойчивости, вариативности процесса. Многообразие в трактовке кибернетической теории наглядно может быть представлено с позиций закона необходимого разнообразия У. Р. Эшби [11]. Иными словами, формируемые педагогические системы (обучения, воспитания) по уровню своей сложности должны быть адекватны уровню сложности тех пространств и сред, сложности возникающих в результате их взаимодействия функциональных систем, которые задействуются в рамках данных процессов [12].

Анализ публикаций по проблематике многообразия [13–15] позволяет сформулировать ряд ключевых идей, принципов, положений педагогики многообразия. Среди них определяющее значение имеют:

− принцип междисциплинарности категории «многообразие»;

− принцип управления сложными системами;

− положение о диалектическом противоречии между многообразием и однородностью;

− положение об определяющей роли многообразия для образовательных систем как источника их инновационного развития и качественного обновления;

− положение об определяющем значении многообразия, когда речь идет о реализации человекоцентричной, гуманистической концепции образования.

Важным дополнением к этим концепциям является взгляд на управление многообразием на институциональном уровне, который акцентирует внимание не только на педагогических приемах, но и на политике, лидерстве и культуре образовательной организации в целом [16]. Кроме того, цифровая трансформация образования актуализирует возможности использования аналитики обучения (learning analytics) для персонализации образовательных траекторий и учета индивидуальных различий [17].

Кросс-многомерный образовательный процесс, мультисреда характеризуются не только пространственно-временной гибкостью (синхронное – асинхронное пересечение различных пространств и сред применительно к различным школьным локациям), но и такими признаками, как:

− политехнологичность (одновременное использование разных дидактических систем);

− субъектная множественность (обучающиеся, педагоги, родители, внешние эксперты, партнеры школы как равноправные участники образовательных отношений);

− рекурсивность обратной связи (оценка встроена в разные измерения процесса) [18; 19].

В таком процессе многообразие перестает быть помехой и становится конструктивным принципом достижения образовательных целей. В палитре многообразия важно обеспечить максимально полное использование педагогического потенциала образующих такое многообразие пространств и сред.

Цифровая среда позволяет фиксировать и использовать траектории учения каждого, обеспечивая гибкость маршрутов. Ее потенциал, например, может состоять в визуали-

зации многообразия через данные (learning analytics) [20]. Реализация этого потенциала напрямую связана с использованием методов и инструментов аналитики обучения, которые позволяют не только фиксировать результаты, но и анализировать процесс учения, выявляя индивидуальные дефициты и зоны роста [17]. Такой подход обеспечивает персонализацию образовательного процесса в условиях массовой школы, что является одной из ключевых задач управления многообразием [16].

Библиомедийная среда (школьная библиотека, медиатека) выступает пространством для работы с разными текстами, нарративами, формируя критическое отношение к информации [21; 22].

Этнокультурное пространство (языковые уголки, фольклор, предметные модули, фестивали) обеспечивает легитимацию культурного многообразия, превращая его в образовательный ресурс, особенно в поликультурном воспитании школьников. Культурное многообразие здесь выступает не фоном, а содержанием воспитания (формирование межкультурной компетенции, эмпатии, антидискриминационных установок).

В рамках кросс-многомерного образовательного процесса реализуется комплекс инструментальных средств, всего того, что принято называть «педагогическими опорами» [23]:

− технологии дифференциации и индивидуализации (разноуровневые задания, тьюторское сопровождение);

− технологии сотрудничества в гетерогенных группах (Jigsaw («групповой пазл», групповой экспертный опрос);

− цифровые платформы с адаптивным контентом;

− игровые и симуляционные технологии (проживание культурных сценариев);

− метод проектов с открытым результатом (допускает разные культурные и стилистические решения);

− рефлексивные практики (дневники выбора, карты многообразия).

Рассматривая многообразие как сущностный признак кросс-многомерного образовательного процесса в современной школе, прежде всего необходимо остановиться на потенциальных элементах такого многообразия. Эмпирическая редукция многообразия позволяет выделить два макроуровня для представления элементов многообразия в условиях школы: институциональный и субъектный уровни.

Для *институционального* уровня школы, с учетом действия фактора кросс-многомерности, сбалансированности школьной экосистемы [24; 25] ключевыми элементами многообразия являются:

− многообразие образовательных целей (одновременная реализация академических, компетентностных, валеологических, социализирующих, профориентационных и иных целей);

− многообразие мнений и субъектных позиций представителей педагогического сообщества (включая профессиональные педагогические установки, плюрализм в обсуждении методических подходов, этических, направлений инновационной деятельности);

− мировоззренческие установки (светский характер образования при уважении к религиозным и философским позициям семей);

− формы взаимодействия участников образовательных отношений (урок, лаборатория, дебаты, хакатон, тьюториал, асинхронная коллаборация);

− культурное многообразие классных коллективов (полиэтничность, дети мигрантов, билингвы, носители разных субкультур – геймеры, волонтеры, фанаты);

− образовательные потребности и предпочтения (одаренные дети, дети с ОВЗ, дети с разными модальностями восприятия – аудиалы, визуалы, кинестетики).

Субъектный уровень элементов многообразия в условиях школы, прежде всего, есть все то, что связано с профессиональной деятельностью учителя. В этом контексте можно говорить о таких ключевых элементах, как:

− стили профессиональной деятельности (авторитарно-дисциплинарный, либерально-фасилитирующий, демократически-кооперативный, адаптивно-вариативный);

− профессиональные и карьерные установки (ориентация на предметное мастерство, на педагогические отношения, на инновационную активность, на административно-управленческий рост, на внешнюю самопрезентацию и т. п.);

− арсенал используемых педагогических средств и технологий (от классической лекции до иммерсивных VR-сред, геймификации, flipped classroom, Socratic seminar, design thinking).

Следует отметить, что многообразие на уровне учителя – это не проблема, не ограничение и не фактор отрицательного действия на процесс обеспечения качества, а ресурс, при условии, что школа создает условия для его рефлексивного использования, разделяет кросс-многомерную концепцию образовательного процесса.

Субъектный уровень многообразия применительно к обучающемуся может быть представлен такими элементами, как:

− многообразие образовательных результатов и их классификаций (предметные, ме-

тапредметные, личностные в соответствии с ФГОС общего образования; гибкие и твердые навыки; сквозные компетенции; 4 К; навыки будущего; критическое мышление, работа с неопределенностью, межкультурная коммуникация, самоорганизация; и т. д.);

– многообразие результатов, достижений и активностей, отражаемых в персональном портфолио, накопительных оценках;

– критериальные рубрики, допускающие разные способы достижения и оценки одного и того же результата.

В условиях современной школы одним из ключевых источников многообразия и одновременно факторов сопутствующих рисков выступают инновационные процессы [21]. Инновации в современной школе (цифровая трансформация, внедрение STEM/STEAM, проектное и исследовательское обучение, смешанные форматы, персонализация) закономерно умножают многообразие. Однако инновационно насыщенная среда порождает и ряд специфических рисков:

– фрагментация образовательного пространства (обучающиеся и учителя действуют в непересекающихся логиках (один – в цифровой среде, другой – в аксиологическом пространстве, третий – в институциональном);

– когнитивная и эмоциональная перегрузка учителя (невозможность охватить все форматы и вариации кросс-многомерной образовательной среды, дефицит времени на рефлексию);

– усиление неравенства доступа (разные семьи имеют разный цифровой, культурный и временной капитал);

– дефицит единых критериев оценки (при разных траекториях, предпочтениях и приоритетах затруднено сравнение и валидизация образовательных результатов, социальных эффектов).

Механизмы управления многообразием. В отличие от адаптации (приспособление системы к уже существующему многообразию) и фасилитации (создание условий для саморазвития многообразия), управление многообразием предполагает активное целенаправленное воздействие на параметры многообразия. Это воздействие может осуществляться на трех уровнях (табл. 4).

При этом важно различать: управление многообразием (diversity management) – целенаправленное воздействие на параметры многообразия через организационные, дидактические и оценочные решения; педагогическую метатеорию управления многообразием – систему теоретических представлений о природе многообразия и способах работы с ним в образовании [5].

Для минимизации данных рисков очень важно обеспечить эффективный механизм управления многообразием. Управление многообразием в условиях кросс-многомерного образовательного процесса требует соответствующих системных стратегий. Они специфичны для каждой школы в отдельности, зависимы от ее ресурсных возможностей, социокультурного контекста:

– школьная политика (принятие многообразия как ценности, зафиксированной в миссии);

– корпоративное обучение педагогов (технологии работы в гетерогенных группах, обучающаяся организация, дизайн гибких образовательных траекторий и индивидуальных маршрутов);

– нормативная среда (локальные акты, регламентирующие индивидуальное обучение, связанные с цифровым этикетом, интеллектуальным правом; применение различных оценочно-критериальных комплексов).

Утверждение о том, что управление многообразием требует «отказа в управлении образовательным процессом от унификации», не следует понимать как отрицание нормативного ядра образования, заданного ФГОС и ФООП.

Таблица 4

Уровни и механизмы управляющего воздействия на многообразие в школе

Уровень управления	Содержание	Пример
Стратегический	Определение политики в отношении многообразия (ценностные основания, приоритеты)	Включение принципа уважения к многообразию в программу развития школы
Тактический	Разработка процедур, регламентов, инструментов работы с многообразием	Создание локальных актов о порядке обучения детей-мигрантов, положений о тьюторском сопровождении
Операционный	Ежедневные практики учителей по работе с различиями в классе	Дифференциация заданий, использование групповых форм работы, адаптация материалов

Примечание: составлена автором на основе теоретического анализа и данных эмпирического исследования.

Речь идет об отказе от избыточной унификации в методах, формах, темпах и траекториях обучения при сохранении единого содержательного ядра и требований к результатам. Возможный компромисс: вариативность способов достижения обязательных результатов. Например, при изучении темы «Способы выражения подлежащего» (русский язык, 8 класс) обязательный результат – умение находить подлежащее и определять способ его выражения. Однако учащийся может продемонстрировать это умение разными способами: письменный разбор, устный ответ с примерами из жизненного опыта, создание ментальной карты, озвучивание при помощи цифровых средств (аудиосообщение, короткое видео). ФГОС и ФООП не регламентируют форму предъявления результата, если он достигнут. Таким образом, «отказ от унификации» возможен именно в выборе средств, форм и траекторий при сохранении единого содержательного ядра.

Минимизация рисков многообразия особенно актуальна для ситуации, связанной с проектированием и управлением реализацией индивидуальных образовательных маршрутов (ИОМ) обучающихся, особенно в условиях профильного обучения и предпрофильной подготовки. Индивидуальный образовательный маршрут позволяет легитимно сочетать разные глубины, темпы, формы и направления освоения содержания. Вместе с тем их реализация в условиях кросс-многомерного образовательного процесса школы сопряжена с рисками размывания базового ядра содержания образования, нанесения ущерба здоровью обучающихся, получения непреднамеренных образовательных результатов. Требуется не только фиксация на институциональном уровне соответствующих правил, норм, но и формирование у самих обучающихся компетенций в области самоменеджмента, тайм-менеджмента.

Заключение

На основе проведенного теоретического анализа и ограниченного эмпирического материала (пилотное исследование на базе 10 школ Санкт-Петербурга и Ленинградской области) можно сформулировать следующие предварительные выводы.

По результатам теоретического анализа и ограниченного эмпирического материала многообразие может рассматриваться как один из значимых признаков кросс-многомерного образовательного процесса в современной школе. В ходе теоретического анализа выявлены уровни многообразия (институциональный, субъектный), а также ключевые элементы многообразия, влияющие на организацию образовательного процесса. Проведенный анализ подтверждает, что эффективное управление многообразием невозможно без опоры на признанные международные теоретические рамки – культурно-ориентированное преподавание, мультикультурное образование, политику инклюзии и принципы управления разнообразием, а также без использования современных технологических решений (learning analytics).

Управление многообразием требует отказа от избыточной унификации средств, форм и траекторий обучения при сохранении единого нормативного ядра образования, заданного ФГОС и ФООП. На основе анализа выявлен потенциал таких механизмов управления, как стратегический (определение политики), тактический (разработка процедур) и операционный (ежедневные практики учителей).

Эмпирические данные показывают, что в обследованной выборке существует разрыв между признанием многообразия и наличием инструментов работы с ним. Однако ввиду ограниченного и нерепрезентативного характера выборки эти данные не могут быть генерализованы и требуют дальнейшей проверки на расширенных выборках.

Предложенные в статье принципы управления многообразием (полиперспективность, редундантность, трансверсальность) носят предварительный, концептуальный характер и нуждаются в дальнейшей эмпирической проверке.

По результатам проведенного теоретического анализа и ограниченного эмпирического материала многообразие может рассматриваться как один из значимых признаков кросс-многомерного образовательного процесса. Управление многообразием требует отказа от избыточной унификации средств, форм и траекторий обучения при сохранении единого содержательного ядра, развития метакомпетенций учителя, применения адекватных уровню сложности педагогических технологий, трансформации системы оценки и целенаправленной институциональной политики.

Признав многообразие значимым фактором, школа сможет реализовать свой потенциал как место развития личности в ее уникальности и одновременно место продуктивного диалога разных миров и культур. Вместе с тем все сформулированные в статье выводы и рекомендации носят предварительный характер, основанный на ограниченном эмпирическом материале, и требуют дальнейшей верификации на более репрезентативных выборках и в различных образовательных контекстах.

Список литературы

1. Елистратова К. А., Панасюк В. П. Образовательный процесс в школе: кросс-многомерная реальность (монография). СПб.: Астерион, 2021. 120 с. URL: https://www.loiro.ru/0503_%D0%9C%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D1%8F_%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%B2%20(1).pdf (дата обращения: 02.05.2026).

2. Gay G. Culturally Responsive Teaching: Theory, Research, and Practice. 3rd ed. New York: Teachers College Press, 2018. 384 p. [Электронный ресурс]. URL: https://archive.org/details/culturallyrespon0000gayg (дата обращения: 02.05.2026).

3. Banks J. A., Banks C. A. M. (eds.). Multicultural Education: Issues and Perspectives. 10th ed. Hoboken: Wiley, 2019. 400 p. [Электронный ресурс]. URL: https://archive.org/details/multiculturaledu00bank (дата обращения: 02.05.2026).

4. UNESCO. Global Education Monitoring Report 2020: Inclusion and Education. Paris: UNESCO, 2020. 488 p. [Электронный ресурс]. URL: https://www.unesco.at/fileadmin/Redaktion/Bildung/GEM-Report_2020_Inclusion_and_Education_SUMMARY.pdf (дата обращения: 06.05.2026).

5. Певзнер М. Н., Петряков П. А., Шерайзина Р. М. Педагогическая метатеория управления многообразием: вехи развития, ценностные установки и ведущие идеи // Педагогика. 2017. № 5. С. 34–41. URL: http://www.pedagogika-rao.ru/journals/2017/06/ (дата обращения: 20.05.2026).

6. Певзнер М. Н., Петряков П. А., Ушанова И. А. Многообразие в обществе и образовании: возможно ли управлять многообразием? // Человек и образование. 2018. № 2. С. 10–16. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/mnogoobrazie-v-obschestve-i-obrazovanii-vozmozhno-li-upravlyat-mnogoobraziem (дата обращения: 20.05.2026).

7. Тетиор А. Н. Мир с позиций философии множественности (монография). М.: Изд-во «Академия Естествознания», 2017. 368 с. [Электронный ресурс]. URL: https://monographies.ru/ru/book/view?id=664&utm_source=google.com&utm_medium=organic&utm_campaign=google.com&utm_referrer=google.com (дата обращения: 20.05.2026).

8. Елистратова К. А. Управление кросс-многомерным образовательным процессом в школе: вызовы и решения // Профессиональное образование в России и за рубежом. 2023. № 2 (50). С. 22–29. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-kross-mnogomernym-obrazovatelnym-protsessom-v-shkole-vyzovy-i-resheniya (дата обращения: 20.05.2026).

9. Хачатурова К. Р. Проектирование процесса развития профессиональной творческой активности педагогов в условиях информационного многообразия // Современный ученый. 2025. № 12. С. 254–262. URL: https://su-journal.ru/archives/10961 (дата обращения: 20.05.2026).

10. Субетто А. И. Нормирование и стандартизация образования как фактор качества государственной образовательной политики // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). 2013. № 2 (27). С. 184–188. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/normirovanie-i-standartizatsiya-obrazovaniya-kak-faktor-kachestva-gosudarstvennoy-obrazovatelnoy-politiki (дата обращения: 20.05.2026).

11. Эшби У. Р. Введение в кибернетику. М.: Изд-во иностранной литературы, 1959. 432 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.klex.ru/1pu4 (дата обращения: 20.05.2026).

12. Гурина Р. В. Метод рангового анализа и закон разнообразия в педагогике // Педагогический журнал Башкортостана. 2013. № 3–4 (46–47). С. 111–122. URL: https://www.rucont.ru/efd/241375 (дата обращения: 20.05.2026).

13. Гам В. И., Филимонов А. А., Чекалева Н. В. Образовательное пространство школы // Педагог: Наука, технология, практика. 2003. № 1 (14). С. 116–123. URL: https://abitur.altspu.ru/Journal/pedagog/pedagog_14/orig/ped_14.pdf (дата обращения: 20.05.2026).

14. Певзнер М. Н., Петряков П. А., Смертин И. В. Педагог в мире многообразия: от плюрализма педагогических идей к единому образовательному пространству // Человек и образование. 2023. № 2 (75). С. 34–46. DOI: 10.54884/S181570410027028-5.

15. Фуряева Т. В., Фуряев Е. А. Дидактика многообразия в современной зарубежной высшей школе // Образование: молодежь, конкурентоспособность: сборник докладов Международной научно-практической конференции, приуроченной к 80-летнему юбилею академика Российской академии образования, доктора философских наук, профессора Г. Ф. Шафранова-Куцева (г. Тюмень, 21–22 сентября 2018 г.) / под ред. М. М. Акулич, Е. В. Андриановой, Г. З. Ефимовой; Министерство науки и высшего образования РФ, Тюменский государственный университет, Тюменский научно-образовательный центр Российской академии образования, Западно-Сибирский филиал Федерального научно-исследовательского социологического центра РАН. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2018. С. 222–226. [Электронный ресурс]. URL: https://fileserver-az.core.ac.uk/download/pdf/226272973.pdf (дата обращения: 20.05.2026).

16. Williams D. A. Diversity, Equity, and Inclusion in Education: A Global Perspective. London: Routledge, 2021. 312 p. [Электронный ресурс]. URL: https://www.academia.edu/122602117/The_Diversity_Equity_and_Inclusion_in_a_Global_Perspective (дата обращения: 20.05.2026).

17. Ifenthaler D., Gibson D., Prasse D. (eds.). Learning Analytics for Student Success: Perspectives and Cases. Cham: Springer, 2021. 250 p. [Электронный ресурс]. URL: https://www.academia.edu/109891804/Putting_Learning_Back_into_Learning_Analytics_Optimizing_Learning_Through_Analyzing_the_Data (дата обращения: 20.05.2026).

18. Козырева О. А., Гайко М. Е. Возможности мультисредового подхода в педагогике и социологии // Образование. Карьера. Общество. 2011. № 3 (32). С. 24–32. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-multisredovogo-podhoda-v-pedagogike-i-sotsiologii/viewer (дата обращения: 20.05.2026). EDN: YSTLLP.

19. Донина И. А., Елистратова К. А., Панасюк В. П. Cross-Multidimensional Spaces and Environments as a New Reality of Education // European Proceedings of Social and Behavioural Sciences. 2020. Vol. 90. P. 709–716. URL: https://www.researchgate.net/publication/343890086_Cross-Multidimensional_Spaces_And_Environments_As_A_New_Reality_Of_Education (дата обращения: 20.05.2026). DOI: 10.15405/epsbs.2020.08.02.93.

20. Вайндорф-Сысоева М. Е., Субочева М. Л. Цифровое обучение в контексте современного образования: практика применения. М., 2020. 244 с. [Электронный ресурс]. URL: https://expo-books.ru/category/book?id=13175 (дата обращения: 20.05.2026).

21. Панасюк В. П., Елистратова К. А. Кросс-многомерные пространства и среды как факторы инновационного обновления образовательной деятельности // Человек и образование. 2020. № 1 (62). С. 30–38. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kross-mnogomernye-prostranstva-i-sredy-kak-faktory-innovatsionnogo-obnovleniya-obrazovatelnoy-deyatelnosti (дата обращения: 20.05.2026).

22. Соколов А. В. Библиология и медиалогия: архаизмы и неологизмы // Материалы международной научной конференции «Двенадцатые Макушинские чтения» (г. Тюмень, 25–27 мая 2021 г.). Новосибирск: Государственная публичная научно-техническая библиотека СО РАН, 2021. С. 272–282. [Электронный ресурс]. URL: https://www.elibrary.ru/ip_restricted.asp?rpage = https %3A %2F %2Fwww %2Eelibrary %2Eru %2Fitem %2Easp %3Fid %3D47211518 (дата обращения: 20.05.2026).

23. Зорина Е. М. Использование педагогических опор для развития гибких навыков студентов // Вопросы методики преподавания в вузе. 2022. № 3. С. 46–64. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-pedagogicheskih-opordlya-razvitiya-gibkih-navykov-studentov/viewer (дата обращения: 20.05.2026).

24. Вайндорф-Сысоева М. Е., Субочева М. Л. Образовательная экосистема: терминологический аспект // Профессиональное образование в России и за рубежом. 2021. № 4 (44). С. 5–10. URL: https://www.prof-obr42.ru/Archives/4(44)2021.pdf (дата обращения: 20.05.2026).

25. Хангельдиева И. Г. Образовательные экосистемы – тренд развития современного российского образования в ближайшем будущем // Вестник Московского университета. Сер. 20. Педагогическое образование. 2022. № 1. С. 68–88. URL: https://msupedj.ru/volumes/2022/2022-1/ (дата обращения: 20.05.2026).

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding

УДК 658.5:005:004.9
DOI 10.17513/snt.40844

CC BY 4.0

ВЗАИМОСВЯЗЬ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ И ПЕРСОНАЛОМ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

[1]Ермолина Л. В. ORCID ID 0000-0002-1966-1250,
[2]Мельникова Д. А. ORCID ID 0000-0003-2556-0824

[1]Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный экономический университет», Самара, Российская Федерация;
[2]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», Самара, Российская Федерация,
e-mail: ermolina@mail.ru

Цель исследования – выявление взаимосвязи управления системами функционирования предприятий, а именно производственной и HR-сфер, в условиях цифровой трансформации экономики и бизнеса. В ходе исследования были использованы научные методы, а также изучены разнообразные теоретические источники, составившие теоретическую базу исследования. В статье определено влияние процессов цифровой трансформации на систему производственных процессов бизнеса, среди которых особенно стоит отметить комплексную автоматизацию производственных и HR-процессов, оптимизацию управления ресурсами предприятий, а также повышение уровня гибкости и адаптивности производственных процессов. Кроме того, рассмотрено влияние процессов цифровизации на управление важнейшим ресурсом любого предприятия, а именно его персоналом. Представлены статистические данные о развитии процессов цифровой трансформации современных предприятий и отдельных сфер их функционирования. Учитывая изученные данные, представлено схематичное отображение взаимосвязи систем управления производственными процессами и персоналом, осуществляемое с помощью внедрения и применения автоматизированных программных продуктов и технологий. Помимо этого, выявлены и описаны конкретные аспекты взаимосвязи систем управления производственными процессами и персоналом в условиях цифровой трансформации современных предприятий.

Ключевые слова: цифровая трансформация, управление производственными процессами, управление персоналом, автоматизированная система управления, взаимосвязь производственных и управленческих процессов

INTERRELATION OF PRODUCTION PROCESS AND PERSONNEL MANAGEMENT SYSTEMS IN THE CONTEXT OF DIGITAL TRANSFORMATION OF MODERN ENTERPRISES

[1]Ermolina L. V. ORCID ID 0000-0002-1966-1250,
[2]Melnikova D. A. ORCID ID 0000-0003-2556-0824

[1]Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Samara State University of Economics", Samara, Russian Federation;
[2]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Samara State Technical University", Samara, Russian Federation,
e-mail: ermolina@mail.ru

The purpose of this study is to investigate the relationship between enterprise system management, specifically in the production and human resources (HR) spheres, within the context of the digital transformation of the economy and businesses. To do so, the study employed scientific methods and reviewed various theoretical sources in order to establish a theoretical foundation for the research. The article explores the effects of digital transformation processes on business operations, including the extensive automation of production and HR procedures, optimization of enterprise resource management, and enhancement of flexibility and agility in production processes. Additionally, it examines how digitalization impacts the management of one of the most critical assets of any company: its personnel. Statistical data on the advancement of digital transformation in contemporary enterprises and specific areas of operation are presented in this article. Based on the analyzed data, the article presents a schematic representation of the relationship between production process management systems and personnel management systems. This relationship is achieved through the use of automated software products and technologies. The article also identifies and describes specific aspects of this relationship in the context of digital transformation in modern enterprises.

Keywords: digital transformation, production process management, personnel management, automated control system, the relationship between production and management processes

Введение

Цифровая трансформация в современных условиях выступает одним из наиболее приоритетных направлений развития предприятий различных отраслей и масштабов деятельности, что во многом обусловлено мировыми тенденциями развития социально-экономических систем. Внедрение и применение цифровых технологий обеспечивает современным предприятиям не только рост эффективности и прибыльности, но и дает возможность оптимизации бизнес-процессов в различных сферах и аспектах деятельности, а также позволяет координировать и выстраивать взаимосвязи между управлением различными видами ресурсов предприятий [1].

Важно отметить, что цифровая трансформация предприятий подразумевает полный цикл глубокой структурной переориентации деятельности бизнеса, основанной на внедрении технологий автоматизации в управление различными процессами и производствами, а также видами ресурсов предприятий [2]. Цифровая трансформация в рассматриваемом контексте – это не просто покупка техники и программ, а комплексное изменение всей бизнес-модели предприятия, ее операционных процессов, взаимодействия с клиентами, работы с персоналом и корпоративной культуры, основанное на использовании передовых цифровых технологий [3].

Для современных предприятий особенно важным элементом успешного функционирования становится формирование эффективного взаимодействия всех технических и управленческих систем бизнеса, объединяемых в общую сеть с помощью комплексных цифровых продуктов и технологий. Кроме того, именно выявление и поддержание взаимосвязи между системами производственного управления и управления трудовыми ресурсами предприятий становится одной из приоритетных задач для современных предприятий в условиях цифровой трансформации, что связано с высоким уровнем значимости данных подразделений бизнеса, а также необходимостью их цифровой трансформации в современных реалиях [4].

Рассмотрение и совершенствование процессов взаимосвязи систем управления производственными процессами и персоналом, в том числе с точки зрения применения технологий автоматизации, приобретает особую значимость в условиях цифровой трансформации, где технологические развитие бизнеса становится одним из ключевых векторов его функционирования [5].

Цель исследования – выявить взаимосвязь систем управления производственными процессами и персоналом в современных реалиях цифровой трансформации современных предприятий путем рассмотрения особенностей цифровизации бизнес-процессов и применения автоматизированных технологических программ.

Материалы и методы исследования

Теоретической базой исследования выступили труды отечественных и исследователей, данные официальной статистики, нормативно-правовые акты и документы и электронные ресурсы. В качестве материалов исследования были использованы сведения о реальной практике особенностей функционирования современных предприятий в условиях цифровой трансформации и применения разнообразных информационных технологий, в том числе технологий автоматизации систем управления.

В ходе исследования были использованы классические научные методы, среди которых теоретический анализ литературы и нормативных документов, анализ и интерпретация статистических данных, выявление взаимосвязей между явлениями и формирование выводов.

Важно отметить, что практическая значимость проведенного исследования состоит в возможности применения выявленных взаимосвязей и полученных выводов для совершенствования функционирования производственных и управленческих систем современных предприятий в условиях их цифровой трансформации.

Результаты исследования и их обсуждение

Цифровая трансформация является ключевым фактором изменения парадигмы ведения бизнеса практически во всех отраслях промышленности [6]. Она оказывает значительное влияние на различные аспекты производственного цикла, включая технологии, организацию рабочего пространства и взаимодействие сотрудников. Одним из важнейших направлений является интеграция инновационных инструментов управления производственными процессами и эффективностью персонала.

Цифровая трансформация современных предприятий представляет собой процесс полной структурной перестройки осуществления хозяйственной деятельности, основанный на глубокой смене стратегической парадигмы традиционных способов ведения бизнеса новым подходом, базирующимся на широком внедрении информационно-коммуникационных технологий и автома-

тизации бизнес-процессов. Этот процесс охватывает всю цепочку создания стоимости продукции и услуг, начиная от проектирования продукта и заканчивая доставкой потребителю [7].

Влияние цифровой трансформации на организацию систем управления современным бизнесом, а именно его производственными и управленческими процессами велико, что во многом обусловлено довольно высоким уровнем эффективности осуществления процессов цифровой перестройки бизнеса [8]. На сегодняшний день порядка 45 % российских современных предприятий активно используют программы и инструменты автоматизации систем управления, в том числе АСУ ТП и MES-системы [9]. Подобные технологии автоматизации дают возможность обеспечить высокий уровень интеграции данных о течении производственных процессов в реальном времени, а также позволяют повысить производительность труда в среднем на 10–12 %, что, в свою очередь, обеспечивает тесную взаимосвязь автоматизации производственных систем с эффективностью функционирования HR-подразделений современных предприятий [9].

Применение технологий автоматизации производственной сферы в условиях цифровой трансформации современных предприятий проявляется посредством осуществления ряда основных элементов, выявленных в ходе исследования и представленных на рис. 1.

Помимо существенного влияния на организацию производственных процессов современного бизнеса осуществление цифровой трансформации модернизирует также реализацию функций по работе с таким важнейшим ресурсом любого современного предприятия, как его персонал. Согласно статистическим исследованиям, рост рынка HR-tech составляет порядка 15–20 % ежегодно [11].

Наиболее ключевые аспекты, составляющие влияние цифровой переориентации на процессы управления персоналом бизнеса, представлены на рис. 2.

Системы управления производственными процессами и персоналом в условиях цифровой трансформации современных предприятий тесно взаимосвязаны. Такая ситуация во многом обусловлена высокой значимостью квалифицированного персонала для производственных процессов бизнеса.

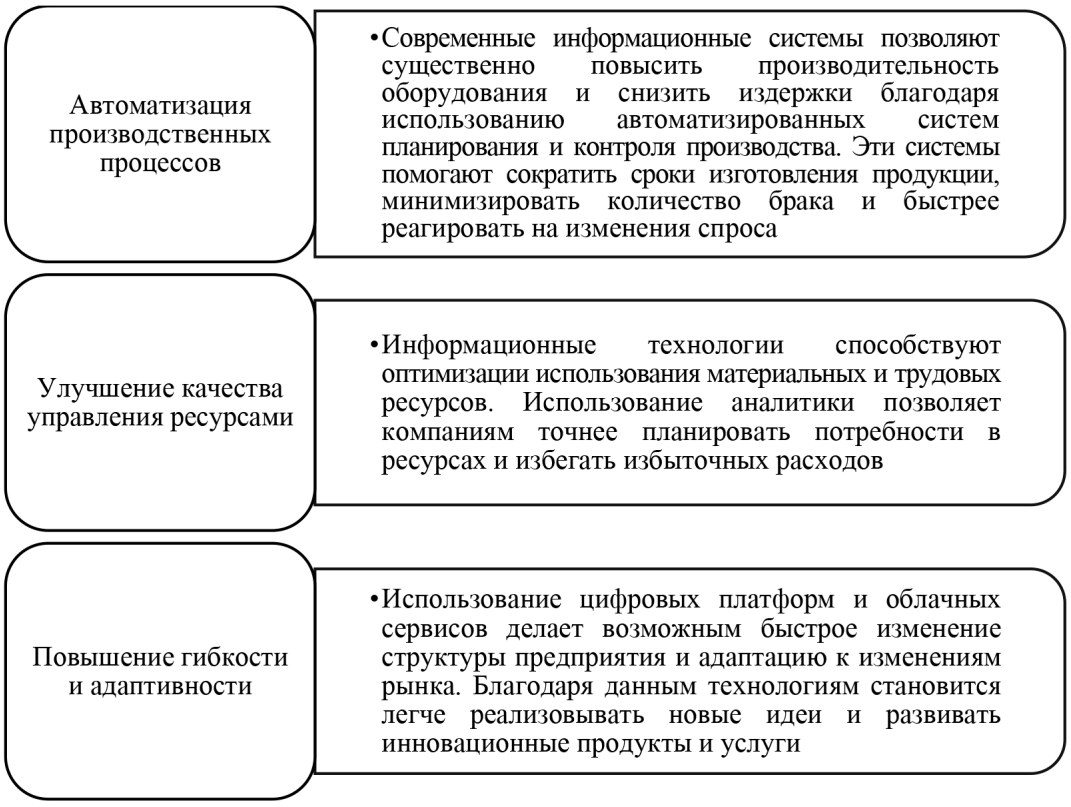


Рис. 1. Влияние процессов цифровой трансформации на систему организации производственных процессов предприятий
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования и на основе источника [10]



Рис. 2. Влияние процессов цифровой трансформации на систему организации управления персоналом предприятий
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования и на основе источника [12]

Несмотря на цифровую трансформацию производственных и бизнес-процессов, часть современных предприятий, а именно порядка 30 %, до сих пор не внедрили автоматизированные программные продукты и цифровые технологии или же используют их минимально.

В этой связи оптимизация и повышение продуктивности производственной сферы современных предприятий невозможны без тесной увязки с совершенствованием HR-системы, как и внедрение автоматизированных и цифровых технологий.

Цифровизация производственных процессов ведет к качественному скачку производительности, снижению затрат и становится одним из важных факторов формирования конкурентоспособности предприятий. Кроме того, цифровые трансформации оказывают значительное влияние на системы управления персоналом, внося изменения в процессы найма, обучения, роста, управления производительностью, а также в отношения сотрудников с компанией.

При этом, несмотря на тесную взаимосвязь производственных процессов и управления персоналом, во многом обеспечивающую острую необходимость осуществления цифрового перехода во всех сферах функционирования современных предприятий, на сегодняшний день не существует какого-либо единого универсального методологического подхода к реализации процессов цифровой трансформации. Это во многом связано с особенностями деятельности конкретных предприятий, а также с наличием различных барьеров, возникающих перед предприятиями в ходе цифровой переориентации.

В ходе исследования было выявлено несколько основных научных подходов к осуществлению цифровой трансформации современных предприятий, проводимой с учетом наличия тесной взаимосвязи различных аспектов деятельности бизнеса, в том числе его производственных и управленческих процессов. Данные представлены на рис. 3.

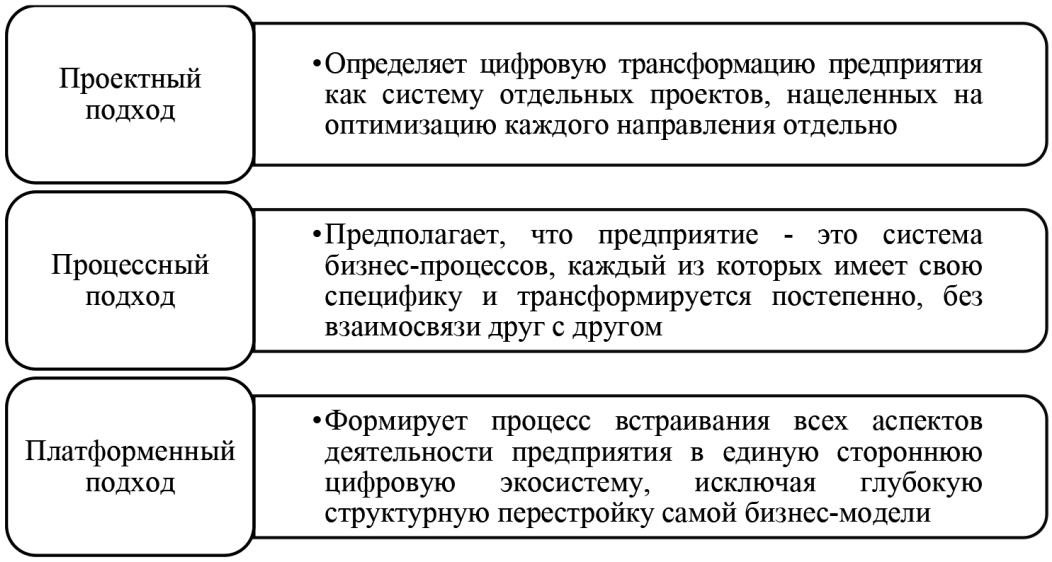


Рис. 3. Подходы к осуществлению цифровой трансформации современных предприятий
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования и на основе источника [13]

Важно отметить, что рассмотренные подходы к осуществлению цифровой трансформации предприятий выступают составными частями управленческой парадигмы бизнеса. Сегодня цифровая трансформация – это не просто применение новых передовых технологий в различных бизнес-процессах, а фундаментальная глубокая перестройка методологии управления предприятием [14]. Именно трансформация управленческих процессов становится основой для успешного внедрения и применения цифровых технологий.

Анализируя данные рис. 3 и результаты исследования, необходимо отметить, что существующие подходы при их использовании отдельно друг от друга не позволяют в полной мере осуществить трансформацию различных аспектов деятельности предприятия, в том числе его производственных и HR-процессов, что определяет необходимость разработки и применения комплексного подхода.

Комплексный подход к осуществлению цифровой трансформации современных предприятий с учетом высокой значимости взаимосвязи производственных процессов и управления персоналом, по мнению авторов, представляет собой наиболее эффективную и сбалансированную методологическую базу для глубокой перестройки самой бизнес-модели предприятия. Цифровая трансформация в рамках данного подхода представляет собой непрерывный процесс, основанный на достижении стратегических целей предприятия, а также оптимизации бизнес-процессов и, что немаловажно, их взаимосвязи друг с другом.

Несмотря на бурное развитие цифровой трансформации современных предприятий, в текущих реалиях основу взаимосвязи систем управления различными бизнес-процессами, а именно производственной и HR-сферой, составляет внедрение и активное использование комплексных автоматизированных систем управления (АСУ), представляющих собой программные управленческие продукты. Именно АСУ выступают одним из наиболее простых и в то же время эффективных инструментов, позволяющих использовать комплексный подход к цифровой трансформации предприятий и их бизнес-процессов в сфере производства и управления персоналом.

Важным элементом применения АСУ в рамках управления бизнес-процессами выступает необходимость их контроля со стороны персонала, особенно в части принятия стратегических решений, что обуславливает высокий уровень зависимости производственных процессов от процессов управления персоналом бизнеса [15].

На основании проведенного исследования и изученных источников автором сформировано схематичное отображение взаимосвязи систем управления производственными процессами и персоналом современных предприятий. Данные представлены на рис. 4.

Анализируя выявленные взаимосвязи в рамках систем управления производственными процессами и персоналом современ-

ных предприятий в условиях их цифровой переориентации, стоит отметить, что наиболее эффективной формой, охватывающей все формы и уровни управления, выступает внедрение и применение системы управления производственными процессами (АСУП). При этом подобные системы дают возможность контролировать и HR-процессы предприятий, а также различные виды их ресурсов [16].



Рис. 4. Взаимосвязь систем управления производственными процессами и персоналом
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Кроме того, согласно статистическим данным, за последний год средний уровень автоматизации производственных и управленческих процессов современных предприятий с помощью АСУП составил 3,4 балла из 5 возможных. При этом среднегодовой рост автоматизации производственных и управленческих процессов составляет порядка 15–18 %, в то время как рост рынка автоматизированных систем управления – 9,3 %, что значительно превышает общемировые показатели [3]. Подобная динамика отражает бурное развитие, а также довольно высокий уровень эффективности использования автоматизированных систем управления как актуального направления цифровой переориентации основных производственных процессов, а также процессов управления персоналом предприятий.

Помимо этого, несомненным преимуществом АСУП выступает их гибкость и адаптивность к самым различным сферам бизнеса и производственно-технологическим процессам, что обеспечивает довольно беспроблемное внедрение данных видов программных продуктов в современный бизнес [17].

Заключение

Подводя итог, необходимо отметить, что без тесной взаимосвязи между производственными процессами предприятий и управлением его персоналом, а также в отсутствии реализации комплексного и управленческого подходов эффективная цифровая трансформация современных предприятий и их различных бизнес-процессов не представляется возможной.

Выявленные взаимосвязи и аспекты выступают основой для внедрения и активного использования программных автоматизированных продуктов, в том числе АСУП, имеющих ряд преимуществ для современных предприятий, среди которых повышение эффективности и прибыльности, оптимизация использования ресурсов, снижение ошибок и издержек и т. д.

Список литературы

1. Акимов А. А., Тихонов А. И. Цифровая трансформация: основные тенденции и влияние на систему управления персоналом предприятия // Вестник Академии знаний. 2020. № 3 (38). С. 36–43. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-transformatsiya-osnovnye-tendentsii-i-vliyanie-na-sistemu-upravleniya-personalom-predpriyatiya (дата обращения: 18.03.2026). DOI: 10.24411/2304-6139-2020-10322.

2. Сулимова Е. А., Ермишин М. В. Применение современных цифровых технологий в бизнесе // Экономика строительства. 2022. № 9. С. 131–137. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-sovremennyh-tsifrovyh-tehnologiy-v-biznese (дата обращения: 13.04.2026).

3. Промышленная половина цифровизации // Коммерсантъ. [Электронный ресурс]. URL: https://www.kommersant.ru/doc/7267189 (дата обращения: 30.03.2026).

4. Фахретдинов Д. М. Автоматизация производства на предприятиях Проблемы Науки. 2021. № 9 (166). С. 30–33. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-proizvodstva-na-predpriyatiyah (дата обращения: 04.04.2026).

5. Богачев Ю. С., Бекулова С. Р. Цифровизация как способ повышения эффективности управления промышленностью России // Национальная безопасность. 2023. № 3. С. 79–91. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovizatsiya-kak-sposob-povysheniya-effektivnosti-upravleniya-promyshlennostyu-rossii (дата обращения: 12.04.2026). DOI: 10.7256/2454-0668.2023.3.43718.

6. Афанасьев А. А. Цифровизация в промышленности: варианты подходов к изучению и методология исследования // Вопросы инновационной экономики. 2023. Т. 13. № 3. С. 1395–1414. DOI: 10.18334/vinec.13.3.118927.

7. Семеновых А. М. Оценка уровня цифровизации производственных процессов в контексте повышения эффективности деятельности предприятия // Мировая наука. 2020. № 12 (45). С. 262–270. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-urovnya-tsifrovizatsii-proizvodstvennyh-protsessov-v-kontekste-povysheniya-effektivnosti-deyatelnosti-predpriyatiya (дата обращения: 30.03.2026).

8. Белоусов Ю. В. Цифровая экономика: понятие и тенденции развития // Вестник Института экономики Российской академии наук. 2021. № 1. С. 26–43. DOI: 10.24412/2073-6487-2021-1-26-43.

9. Готовность российского бизнеса к экономике данных. Мониторинг цифровой трансформации бизнеса // Институт статистических исследований и экономики знаний. URL: https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/895115225.pdf (дата обращения: 02.04.2026).

10. Косарева И. Н., Самарина В. П. Особенности управления предприятием в условиях цифровизации // Вестник Евразийской науки. 2019. № 3. Т. 11. URL: https://esj.today/PDF/35ECVN319.pdf (дата обращения: 02.04.2026).

11. ИИ и облачные технологии в HR: как цифровизация меняет управление персоналом // VC.ru. URL: https://vc.ru/hr/2701675-tsifrovizatsiya-hr-ii-i-oblachnye-tekhnologii (дата обращения: 03.04.2026).

12. Патрусова А. М. Управление персоналом в условиях развития цифровой экономики // Научный результат. Технологии бизнеса и сервиса. 2021. № 7 (3). С. 71–83. EDN: YSFQHL. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-personalom-v-usloviyah-razvitiya-tsifrovoy-ekonomiki/viewer (дата обращения: 05.04.2026). DOI: 10.18413/2408-9346-2021-7-3-0-6.

13. Игошин А. А. Методологическая основа цифровой трансформации бизнеса // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. 2025. Т. 2. URL: https://vestnik.astu.org/ru/nauka/article/100480/view (дата обращения: 13.05.2026).

14. Барановский В. Ю. Цифровая трансформация и стратегическое управление: переосмысление понятий, подходов и организационных форм // π-Economy. 2025. Т. 18. № 4. С. 54–67. URL: https://elib.spbstu.ru/dl/2/j25-285.pdf/en/info (дата обращения: 13.05.2026).

15. Клокотов И. Ю. Использование автоматизированных систем управления на промышленных предприятиях и в производстве // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2019. № 3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-avtomatizirovannyh-sistem-upravleniya-na-promyshlennyh-predpriyatiyah-i-v-proizvodstve (дата обращения: 05.04.2026).

16. Литвин А. Ю. Цифровая трансформация систем управления бизнес-процессами в российских компаниях // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15. № s2. URL: https://esj.today/PDF/73FAVN223.pdf (дата обращения: 06.04.2026).

17. Ахмедов А. Автоматизация бизнес-процессов: выгоды и риски // Вестник науки. 2025. № 6 (87). С. 36–47. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-biznes-protsessov-vygody-i-riski (дата обращения: 12.04.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 371.26
DOI 10.17513/snt.40845

CC BY 4.0

ДИАГНОСТИКА АКТУАЛЬНОГО УРОВНЯ ПОНИМАНИЯ ОБУЧАЮЩИМИСЯ СОДЕРЖАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Каменева Ю. Ф. ORCID ID 0000-0002-7756-8708

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мордовский государственный педагогический университет имени М. Е. Евсевьева», Саранск, Российская Федерация, e-mail: 30121994@bk.ru

В статье актуализирована проблема достоверной оценки сформированности у обучающихся общеобразовательных организаций понимания биологического материала. Цель статьи – обоснование критериального аппарата (критерии, показатели), разработка и реализация диагностических средств (заданий в составе контрольной работы) для выявления актуального уровня сформированности у обучающихся старших классов понимания биологического материала. Автором уточнено содержание понятия «понимание биологического материала» применительно к обучающимся 10–11-х классов. Предложена трехуровневая модель оценки сформированности понимания, включающая предпонимание, понимание-знание и понимание-интерпретацию. Описаны критерии диагностики для каждого уровня: осознанность, полнота, системность, доказательность и гибкость знаний. Представлены результаты констатирующего эксперимента, проведенного среди обучающихся 10–11-х классов общеобразовательных организаций мордовского региона, которые свидетельствуют о доминировании у них предпонимания и понимания-знания. Выявлены типичные затруднения: фрагментарность знаний, слабая способность к аргументации и переформулированию научных положений. Обоснована необходимость замены традиционных репродуктивных текстов заданий творческими, интерпретационными и прогностическими. Определены направления работы учителя-предметника по формированию у обучающихся понимания-интерпретации. На примере смыслового чтения, эвристических методов и лабораторного эксперимента продемонстрирована их роль в этом. Сделан вывод о наличии значительных резервов учебного содержания в улучшении понимания обучающимися биологического материала.

Ключевые слова: обучающиеся общеобразовательных организаций, методика обучения биологии, качество предметно-биологической подготовки, виды понимания, критерии, показатели и уровни сформированности у обучающих старших классов видов понимания биологического материала

ASSESSING THE CURRENT LEVEL OF STUDENT UNDERSTANDING OF THE CONTENT OF BIOLOGICAL MATERIAL

Kameneva Yu. F. ORCID ID 0000-0002-7756-8708

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Mordovian State Pedagogical University named after M. E. Evsevev", Saransk, Russian Federation, e-mail: 30121994@bk.ru

The article addresses the issue of reliably assessing the development of students' understanding of biological material in general education organizations. The purpose of the article is to substantiate the criteria apparatus (criteria, indicators), development and implementation of diagnostic tools (tasks as part of the test) to identify the current level of development of understanding of biological material in senior school students. The author clarifies the concept of «understanding of biological material» as applied to students in grades 10–11. A three-level model for assessing the development of understanding is proposed, including pre-understanding, understanding-knowledge, and understanding-interpretation. Diagnostic criteria for each level are described: awareness, completeness, consistency, evidence-based nature, and flexibility of knowledge. The article presents the results of a ascertaining experiment conducted among students in grades 10–11 of general education organizations in the Mordovian region, which indicate the dominance of pre-understanding and understanding-knowledge. Typical difficulties are identified: fragmented knowledge, weak ability to argue and reformulate scientific propositions. The need to replace traditional reproductive assignment texts with creative, interpretive, and predictive ones is substantiated. The areas of work for subject teachers to develop students' understanding and interpretation are identified. The role of meaningful reading, heuristic methods, and a laboratory experiment is demonstrated. It is concluded that the educational content has significant potential for improving students' understanding of biological material.

Keywords: students of general education organizations, methods of teaching biology, quality of subject-biological training, types of understanding, criteria, indicators and levels of development of types of understanding of biological material in senior school students

Введение

Современное биологическое образование находится в стадии активной трансформации, связанной со сменой образовательной парадигмы: от простой трансляции готовых знаний к формированию у обучающихся способности самостоятельно мыслить, анализировать и применять

информацию в нестандартных ситуациях. В этой связи проблема понимания учебного материала перестает быть исключительно дидактической и приобретает статус ключевой образовательной цели [1]. Однако, как показывает практика, формальное воспроизведение текста параграфа или успешное выполнение тестов закрытого типа зачастую ошибочно интерпретируются учителями как свидетельство полноценного усвоения знаний.

Специфика биологического материала заключается в его двойственной природе. С одной стороны, это конкретные объекты живой природы, доступные непосредственному наблюдению (клетки, ткани, организмы). С другой стороны, биология изобилует абстрактными понятиями, описывающими скрытые от прямого взора процессы (фотосинтез, биосинтез белка, механизмы наследственности). Понимание в данной дисциплине требует грамотного сочетания эмпирических наблюдений с теоретическим обобщением. Этот факт делает понимание биологического материала достаточно сложной педагогической задачей.

В методической литературе последних лет достаточно часто возникает суждение о том, что воспроизведение текста учебника обучающимся не говорит о глубине его знаний. Истинное понимание предполагает способность обучающегося к интерпретации учебного материала, то есть «переводу» содержания с научного языка на язык собственных мыслей, вследствие чего происходит установление причинно-следственных связей между строением и функцией живой системы, ее строением и средой обитания [2]. Однако практика работы в общеобразовательной организации показывает, что многие обучающиеся испытывают серьезные затруднения при выполнении заданий, требующих не просто вспомнить определение, а объяснить суть процесса или спрогнозировать его последствия. Таким образом, возникает противоречие между необходимостью формирования у обучающихся всех возрастов глубокого понимания биологического материала и недостаточной разработанностью диагностического инструментария, а также методических условий для достижения этого результата [3].

Цель исследования – обоснование критериального аппарата (критерии, показатели), разработка и реализация диагностических средств (заданий в составе контрольной работы) для выявления актуального уровня сформированности у обучающихся старших классов понимания биологического материала.

Материалы и методы исследования

Материалом исследования выступила информация из разных источников, на основе которой была выражена сущность понимания, виды понимания (предпонимание, знание, интерпретация), диагностические критерии и показатели к ним, что дало возможность разработать трехуровневую модель сформированности понимания обучающимися биологического материала. Материалами также послужили результаты исследования актуального уровня понимания обучающимися биологического материала. Методы исследования: теоретического уровня – обобщение и систематизация данных из научной литературы; абстрагирование и выражение определений к терминам; генерализация, систематизация и обобщение материалов исследования; эмпирического уровня – анкетирование, наблюдение, анализ письменных работ и подведение результатов.

Результаты исследования и их обсуждение

В дидактике понимание традиционно рассматривается как этап усвоения знаний, следующий за восприятием. Однако современные исследования трактуют понимание шире: «как процесс и результат раскрытия сущности изучаемого биологического объекта, установления взаимосвязей с уже имеющимися знаниями и включения нового содержания в смысловую сферу личности» [4, с. 78–79]. Понимание при обучении биологии – это многоуровневый познавательный процесс, не сводимый к запоминанию.

На основе обобщения работ в области педагогической психологии, педагогики и методики преподавания естественных наук были выделены ключевые компоненты понимания биологического материала [5, с. 201]:

− фактологический компонент включает знание терминов, номенклатуры и конкретных фактов;

− логико-смысловой компонент предполагает установление причинно-следственных связей, структурирование материала и выделение главного;

− интерпретационно-прогностический компонент проявляется в объяснении наблюдаемых явлений с научной точки зрения, прогнозировании изменений в системе и применении знаний для объяснения фактов повседневной жизни.

Для объективной оценки состояния понимания необходимо определить критерии, по которым можно судить о его глубине [6; 7].

Таблица 1

Уровни понимания биологического материала обучающимися

Уровень	Характеристика	Основные проявления
Предпонимание	Узнавание изученных явлений, механическое воспроизведение определений	Обучающийся испытывает трудности при изменении формулировки вопроса, не способен привести собственный пример, старается дословно копировать текст при пересказе
Понимание-знание	Понимание основных закономерностей в пределах одной темы, установление причинно-следственных связей	Обучающийся умеет анализировать текст, выделять главное, сравнивать объекты, но испытывает затруднения при переносе знаний в новую область
Понимание-интерпретация	Сформированность системного мышления, свободное оперирование знаниями, видение межпредметных связей	Обучающийся имеет склонность к критическому анализу, выдвижению гипотез, прогнозированию, научному объяснению явлений действительности

Примечание: составлена автором на основе источников [1; 3; 5].

В качестве таких критериев были предложены: осознанность усвоения (умение вербализовать знание своими словами без искажения научного смысла); полнота и системность (способность воспроизводить знание в различных связях, видеть место конкретного факта в общей картине); доказательность (умение аргументировать свою точку зрения, опираясь на биологические законы); гибкость и действенность (способность применять знание в измененной или новой ситуации) [8].

На основе выделенных критериев и компонентов была разработана трехуровневая модель сформированности понимания обучающимися биологического материала (табл. 1).

С целью выявления актуального уровня понимания биологического материала был проведен констатирующий эксперимент среди 107 обучающихся 10–11-х классов общеобразовательных организаций мордовского региона: МОУ «Центр образования «Тавла» – Средняя общеобразовательная школа № 17 имени З. В. Ермольевой», МОУ «Средняя общеобразовательная школа с углубленным изучением отдельных предметов № 24» и МОУ «Средняя общеобразовательная школа № 33» г. о. Саранск Республики Мордовия [9]. В ходе эксперимента использовались методы анкетирования, наблюдения за поведением обучающихся на уроке, а также анализ письменных работ, включающих как репродуктивные вопросы (предпонимание), задания на объяснение и сравнение (понимание-знание), а также решение биологических задач проблемного содержания (понимание-интерпретация (истолкование)).

Результаты диагностики показали, что преобладающими у обучающихся являются уровни предпонимания (68 респондентов) и понимания-знания (14 респондентов). Количество отказов от выполнения разных заданий в среднем составило 17 в каждом случае. Анализ отдельных видов заданий позволил зафиксировать следующие типичные затруднения (табл. 2).

Полученные данные позволяют констатировать наличие разрыва между знанием фактов и их пониманием, тем более – применением [10]. Формально усвоенная информация не становится инструментом мышления и не включается в целостную научную картину мира обучающегося. Выявленные проблемы закономерно требуют пересмотра традиционной методики обучения биологии.

Формирование глубокого понимания не может быть стихийным процессом; оно должно стать предметом специальной работы [11, с. 115]. На основе анализа передового педагогического опыта и результатов собственного исследования можно выделить несколько направлений такой работы. Прежде всего, необходимо обогащение методического арсенала учителя приемами, активизирующими мыслительную деятельность. Вместо монолога учителю при объяснении нового материала следует активнее использовать эвристические методы, создавать проблемные ситуации, которые ставят обучающегося перед необходимостью искать объяснение.

Особую роль в формировании понимания играет работа с текстом. Современный урок биологии должен включать элементы технологии смыслового чтения. Цель смыслового чтения – максимально точно и полно понять содержание текста, уловить все детали и практически осмыслить извлеченную информацию. Это внимательное вчитывание и проникновение в смысл с помощью анализа текста. Когда обучающийся действительно вдумчиво читает, то у него начинает работать воображение, он может активно взаимодействовать со своими внутренними образами.

Таблица 2

Результаты диагностики актуального уровня
понимания обучающимися содержания биологического материала

№ п/п	Выявленная проблема	Характерные проявления	Конкретные примеры из текста	Следствие
1	Преобладание репродуктивной работы	Большая часть опрошенных старшеклассников при подготовке домашнего задания ориентированы преимущественно на запоминание текста учебника. При проверке знаний большинство обучающихся успешно справляются с тестами закрытого типа, но задания «Объясните, почему ...» или «Докажите, что ...» вызывают серьезные затруднения	Знает параграф, но не может объяснить причину явления	Формально усвоенная информация не становится инструментом мышления
2	Трудности в интерпретации информации	Значительная часть обучающихся не способна переформулировать научное определение, не меняя его сути. При пересказе текста они либо дословно копируют книжные обороты, либо, пытаясь сказать «своими словами», теряют научную достоверность	Пересказ определения «клетка» или «эволюция» – либо цитата из учебника, либо искаженный бытовой вариант	Несформированность механизмов смысловой переработки информации и отсутствие умений работы с научным текстом
3	Фрагментарность знаний	У обучающихся слабо развито умение видеть системные связи. Например, зная строение клетки, они часто не могут соотнести особенности строения какой-либо ткани с выполняемой ею функцией. Нарушено понимание иерархичности живой природы (от молекулярного уровня до уровня биосферы)	Знает строение митохондрии, но не связывает его с энергетической функцией ткани	Прямое следствие поурочного контроля без установления межтематических связей
4	Слабая способность к аргументации	При ответах на спорные вопросы или при решении задач обучающиеся редко обращаются к биологическим законам как основе доказательства. Аргументация часто подменяется житейским опытом или простым утверждением, не подкрепленным фактами. Особенно ярко это проявляется при обсуждении экологических проблем или физиологических механизмов	Обсуждение экологической проблемы (например, загрязнения окружающей среды) или физиологического механизма (например, терморегуляции) без опоры на биологические законы	Доказательство отсутствует или носит ненаучный (бытовой) характер

Примечание: составлена автором на основе источников [8; 9]

Смысловое чтение не может существовать без познавательной деятельности – обучающемуся необходимо точно и полно понимать смысл текста: выделение ключевых понятий, составление плана, поиск ответов на поставленные вопросы, критическая оценка информации. Важно учить обучающихся перекодировать информацию из одной знаковой системы в другую (текст в схему, схему в график, таблицу в устный рассказ), что способствует более глубокому ее осмыслению и проработке [12; 13].

Кроме того, как показывают современные исследования, эффективным средством формирования понимания является использование специальных заданий интерпретационного типа. Такие задания должны требовать от обучающегося не простого

воспроизведения, а объяснения, доказательства, оценки или прогноза. Примеры таких заданий: «Почему у водных растений устьица расположены на верхней стороне листа?», «Как изменится экосистема озера, если в ней исчезнут все хищные рыбы?», «Сравните фотосинтез и дыхание и объясните, в чем заключается их взаимосвязь» [14; 15]. Выполнение подобных заданий переводит обучающегося с уровня предпонимания на уровни понимания-знания и понимания-интерпретации.

Не менее важным является усиление практической направленности обучения. Понимание биологических закономерностей невозможно без опоры на измерение, наблюдение и эксперимент. Лабораторные и практические работы должны быть организованы так, чтобы обучающийся не просто следовал инструкции, а осознавал цель каждого своего действия и интерпретировал полученный результат, соотнося его с теоретическими знаниями. Особую ценность представляют работы исследовательского характера, где результат заранее неизвестен.

Важным условием является также систематическая диагностика уровня понимания с использованием заданий, дифференцированных по трем выделенным уровням [15; 16]. Для предпонимания достаточны задания на узнавание и воспроизведение. Для понимания-знания необходимы задания на сравнение, классификацию и установление причинно-следственных связей в пределах одной темы. Для понимания-интерпретации требуются проблемные задачи, кейсы и проектные задания, требующие переноса знаний в новый контекст.

Заключение

Проведенное исследование позволило сделать вывод о том, что в большинстве случаев состояние сформированности понимания обучающимися биологического материала находится на уровнях предпонимания или понимания-знания. Этот факт свидетельствует об объективной потребности в улучшении работы учителя-предметника. В ходе проведения исследования с помощью специально разработанных заданий контрольной работы удалось выделить ряд типичных затруднений у обучающихся в понимании учебного материала. В силу преобладания на уроках репродуктивной деятельности таковыми являются: фрагментарность биологических знаний, отсутствие опыта переформулирования научных определений «своими словами», слабое развитие способности к аргументации суждений. Данные затруднения носят системный характер и во многом связаны с традиционной практикой контроля знаний. Доказана необходимость перехода от традиционных методов контроля (тесты закрытого типа, воспроизведение параграфа) к заданиям творческого, интерпретационного и прогностического характера, требующим объяснения, доказательства и переноса знаний в новую ситуацию. Определены направления педагогической работы по формированию понимания-интерпретации: использование эвристических методов и проблемных ситуаций, внедрение технологии смыслового чтения, применение интерпретационных заданий, усиление практической направленности лабораторных работ, а также систематическая уровневая диагностика понимания.

Таким образом, целенаправленная системная работа по формированию у обучающихся умений объяснять, интерпретировать научную информацию, устанавливать причинно-следственные связи и аргументировать собственную точку зрения позволит преодолеть формальный характер знаний и вывести понимание биологического материала на качественно новый уровень.

Список литературы

1. Серегин Г. М. Понятия «понимание» и «уровень понимания»: психолого-педагогические аспекты // Ученые записки Российского государственного социального университета. 2009. № 11 (74). С. 86–88. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_17266224_47333962.pdf (дата обращения: 11.04.2026). EDN: ONVTNJ.

2. Микешина Л. А. Интерпретация как фундаментальная операция познания // Эпистемология и философия науки. 2008. Т. 17 № 3. С. 5–13. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_15583376_76288430.pdf (дата обращения: 12.04.2026). EDN: NDAHID.

3. Маркинов И. Ф., Каменева Ю. Ф. Характеристика учебных заданий для формирования у обучающихся понимания молекулярных основ биологии // Проблемы современного педагогического образования. 2024. № 85–4. С. 264–267. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/harakteristika-uchebnyh-zadaniy-dlya-formirovaniya-u-obuchayuschihsya-ponimaniya-molekulyarnyh-osnov-biologii (дата обращения: 08.04.2026). EDN: JDMWSG.

4. Шадриков В. Д. Понимание: концептуальные модели. М.: Институт психологии РАН, 2021. 209 с. URL: https://psyrus.ru/library/pdf/ponimanie_2021.pdf (дата обращения: 12.04.2026). ISBN 978-5-9270-0424-9.

5. Знаков В. В. Психология возможного: новое направление исследований понимания: монография. М.: Институт психологии РАН, 2022. 365 с. URL: https://e.lanbook.com/book/319031 (дата обращения: 11.04.2026). ISBN 978-5-9270-0447-8.

6. Брейтигам Э. К. Взаимосвязь целостности и понимания в обучении // Вестник НГПУ. 2015. № 6 (28). С. 27–33. URL: http://sciforedu.ru/system/files/articles/pdf/09breytigam6-15.pdf (дата обращения: 15.04.2026). DOI: 10.15293/2226-3365.1506.03.

7. Маскаева Т. А., Князева А. В., Лабутина М. В., Байчурина Ю. В., Ковтоенкова А. А. Формирование основных понятий молекулярной биологии у старшеклассников обще-

образовательной школы // Современные проблемы науки и образования. 2025. № 6. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=34380 (дата обращения: 19.04.2026). DOI: 10.17513/spno.34380.

8. Брейтигам Э. К. Инструментарий обеспечения понимания учебного материала // Педагогический журнал. 2017. Т. 7. № 6А. С. 18–25. URL: http://www.publishing-vak.ru/file/archive-pedagogy-2017-6/2-breitigam.pdf (дата обращения: 09.04.2026). EDN: YRVRLV.

9. Каменева Ю. Ф. Процесс опытно-экспериментального формирования у обучающихся понимания молекулярных основ биологии // Актуальные проблемы методики преподавания биологии, химии, экологии и географии в школе и вузе: материалы Всероссийской с международным участием научно-практической конференции (г. Москва, 05–07 февраля 2025 г.). М.: Государственный университет просвещения, 2025. С. 139–144. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_82855711_11165597.pdf (дата обращения: 10.04.2026). EDN: GUVPQL.

10. Кияткина А. Д. К вопросу о проблеме определения феномена понимания // Ярославский педагогический вестник. 2020. № 4. С. 89–95. URL: https://vestnik.yspu.org/releases/2020_4/13.pdf (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.20323/1813-145X-2020-4-115-89-95.

11. Бершадский М. Е. Понимание как педагогическая категория: мониторинг когнитивной сферы: понимает ли ученик то, что изучает? М.: Педагогический поиск, 2004. 176 с. ISBN 5-901030-65-6.

12. Кулешова И. Г., Кисельников И. В., Брейтигам Э. К. Содержание фаз понимания учебного материала // Вестник НГПУ. 2019. Т. 9. № 5. С. 97–109. URL: https://repo.nspu.ru/bitstream/nspu/3444/1/soderzhanie-faz-ponimaniya-ucheb.pdf (дата обращения: 13.04.2026). DOI: 10.15293/2658-6762.1905.06.

13. Маркинов И. Ф., Якунчев М. А. Понимание как инструмент реализации научной интерпретации при обучении биологии // Биология в школе. 2021. № 5. С. 39–46. EDN: MLBAZM.

14. Капустина Ю. Ф., Якунчев М. А. Понимание как логическая процедура и необходимость ее использования в обучении биологии // Актуальные проблемы естественно-технологического образования: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции (Саранск, 25–26 апреля 2022 г.). Саранск: Мордовский государственный педагогический университет имени М. Е. Евсевьева, 2022. 14 с. EDN: ARWFXK.

15. Маркинов И. Ф., Якунчев М. А., Семенова Н. Г. Практико-ориентированные задания как средство оценивания результатов подготовки обучающихся // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 9. С. 172–179. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=39780 (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.17513/snt.39780 EDN: YIRWYC.

16. Филатов В. П. От объяснения к пониманию: важный сдвиг в философии науки // Эпистемология и философия науки. 2023. Т. 60. № 2. С. 6–22. URL: https://journal.iphras.ru/article/view/9158 (дата обращения: 09.04.2026). DOI: 10.5840/202360218.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 372.862
DOI 10.17513/snt.40846

CC BY 4.0

АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON

[1]Козлов С. В. ORCID ID 0000-0001-9945-2098, [2]Быков А. А.

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Смоленский государственный университет», Смоленск, Российская Федерация, e-mail: svkozlov1981@yandex.ru;
[2]Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Смоленск, Российская Федерация

Цель исследования – рассмотреть возможности языка программирования Python при анализе информационных моделей, представленных в табличном и графическом виде, и сформировать у обучающихся навыки осознанного применения его инструментов. В школьном курсе информатики моделирование применяется для формализации прикладных задач различных областей знаний. Для этого используются табличные модели, схемы, графики. Математические модели служат для анализа свойств изучаемого объекта в разном представлении. Это позволяет выявить значимые параметры, влияющие на поведение объекта, оценить соответствие полученной модели исследуемому явлению. В связи с этим определение критериев моделирования и выбор способа представления информации об объекте играют важную роль. Обучающиеся должны уметь сопоставлять разрозненные факты описания структуры объектов, анализировать связи между ними. Они должны строить логически непротиворечивую систему выводов, которая позволяет получить целостное представление о предмете изучения. В статье описаны принципы анализа взаимосвязей между объектами в ситуации, когда часть информации в условии задачи неизвестна. В качестве примера одной из ключевых задач графического моделирования рассмотрены табличные модели и схемы системы дорог между городами. Авторами описаны принципы исследования данных о населенных пунктах и связывающих их дорогах. Указаны подходы теоретического анализа информации о моделируемой системе городов. Акцент сделан на использовании структур данных языка Python и его функциональных инструментов как эффективного способа моделирования. Авторами охарактеризованы методические особенности построения перестановок для генерации возможных описываемых ситуаций с помощью функций встроенных библиотек языка Python. Рассмотрено применение логических условий для установления соответствия между данными моделей в системе программирования. Представлены результаты экспериментальной деятельности по освоению обучающимися навыков анализа информационных моделей средствами языка Python. Описаны примеры оптимальной записи структуры моделей при формировании у обучающихся навыков осознанного применения инструментов программирования.

Ключевые слова: информатика, обучение, информационная модель, анализ, программирование, таблицы, схемы, язык Python

ANALYZING INFORMATION MODELS USING THE PYTHON PROGRAMMING LANGUAGE

[1]Kozlov S. V. ORCID ID 0000-0001-9945-2098, [2]BykovA. A.

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Smolensk State University", Smolensk, Russian Federation, e-mail: svkozlov1981@yandex.ru;
[2]Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MPEI", Smolensk, Russian Federation

The purpose of the study is to consider the capabilities of the Python programming language when analyzing information models presented in tabular and graphical form, and to form students' skills in the conscious use of its tools. In the school course of computer science, modeling is used to formalize the applied tasks of various fields of knowledge. For this, table models, diagrams, graphs are used. Mathematical models are used to analyze the properties of the object under study in different representations. This makes it possible to identify significant parameters affecting the behavior of the object, to assess the compliance of the obtained model with the studied phenomenon. In this regard, the definition of modeling criteria and the choice of how to present information about an object plays an important role. Students should be able to compare disparate facts of describing the structure of objects, analyze the connections between them. They must build a logically consistent system of conclusions that allows a holistic view of the subject of study. The article describes the principles of analyzing the relationships between objects in a situation where some of the information in the task condition is unknown. As an example of one of the key tasks of graphic modeling, tabular models and diagrams of the system of roads between cities are considered. The authors describe the principles of studying data on settlements and roads connecting them. Approaches of theoretical analysis of information on the modeled system of cities are indicated. The emphasis is on the use of Python data structures and its functional tools as an effective modeling method. The authors described the methodological features of constructing permutations for generating possible described situations using the functions of the built-in libraries of the Python language. The use of logical conditions to establish correspondence between model data in the programming system is considered. The results of experimental activities on mastering the skills of analyzing information models by students using the Python language are presented. Examples of optimal recording of the structure of models in the formation of students' skills of conscious use of programming tools are described.

Keywords: computer science, learning, information model, analysis, programming, tables, diagrams, Python language

Введение

Исследование информационных моделей является основной дидактической линией курса информатики на уровнях основного общего и среднего общего образования. Обучающиеся должны уметь строить разные модели для оценки различных свойств объектов, обоснованно выбирать оптимальные из них [1]. Это является ключевой целью обучения моделированию в информатике. Формирование у обучающихся навыков структурного анализа объектов определяет, насколько цифровая модель будет эффективно описывать ключевые свойства предметов и явлений. Ввиду этого умение обучающихся создавать модели и работать с разными их видами составляет фундаментальную базу подготовки в области информатики [2]. Изучение принципов построения разных моделей с помощью таблиц, диаграмм, графиков воплощает теорию моделирования в соответствии с выбранным подходом в практику при решении задач.

Таким образом табличный способ отражает представление информации в структурированном виде как совокупность строк и столбцов. Он позволяет указать отношения объектов друг с другом или сравнить их свойства. При этом данные могут быть записаны в таблице в числовом формате, в виде текста, как значения логических констант или показателей времени [3, 4]. Диаграммы отражают соотношения между данными, подчеркивают тенденции в сравнении выбранной величины. Столбчатые диаграммы позволяют сравнить количественные характеристики объектов, круговые – доли их частей, линейчатые – изменение процессов во времени. Графики открывают горизонты выявления функциональных зависимостей и изучения корреляционных связей. Они дают возможность оценить динамику и цикличность протекания процессов, выяснить пространственные и временные характеристики.

В то же время в школьном курсе информатики на, казалось бы, очевидный важный междисциплинарный характер не всегда обращают должное внимание [5]. Нередко модели изучают отдельно друг от друга, не демонстрируя их всестороннее применение для целостного представления о системе. Так, во многих случаях табличные модели служат инструментами расчетов. В связи с этим именно математическим операциям и логическим функциям в заготовленных таблицах электронных редакторов уделяют основное время при обучении [6]. При этом вопросу оптимального расположения данных в таблицах, организации эффективного отражения связей между ними времени практически не отводят. Недостаточно уроков остается на визуализацию данных в виде графовых моделей. Основное внимание концентрируется вокруг графиков и диаграмм как средства визуализации числовых зависимостей между двумя величинами [7]. Сетевые модели изучаются только в профильной школе как инструмент распараллеливания информационных потоков. Во многом на практике отсутствует подход комплексного использования разных моделей, особенно в тех случаях, когда они выводят описание объектов и их свойств на новый уровень, отражая их как компонента системы. Кроме того, функциональные возможности систем программирования, несмотря на широкий спектр применения, вообще не рассматриваются в школьном курсе информатики [8]. Даже изучение программирования в школе предполагает акцент на знание базовых алгоритмических конструкций и владение известными алгоритмами обработки данных. Использование сред программирования для моделирования функциональных зависимостей, работы формальных исполнителей, математических расчетов характеристик больших данных только занимает свои позиции в школьном курсе информатики.

Цель исследования – рассмотрение возможностей языка программирования Python при анализе информационных моделей, представленных в табличном и графическом виде, и формирование у обучающихся навыков осознанного применения его инструментов.

Материалы и методы исследования

В педагогическом исследовании для изучения причинно-следственных связей обучения применению инструментов языка программирования Python для анализа информационных моделей использовались наблюдение и тестирование. В экспериментальной деятельности происходило обобщение педагогического опыта оперирования табличными и графовыми структурами. На этапах проведения формирующего и констатирующего эксперимента в инструментальной системе PyCharm изучались правила обработки данных, представленных в табличном и графическом виде.

В педагогическом эксперименте, который длился 4 месяца, принимали участие обучающиеся 11-х классов учебных заведений г. Смоленска. В Смоленском физико-математическом лицее ЯВИР при МИФИ и МЭИ были задействованы 19 чел., в средней школе № 6 г. Смоленска – 14 чел. Программа обучения в них соответствует изучению информатики на профильном уровне.

Результаты исследования и их обсуждение

При изучении методов анализа информационных моделей важно продемонстрировать связь выбранного подхода при исследовании требуемых свойств объекта. Одними из ключевых задач моделирования являются поиск дорог и их длины между пунктами на карте, вычисление кратчайшего пути, определение маршрута, содержащего минимальное или максимальное число промежуточных пунктов. Ответы на эти вопросы можно получить, конструируя и анализируя одну модель, например таблицу, схему или график. При этом выбор вида модели будет находиться в прямой зависимости от постановки вопроса задачи. Компактно записать данные о наличии дорог между пунктами можно табличным способом. Отразить структуру сети и проложить маршрут от одного пункта к другому удобно на дорожной схеме.

В то же время задача построения информационной модели по неполным данным, манипулирования частичной информацией, представленной всевозможными способами, а следовательно, выявления всех характеристических свойств системы дорог между городами является объективно более сложной. При ее решении необходимо исследовать зависимости, отраженные в моделях по-разному.

Так, при определении протяженности дорог между населенными пунктами данные можно отразить и в таблице, и на схеме. Табличный способ позволяет оперировать числовыми данными, записанными на пересечении строки и столбца. Эти числа соответствуют длине пути из одного города в другой. Названия городов будут указаны в первой строке и продублированы в первом столбце таблицы, если они известны. В противном случае города можно обозначить, проиндексировав их и задав общим именем, например «П1». На схеме линии отображают наличие дороги между населенными пунктами, а точки – сами города с подписью названия около них. Длина дороги записывается над линией, если по ней можно двигаться в двух направлениях. В случае одностороннего вектора движения линия изображается в виде дуги, над которой записывается длина в прямом направлении, а под ней – в обратном направлении. Если длина дороги неизвестна, то число не указывается, при этом можно ввести обозначение, используя для этого малые буквы латинского алфавита.

Исследуя зависимости на двух моделях, в табличной форме и на схеме, необходимо сопоставить одни данные с другими. По информации о протяженности пути сначала предположить, а затем подтвердить или опровергнуть, между какими городами на схеме проложена данная дорога. После чего определить все возможные комбинации расположения городов. Можно пойти и от обратного: по наличию дороги между населенными пунктами, а также числу входящих путей в города сделать вывод о том, каким городам в таблице они соответствуют. Проводя системный двусторонний анализ двумя методами, можно определить общую схему дорог между населенными пунктами и их протяженность.

В таких случаях анализ данных, как правило, начинают со схемы. Определяют, сколько дорог ведет в каждый из городов. Затем применяют первый принцип: если есть уникальные города с числом дорог, отличным от всех других городов, то в таблице ищут строку или столбец, так как данные в ней симметричны относительно главной диагонали, соответствующие данному городу на схеме по числу значений в горизонтали или вертикали. Так поступают со всеми такими населенными пунктами, определяя их названия и расположение в таблице. После этого, если в ней есть комбинация «строка – столбец» или «столбец – строка», которая ведет в единственный неизвестный город, то по схеме выясняют его название и заносят сведения о нем в первую строку и первый столбец вместо названия пункта «П». Если же на схеме города неуникальны или если в таблице исчерпан выбор дорог, однозначно ведущих в один из оставшихся для строки или столбца город, то применяют второй принцип. В списке городов с одинаковым числом дорог, определенных на схеме, выясняют значения дополнительного характеристического свойства. Принцип представляет собой формирование кортежа, состоящего из значений числа дорог, ведущих в города, в которые приводят пути из рассматриваемого города. По этим дополнительным показателям определяют остальные города в таблице. Для этого выявляют строку или столбец, в которых числа расположены в столбцах или строках соответственно с указанным набором числа дорог. Если же и после этого остаются города, которые невозможно указать однозначно, то оба принципа применяют последовательно к цепочке городов, увеличивая на каждом шаге их количество в исследуемой группе. Отметим, что второй принцип является более сильным, чем первый. Его можно применять независимо от первого принципа сразу на анализируемой схеме. Тем не менее первый принцип проще в применении и более понятен, так как оперирует только одной характеристикой для города – коли-

чеством дорог, ведущих в него. Для схем с простой структурой или частями, на которые можно разбить основную схему – районами сети, определяющими группу городов с дорогами между ними, следует применять первый принцип. Он дает более быстрый результат в выявлении полного описания информационной модели. Для схем с городами с одинаковой структурой больше подходит второй принцип. Он позволяет выявить сразу совокупность населенных пунктов, как подсеть, и выяснить характер связи городов с одинаковым числом дорог.

В то же время такой подход к анализу информационных моделей применим в случае относительно небольшого числа городов и дорог между ними в исследуемых табличных моделях и схемах. При росте числа городов эффективность его применения снижается. В этом случае можно говорить о необходимости автоматизации рассмотренных принципов. Это позволяет реализовать алгоритмический подход с использованием инструментов систем программирования, например таких, как язык Python функциональной среды PyCharm [9, 10]. Тем самым можно продемонстрировать обучающимся теоретическую значимость изученных алгоритмов и применимость методов программирования на практике.

При реализации данного подхода необходимо задать систему, которая характеризует строки таблицы с помощью кортежей чисел, соответствующих индексам городов «П». А схема определяет пути из одного города в другой по названиям населенных пунктов. Затем остается описать программный код, который обрабатывает всевозможные комбинации городов и дорог между ними, непротиворечащие табличной информации и данным на схеме.

Программный код (составлен авторами) на языке Python для решения таких задач может выглядеть следующим образом. В нем система дорог между городами задана двумя списками table и graph в соответствии с таблицей населенных пунктов и схемой связей между ними. При этом в условии в таблице должны быть определены дороги между городами, как число, звездочка или иное обозначение в ячейках на пересечении строк и столбцов. На схеме указаны дороги между населенными пунктами в виде линий.

```
from itertools import permutations
table = ‘457 346 24 123 167 257 156’.split()
graph = ‘АБ АВ БВ БД ВЕ ДГ ГЕ ДЖ ЖЕ ГЖ’.split()
print(‘1 2 3 4 5 6 7’)
for p in permutations(‘АБВГДЕЖ’):
    if all(str(p.index(c2) + 1) in table[p.index(c1)] for c1, c2 in graph):
        print(*p)
        break
```

Во-первых, необходимо отдельно импортировать функцию *permutations* из библиотеки *itertools* языка Python или все ее инструменты [11, 12]. В этом случае после инструкции *import* следует указать символ «*». Функция permutations позволяет сгенерировать всевозможные перестановки элементов. В рассматриваемом примере это перестановки названий городов ‘АБВГДЕЖ’, описанных как строка.

Во-вторых, необходимо задать два списка, которые соответствуют городам и дорогам. Список *table* представляет собой кортежи строк, где каждая из них указывает доступные связи для вершины с некоторым порядковым номером. Например, вторая запись в списке *table* – «346» – иллюстрирует, что город с номером 2 должен быть связан дорогами с городами 3, 4 и 6. Обычно они перечисляются по порядку следования строк в таблице сверху вниз. При этом порядок можно изменить, он не влияет на построение информационной модели. Но в таком случае необходимо будет поменять и порядок возможных вершин модели. Поэтому делать это в решении нецелесообразно, и последовательность кортежей для строк следует сохранять. Отметим, что особенно важно корректно через пробел указать пути в возможные города, то есть вершины и ребра, которыми они соединены. Список *graph* задает дороги на схеме, они соответствуют ребрам сетевой модели. Так, например, «БВ» означает, что между городами «Б» и «В» на схеме есть путь. Ниже созданных списков выводится строка с названиями городов, в том порядке, в котором они определены в первой строке таблицы или ее первом столбце. Обычно, даже если названия городов указаны в виде «П1», то в команде вывода *print* указывают только их индексы, нумерация которых начинается с «1».

В-третьих, цикл в программе предназначен для генерации перестановок, которые будут сохраняться в переменной *p*. Каждая перестановка – это возможное соответствие букв названий городов номерам в табличной

модели. Например, если на очередном этапе работы программы будет обрабатываться перестановка ‘БАГВЕДЖ’, то она отражает порядок Б – 1, А – 2, Г – 3, В – 4, Е – 5, Д – 6, Ж – 7 для городов на схеме. Для каждой перестановки *p* проверяется условие с помощью встроенной функции системной библиотеки *all*. Она возвращает значение *True*, если проверяемые комбинации для городов и дорог между ними будут истинными. Значение *False* будет сформировано в том случае, если какая-то запись в двух списках *table* и *grap*h противоречит друг другу.

Внутри функции *all* организован цикл *for c1, c2 in graph*, который для каждой дороги из пункта *c1* в пункт *c2* находит в сгенерированной перестановке p позицию первого города и проверяет, что второй город находится в списке доступных населенных пунктов. Функция *str(p.index(c2) + 1)* преобразует номер второго города в строку с учетом нумерации в Python с нуля, а в таблице с единицы. Затем функция *in*, проверяющая вхождения элемента в объект *table[p.index(c1)]*, определяет, есть ли город *c2* в списке доступных пунктов *c1*.

В-четвертых, команда *print(*p)* печатает на экране найденную перестановку, если функция *all* определила значение *True*. Буквы названий городов выводятся в одной строке через пробел. Таких перестановок, удовлетворяющих условию задачи, может быть несколько. В этом случае будет выведена первая подходящая перестановка. Команда *break* прервет выполнение программы при нахождении подходящего ответа. Заметим, что наличие альтернативных перестановок объясняется симметричностью схемы городов в отдельных заданиях. Программа позволяет, исключив команду *break*, вывести на экран все из них. При этом расположение в них городов не будет влиять на дальнейший ответ.

В-пятых, полученные возможные перестановки после запуска программы позволяют дополнить обе информационные модели – таблицу и схему. Для таблицы будет известно соответствие названий пунктам, а для схемы – протяженность дорог между ними. После этого, объединив совокупные данные, можно ответить на разные вопросы заданий. Например, можно указать длину дороги из одного населенного пункта в другой или сумму протяженностей нескольких дорог. Можно вычислить длину кратчайшего пути из одного города в другой. Можно определить соответствие номеров пунктов их названиям.

В ходе экспериментальной работы обучающимся предлагались для выполнения такие задачи. Система содержала задания разного уровня сложности. Обучающиеся в ходе эксперимента сначала учились решать задания «на бумаге», проводя анализ «вручную». Затем они выполняли задания, предъявляемые в разном формате – в виде таблиц и схем, в системе программирования Python с помощью компьютерных средств моделирования данных. Задания были разработаны в программном комплексе «SmartTeacher» с использованием средств генеративного искусственного интеллекта в соответствии с образовательными картами [13, 14]. Это позволяло в учебном процессе предлагать обучающимся наборы индивидуальных заданий, от простых упражнений к сложным, учитывая текущий уровень их учебных достижений.

На начальном этапе обучения практические задания отражали тренировку умений оперировать данными табличных моделей. Затем были изучены особенности моделирования с помощью схем. На втором этапе обучающиеся исследовали алгоритмы анализа на табличных моделях и схемах, изучали приемы сопоставления данных, представленных на них. На третьем этапе задания предлагалось выполнить в среде PyCharm с помощью инструментов программирования. Для этого обучающиеся повторяли правила объявления списков в языке Python, способы их идентификации и приемы обработки данных в них. На четвертом, заключительном этапе обучающимся предлагалось выполнять разнообразные задания с использованием разных подходов, изученных на предыдущих этапах.

В конце обучения была проведена итоговая контрольная работа, которая состояла из восьми заданий. Задания соответствовали разным этапам обучения, по два упражнения на каждый способ решения: табличный, на схему, на агрегацию данных моделей «ручным» и «программным» методами. Результаты проведенной диагностики показали осознанное применение обучающимися изученных подходов к анализу информационных моделей. Так, высокого уровня усвоения учебного материала достигли 14 чел., продвинутого уровня – 15 чел., базового уровня – 4 чел. Это позволяет заявить о высоких показателях обучения, соответствующих нормальному распределению с платформой в области высоких значений. Гипотеза исследования состояла в том, что использование языка программирования Python для анализа табличных и графических информационных моделей способствует формированию у обучающихся навыков осознанного выбора и применения программных инструментов при решении практических задач.

Качественный анализ условий и результатов эксперимента. Результаты экспериментальной работы позволяют утверждать, что обучающиеся усвоили правила представления и анализа табличных и графических информационных моделей. Они научились выделять свойства объекта в зависимости от ситуации в задаче, после чего строить информационную модель, наиболее точно описывающую выбранные для исследования характеристики. У обучающихся были сформированы навыки оперирования числовыми величинами в табличных моделях, обработки связей между городами на схемах дорожной сети. В системе программирования Python ими были получены знания о генерировании перестановок, приобретены умения создавать списки из строковых текстовых данных и обрабатывать информацию в них, соответствующую вершинам и ребрам графа, представленную в табличном виде и на схеме. При этом обучающиеся параллельно закрепили навыки записи составных условий при использовании логических конструкций.

Задания, генерируемые в системе «SmartTeacher» [15], были созданы с учетом ошибок, типичных при выполнении таких заданий. Это позволило детально объяснить логику решения задачи, продемонстрировав особо значимые элементы, приводящие к неправильному ответу. Это позволяет сделать вывод, что гипотеза экспериментального исследования находит подтверждение в проделанной работе.

Заключение

Таким образом, работа, проведенная в ходе эксперимента, демонстрирует важность анализа информационных моделей, представленных в табличном и графическом виде, как с помощью приемов сопоставления и синтеза информации, так и с применением языка программирования Python на основе формирования и обработки списков элементов и проверки взаимосвязей между данными. При этом формирование у обучающихся представлений о структуре программного кода решения позволяет им сократить время на исследование свойств объекта и дать ответ на основе обобщенных характеристик. Это дает возможность заложить у будущих IT-специалистов навыки осознанного выбора инструментов анализа информационных моделей.

Список литературы

1. Бешенков С. А., Шутикова М. И., Лысенкова О. В. Информационное моделирование как инструмент формирования универсальных учебных действий // Преподаватель XXI век. 2015. № 2–1. С. 173–180. EDN: UAXKPL.

2. Гербеков Х. А., Башкаева О. П. Место математического и компьютерного моделирования в системе современного общего образования // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Информатизация образования. 2017. Т. 14. № 1. С. 17–23. DOI: 10.22363/2312-8631-2017-14-1-17-23.

3. Макаренко М. Д. Образовательный туризм и математическое моделирование // Информатика в школе. 2020. № 5 (158). С. 12–18. DOI: 10.32517/2221-1993-2020-19-5-12-18.

4. Потехина Е. В. Поддержка курса математической логики средствами информационных технологий // Мир науки, культуры, образования. 2018. № 3 (70). С. 329–330. EDN: XUNFCP.

5. Козлов С. В., Быков А. А. Особенности изучения междисциплинарных тем школьных курсов математики и информатики с помощью методов математического моделирования // Проблемы современного образования. 2021. № 5. С. 250–261. DOI: 10.31862/2218-8711-2021-5-250-261.

6. Попов В. С., Алефиренко Е. А., Черницына Л. Ю. Компетенции для вычислений в электронных таблицах: нахождение минимальных и максимальных значений по условию, функции МИНЕСЛИ, МАКСЕСЛИ // Вестник МГПУ. Серия: Информатика и информатизация образования. 2025. № 1 (71). С. 90–100. DOI: 10.24412/2072-9014-2025-171-90-100.

7. Шамсутдинова Т. М. Развитие навыков визуализации и визуальной аналитики в курсе информатики // Информатика и образование. 2023. Т. 38. № 3. С. 16–23. DOI: 10.32517/0234-0453-2023-38-3-16-23.

8. Козлов С. В., Быков А. А. Обучение анализу логических выражений с использованием языка программирования Python // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 4. С. 121–126. DOI: 10.17513/snt.40375.

9. Каракозов С. Д., Маняхина В. Г. Python как базовый язык обучения программированию в школе // Информатика в школе. 2020. № 1 (154). С. 26–30. DOI: 10.32517/2221-1993-2020-19-1-26-30.

10. Кондратьева В. А. Обучение основам программирования на языке Python в школьном курсе информатики // Вестник МГПУ. Серия: Информатика и информатизация образования. 2021. № 1 (55). С. 8–16. DOI: 10.25688/2072-9014.2021.55.1.01.

11. Маркелов В. К., Завьялова О. А. Язык программирования Python как альтернативный инструмент для решения заданий ЕГЭ по информатике // Информатика в школе. 2023. № 2 (181). С. 63–72. DOI: 10.32517/2221-1993-2023-22-2-63-72.

12. Ильченко О. Ю., Сырицына В. Н., Кадеева О. Е. Решение задач ЕГЭ по информатике средствами языка Python // Высшее образование сегодня. 2021. № 11–12. С. 42–54. DOI: 10.18137/RNU.HET.21.11-12.P.042.

13. Киселева О. М. Использование математических методов для формализации элементов образовательного процесса // Концепт. 2013. № 2. С. 36–40. EDN: PVXPOV.

14. Быков А. А., Козлов С. В., Исаков М. А. Использование web-платформы “smartteach” как инструмента построения образовательных карт // Естественные и технические науки. 2024. № 10 (197). С. 171–173. EDN: BHYICU.

15. Быков А. А., Козлов С. В. Интеллектуальное формирование наборов тестовых заданий с использованием web-платформы “smartteach” // Естественные и технические науки. 2025. № 5 (204). С. 147–149. EDN: GQUHIM.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 372.881.1
DOI 10.17513/snt.40847

CC BY 4.0

СУЩНОСТЬ И СОДЕРЖАНИЕ МЕТАПРЕДМЕТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ АКТИВИЗАЦИИ ЯЗЫКОВОЙ КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ НА УРОКАХ РОДНОГО (ЯКУТСКОГО) ЯЗЫКА

Кондратьева С. А. ORCID ID 0009-0008-0035-4032,
Поликарпова Е. М. ORCID ID 0000-0002-3518-6963

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова», Якутск, Российская Федерация, e-mail: sardkond@mail.ru

Статья посвящена теоретическому обоснованию целесообразности использования методов и приемов метапредметной технологии как средства активизации языковой компетенции обучающихся 5-го класса на уроках родного (якутского) языка. В условиях билингвальной, якутско-русской образовательной среды преодолению узкопредметного обучения родному (якутскому) языку может способствовать использование методов и приемов метапредметной технологии. Цель – выявить целесообразные методы и приемы метапредметной технологии применительно к изучению родного (якутского) языка в 5-м классе. Исследование опирается на такие принципы, как активность, системность, последовательность, а также на метапредметный, средовой и культурологический подходы. На основе анализа исследований в области метапредметного подхода и практик оценки метапредметных результатов обучения, исследований методистов по теории и методике обучения родному (якутскому) языку и результатов опроса учителей родного (якутского) языка о дидактической целесообразности использования методов и приемов метапредметной технологии с целью активизации языковой компетенции обучающихся, выявлены ее ключевые компоненты: целевой, содержательный, процессуальный и результативно-оценочный. Предложена трехкомпонентная модель языковой компетенции, активизируемой метапредметной технологией: когнитивно-языковой, коммуникативно-деятельностный и культурно-аксиологический компоненты. Показано, что содержательной основой технологии выступают метапредметные задания, интегрирующие язык с историей, географией, биологией, этнографией и математикой. Сделан вывод, что метапредметная технология изменяет статус родного языка с учебного предмета на универсальный инструмент познания, что создает условия для устойчивой активизации языковой компетенции обучающихся 5-го класса.

Ключевые слова: метапредметная технология, родной (якутский) язык, 5 класс, активизация языковой компетенции, билингвальное образование, сущность, содержание

THE ESSENCE AND CONTENT OF META-SUBJECT TECHNOLOGY FOR ACTIVATING STUDENTS' LANGUAGE COMPETENCE IN THEIR NATIVE (YAKUT) LANGUAGE LESSONS

Kondrateva S. A. ORCID ID 0009-0008-0035-4032,
Polikarpova E. M. ORCID ID 0000-0002-3518-6963

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov", Yakutsk, Russian Federation, e-mail: sardkond@mail.ru

The article is devoted to the theoretical substantiation of the expediency of using methods and techniques of meta-subject technology as a means of activating the language competence of 5th grade students in native (Yakut) language lessons. In a bilingual, Yakut-Russian educational environment, the use of methods and techniques of meta-subject technology can contribute to overcoming the narrow-subject approach to teaching native (Yakut) language. The aim of the article is to identify the appropriate methods and techniques of meta-subject technology in relation to teaching native (Yakut) language in 5th grade. The research is based on the principles of activity, systemacity, and consistency, as well as on the meta-subject, environmental, and cultural approaches. Based on the analysis of research in the field of the meta-subject approach and practices of evaluating meta-subject learning outcomes, as well as the research of methodologists on the theory and methodology of teaching native (Yakut) language, and the results of a survey of native (Yakut) language teachers on the didactic expediency of using methods and techniques of meta-subject technology to activate the language competence of students, the key components of the technology have been identified: the target, content, process, and result-evaluation components. A three-component model of the language competence activated by meta-subject technology has been proposed: the cognitive-linguistic, communicative-activity, and cultural-axiological components. It has been shown that the content basis of the technology is provided by meta-subject tasks that integrate language with history, geography, biology, ethnography, and mathematics. It has been concluded that meta-subject technology changes the status of native language from a subject of study to a universal tool of cognition, which creates conditions for the sustainable activation of the language competence of 5th grade students.

Keywords: meta-subject technology, native (Yakut) language, 5th grade, activation of language competence, bilingual education, essence, content

Введение

В настоящее время в Республике Саха (Якутия), как и в других российских регионах с двумя государственными языками, естественным образом сложилось двуязычие. Согласно Концепции преподавания родных языков народов России, принятой Министерством просвещения РФ в октябре 2019 г., родной язык – это не просто средство общения, а хранитель культурной памяти народа, основа его национального самосознания и часть мирового культурного наследия [1, с. 12].

В условиях динамичного развития образовательной среды республики и внедрения ФГОС становится актуальным выявление и анализ психолого-педагогических предпосылок, необходимых для успешного формирования в рамках билингвального обучения у обучающихся всех ключевых умений: личностных, предметных и метапредметных [2, с. 222]. Современная парадигма образования, закрепленная в ФГОС основного общего образования, требует перехода от знаниево-центрированной модели к компетентностной и метапредметной [3]. Переход на федеральные государственные образовательные стандарты основного общего образования актуализировал задачу формирования у обучающихся метапредметных результатов – универсальных учебных действий, которые позволяют применять знания и умения в различных учебных и жизненных ситуациях [4, с. 6]. Смена уровня образования с начального общего на основное общее у обучающихся 5-го класса представляет собой критический этап, сопряженный с возрастанием объема осваиваемой информации, введением новых учебных дисциплин и необходимостью самостоятельной интеграции межпредметных знаний.

Согласно теории когнитивного развития Ж. Пиаже, описанной в работе «Психология интеллекта», к 9–11 годам обучающиеся переходят на стадию конкретных операций: у них формируется способность к логическому мышлению, однако логические операции осуществляются в отношении конкретных объектов и ситуаций, а не абстрактных понятий [5, с. 136]. В данный период многие обучающиеся теряют интерес к изучению родного (якутского) языка, воспринимая его как набор правил и упражнений, далеких от реальной жизни. Традиционные методы обучения, направленные преимущественно на усвоение грамматических норм и лексики, не в полной мере обеспечивают активизацию языковой компетенции – способности осознанно и уместно пользоваться языковыми средствами в разных видах речевой деятельности.

Метапредметность рассматривается в современной педагогике как один из эффективных способов преодоления предметной изоляции [6]. Он предполагает организацию учебного процесса на основе фундаментальных образовательных объектов (слово, число, знак, время, пространство) и междисциплинарных понятий. Если в большинстве научных работ и в нормативно-правовых документах термин «метапредметный подход» встречается довольно часто, то термин «метапредметная технология» упоминается реже.

Метапредметный подход и метапредметная технология тесно связаны, но решают разные задачи. Если «метапредметный подход» – это философия и теоретическая база образования, то «метапредметная технология» – это конкретный инструментарий, алгоритм действий для воплощения этой философии на практике. Если подход задает стратегию, то технология предлагает алгоритмизированную последовательность шагов, включающую диагностику, проектирование, реализацию и рефлексию.

В данной статье под метапредметной технологией понимается целенаправленно спроектированная система методов и приемов, которая обеспечивает формирование у обучающихся универсальных учебных действий (личностных, познавательных, регулятивных, коммуникативных). Ключевым для данного исследования является то, что интеграция этих метаспособов в процесс обучения родного (якутского) языка создает условия для осознанного оперирования языковым материалом, перевода речевых умений из пассивного запаса в активный, тем самым выступая средством активизации языковой компетенции. Применительно к урокам родного (якутского) языка метапредметная технология позволяет связывать языковой материал с содержанием других дисциплин, таких как история, география, биология, литература, использовать языковые задачи как инструмент познания окружающего мира, а также развивать регулятивные, познавательные и коммуникативные универсальные учебные действия через работу со словом, текстом, дискуссию, проектирование.

Цель исследования – выявить целесообразные методы и приемы метапредметной технологии применительно к изучению родного (якутского) языка в 5-м классе, представить и проанализировать опыт практической реализации метапредметной технологии на уроках родного (якутского) языка в 5-м классе, описать конкретные методы и приемы работы, а также показать ее влияние на активизацию языковой компетенции обучающихся.

Материалы и методы исследования

Методами исследования послужили теоретический анализ психолого-педагогической, методической литературы по рассматриваемой проблеме, педагогический эксперимент (констатирующий, формирующий и контрольный этапы), анкетирование, наблюдение. В эксперименте участвовали два 5-х класса МАОУ «Саха политехнический лицей» г. Якутска: экспериментальный (5 «В», 31 обучающийся) и контрольный (5 «Б», 34 обучающихся). В экспериментальном классе обучение родному (якутскому) языку велось с использованием разработанной авторами методической системы метапредметной технологии, в контрольном – по традиционной методике по учебнику «Саха тыла» (5-й класс) [7]. Длительность эксперимента – 2 месяца (IV учебная четверть). Кроме того, был проведен опрос учителей родного (якутского) языка, имеющих опыт работы с обучающимися 5-го класса. Ввиду высокой квалификации привлеченных учителей (средний стаж работы составил 21 год), опрос носил экспертный характер.

Для оценки уровня активизации языковой компетенции использовалась авторская диагностическая программа, включающая три блока: 1) когнитивно-языковой (лексико-грамматический тест, 20 заданий); 2) коммуникативно-деятельностный (построение диалога из 5–7 реплик на заданную тему, составление плана текста); 3) культурно-аксиологический (интерпретация этнокультурных реалий в тексте, рефлексивное эссе). Каждый блок оценивался по 10-балльной шкале, после чего вычислялся интегральный показатель (от 0 до 30 баллов), на основе которого выделялись три уровня активизации: низкий (0–14 баллов), средний (15–22), высокий (23–30).

Результаты исследования и их обсуждение

Проблема активизации языковой компетенции обучающихся 5-го класса в контексте метапредметной технологии в научных исследованиях рассматривается в разных аспектах. Активизация языковой компетенции с использованием метапредметной технологии трактуется как способ формирования целостного мышления и коммуникативных навыков. Этот подход, ориентированный на межпредметные связи и УУД, позволяет перевести знания из пассивного запаса в активное использование, способствуя развитию познавательной и рефлексивной деятельности [8, с. 279]. Авторами были выделены следующие аспекты изучения проблемы:

– коммуникативный – внедрение технологий, способствующих актуализации знаний на разном языковом материале, развивает способность применять язык в учебной и социальной практике;

– функциональный – языковая компетенция рассматривается как основа для понимания и рефлексии, где метапредметная технология служит инструментом активизации мышления и речи;

– возрастной – исследование охватывает развитие универсальных учебных действий при обучении родному (якутскому) языку обучающихся 5-го класса, учитываются их возрастные особенности;

– дидактический – рассматриваются конкретные методы и приемы формирования метапредметных результатов, включающие педагогическое взаимодействие и интерактивные методы обучения.

На основе анализа работ А. В. Хуторского [9], А. Г. Асмолова [10], Ю. В. Громыко [11], Н. В. Громыко и адаптации к условиям якутской билингвальной школы авторами уточнено определение: метапредметная технология обучения родному (якутскому) языку – это алгоритмизированная система взаимосвязанных этапов, методов и приемов, основанная на междисциплинарных понятиях и фундаментальных образовательных объектах, направленная на формирование УУД и активизацию языковой компетенции обучающихся за счет перевода языка из объекта изучения в инструмент познания и коммуникации.

Выделены компоненты метапредметной технологии:

1. Целевой – формирование метапредметных результатов и языковой личности, способной к рефлексии, самообучению, межкультурному диалогу.

2. Содержательный – междисциплинарные понятия (слово, число, пространство, время, знак), аутентичные и адаптированные тексты краеведческого и научно-популярного характера, метапредметные задачи.

3. Процессуальный – этапы (мотивационно-ориентировочный, операционально-деятельностный, рефлексивно-оценочный), методы (проблемное обучение, кейс-метод, проекты), приемы (интеллект-карты, диалог культур, «перевод с языка на язык»).

4. Результативно-оценочный – критерии активизации языковой компетенции (когнитивная гибкость, частота и разнообразие речевых действий, способность к переносу знаний), уровни (низкий, средний, высокий).

Практическая реализация: описание метапредметных уроков. Для иллюстрации методического инструментария приведем фрагменты двух уроков, проведенных в экспериментальном классе 5 «В» в рамках раздела «Синтаксис и пунктуация» («Сиинтэксис уонна сурук бэлиэтэ») по теме «Диалог» («Кэпсэтии») [7, с. 124] и раздела «Состав слова и орфография» («Тыл састааба уонна арпагыраапыйа») по теме «План текста» («Тиэкис былаана») [7, с. 138].

Урок 1. Тема «Диалог» («Кэпсэтии»). Метапредметные связи: этнография, биология.

Даны следующие задания:

Проблемная ситуация: прослушав в видеозаписи шум леса, увидев природу Якутии (реку, лес, лошадей) и включив воображение, сформулируйте возможные темы диалога между охотником и Байанай. Баай Байанай – в якутской мифологии дух – хозяин леса, тайги и покровитель охотников, приносящий удачу и богатую добычу [12, с. 42]. О чем может спросить и что может попросить охотник у Байаная? При использовании данного метода у обучающихся развивается не только воображение, но и экологическое сознание, чувство ответственности перед природой, уважение к культурному коду якутского народа, а также формируется интерес к якутской мифологии. Обучение родному языку продуктивно в контексте изучения этнической культуры, так как язык народа и его культура едины [13, с. 155].

Работа в парах: Составьте диалог (12 реплик), используя следующие опоры: айылҕа (природа), Саха сирин Кыһыл кинигэтэ, (Красная книга Республики Саха (Якутия)), тулалыыр эйгэ, (окружающая среда), көтөрдөр (птицы), названия птиц – туруйа (журавль), куба (лебедь), кыталык (стерх), күөрэгэй (жаворонок), географические названия местности (например, долина Туймаада, река Лена, река Вилюй), глаголы – олохсуйаллар (обитают), көтөллөр (летят, улетают). В диалоге используйте известные вам формулы приветствия («Дорообо», «Үтүө күнүнэн»), благодарности («Махтал») и прощания («Көрсүөххэ диэри»).

Метапредметный акцент: После разыгрывания диалога обучающиеся выделяют в нем вопросительные и побудительные предложения (синтаксис) и объясняют, почему в якутской культуре вид определенных птиц является священным и почему он занесен в Красную книгу Республики Саха (Якутия).

Рефлексия: Переведите одну реплику диалога на язык жестов и мимики. Объясните, какие грамматические значения пришлось передавать невербально.

Выполнение задания в парах обеспечивает интегративное развитие у обучающихся языковой компетенции (активизация тематической лексики и речевых формул), коммуникативных универсальных учебных действий (построение диалога, взаимодействие), экологического и этнокультурного воспитания, осознание ценности природы и культурного наследия родного края, знакомство с Красной книгой Республики Саха (Якутия) [14], а также данное задание способствует снижению тревожности и повышению речевой активности благодаря опорному характеру задания.

Урок 2. Тема «План текста» («Тиэкис былаана»). Метапредметные связи: география, математика, экология. Даны следующие задания по данной теме:

Работа по тексту «Дьокуускай куорат» («Город Якутск») (100 слов). Задание: составьте план рассказа о городе Якутске, оформив его в виде маршрутной карты для туристов или для своих гостей и родственников. В плане должны быть отражены не только смысловые части, но и ключевые слова-связки (онно, онтон, уонна). Выполнение данного задания обеспечивает у обучающихся развитие навыков смыслового чтения и компрессии текста, овладение текстовыми связками (*онно, онтон, уонна*) как средством логической связи, формирование умения перекодировать информацию в маршрутную карту с учетом целевой аудитории, а также воспитание краеведческой идентичности и гостеприимства через создание привлекательного образа родного города.

Работа в малых группах: каждой группе дается таблица с числовыми данными (объем г. Якутска, количество населения, достопримечательности и памятники) – необходимо на основе этих данных придумать 2–3 предложения на родном (якутском) языке для включения в текст и отразить их в плане. Данная работа с числовыми данными о г. Якутске развивает у обучающихся умение переводить статистическую информацию в связное высказывание на якутском языке, навыки группового взаимодействия и распределения ролей, формирует чувство точности и достоверности фактов, а также углубляет количественное и ценностное восприятие родного города через оперирование реальными показателями его величины, населения и культурного наследия.

Орфографическая задача: в тексте намеренно допущены ошибки в написании числительных и пространственных послелогов. При составлении плана требуется найти и исправить эти ошибки.

Уровни активизации языковой компетенции обучающихся 5-х классов (констатирующий и контрольный срезы), %

	Экспериментальный класс – 31 обучающийся		Контрольный класс – 34 обучающихся	
	До эксперимента	После эксперимента	До эксперимента	После эксперимента
Низкий	42 %	39 %	40 %	39 %
Средний	46 %	45 %	45 %	45 %
Высокий	12 %	16 %	15 %	16 %

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Выполнение орфографической задачи с числительными и пространственными послелогами в сочетании с составлением плана обеспечивает у обучающихся автоматизацию навыков правописания указанных грамматических категорий, развитие орфографической зоркости и самоконтроля, формирование умения редактировать текст, а также повышение мотивации через игровой компонент поиска и исправления ошибок.

Рефлексия: узнали ли о городе Якутске новые интересные факты? По каким местам можно прогуляться? Чем отличается наш город от других городов России? Данное задание учит ребят размышлять о своем городе, видеть его уникальность, запоминать интересные факты, выражать личное отношение и сравнивать, то есть превращает знания в личный опыт и гордость за свою малую родину.

Эти примеры показывают, как метапредметная технология позволяет «оживить» языковой материал, сделать его инструментом для получения и оформления знаний из других областей. Кроме этого, анализ текста приучает обучащихся 5-го класса видеть различные средства связи, оценивать их, сравнивать, обобщать и систематизировать [15, с. 107].

Результаты эксперимента и опрос учителей: экспертный опрос учителей показал, что 69 % респондентов считают, что у обучающихся 5-го класса наблюдается снижение интереса к родному (якутскому) языку при традиционном обучении; 65 % отмечают, что метапредметные задания повышают речевую активность, особенно у обучающихся с низким уровнем языковой компетенции, а также 61 % учителей хотели бы получить банк метапредметных заданий по родному (якутскому) языку.

Динамика активизации языковой компетенции в экспериментальном и контрольном классах представлена в таблице.

Как видно из таблицы, в экспериментальном классе доля обучающихся с высоким уровнем активизации языковой компетенции выросла. В контрольном классе изменения незначительны. Количество обучающихся с низким уровнем в экспериментальной группе сократилось больше, чем в контрольном. Дополнительный анализ по компонентам модели показал, что наиболее выраженный прирост (средний балл вырос с 4,5 до 7,1 из 10) достигнут в коммуникативно-деятельностном компоненте – умении строить диалог и монолог на якутском языке в нестандартных ситуациях.

Качественный анализ устных ответов и письменных работ экспериментального класса выявил: увеличение объема активного словаря (в среднем на 20–25 новых слов за четверть); более частое использование сложных синтаксических конструкций (сложноподчиненные предложения с союзами «буоллаҕына», «оттон», «ол иһин»); проявление рефлексии: в эссе большинство обучающихся указали, что «якутский язык помогает понять географию и историю Якутии».

Выводы

Метапредметная технология на уроках родного (якутского) языка нацелена на активизацию языковой компетенции, развитие критического мышления, коммуникативных навыков и способности применять знания в реальных жизненных ситуациях. Проведенное теоретико-экспериментальное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Уточнена сущность метапредметной технологии применительно к родному (якутскому) языку. Это не просто набор межпредметных заданий, а целостная процессуальная система, включающая целевой, содержательный, процессуальный и оценочный компоненты. Она изменяет статус родного языка с учебного предмета на универсальный инструмент познания, что создает условия для устойчивой активизации языковой компетенции.

2. Экспериментально доказана эффективность метапредметной технологии, в экспериментальном классе доля обучающихся с высоким уровнем активизации языковой компетенции выросла, в то время как в контрольном классе значимых изменений не произошло.

3. Выявлены практико-ориентированная методика успешной реализации метапредметной технологии применительно к родному (якутскому) языку – систематическое включение метапредметных задач (не реже одного раза в две недели), опора на региональное содержание (история, география, этнография Якутии), использование рефлексивных техник («перевод с языка на язык», метафорическое моделирование).

Список литературы

1. Васильева Н. Н., Никифорова Е. П. Некоторые подходы к формированию коммуникативных компетенций у младших школьников на уроках родного языка // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Гуманитарные науки. 2020. № 11–2. С. 12–14. DOI: 10.37882/2223-2982.2020.11-2.04. EDN: MFEKGH.

2. Поликарпова Е. М., Кондратьева С. А. Активизация языковой компетенции посредством внедрения метапредметной технологии в обучении якутскому языку // Глобальный научный потенциал. 2025. Т. 2. № 11 (176). С. 221–224. EDN: OTEXUO.

3. Федеральный государственный образовательный стандарт основного общего образования: утверждено приказом Минобрнауки России от 17 декабря 2010 г. № 1897 [Электронный ресурс]. URL: https://fgos.ru/fgos/fgos-ooo/ (дата обращения: 10.04.2026).

4. Машарова Т. В. Управление учебной деятельностью учащихся на основе метапредметности // Вестник Костромского государственного университета. Серия: Педагогика. Психология. Социокинетика. 2019. Т. 25. № 1. С. 6–12. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-uchebnoy-deyatelnostyu-uchaschihsya-na-osnove-metapredmetnosti/viewer (дата обращения: 10.04.2026).

5. Психология интеллекта / Жан Жак Пиаже. СПб.: Питер, 2004. 192 с. ISBN 5-947230-96-8.

6. Хуторской А. В. Обсуждаем метапредметное содержание образования с позиций человекосообразности // Эйдос. 2017. № 3. С. 8. EDN: ZVRIIF.

7. Саха тыла. 5 кылаас: уопсай үөрэхтээһин тэрилтэлэригэр үөрэх кинигэтэ / И. Е. Алексеев, И. П. Винокуров, Г. И. Гурьев и др. 3-е изд. Дьокуускай: Айар, 2025. 191 с. ISBN 978-5-7696-7357-3.

8. Унарова В. Я. Метаязыковая деятельность учащихся-билингвов (начальная школа) // Метапредметный подход в образовании: Русский язык в школьном и вузовском обучении разным предметам: сборник статей межрегиональной научно-практической конференции (г. Москва, 19 апреля 2018 г.) / Составитель О. Е. Дроздова. М.: Московский педагогический государственный университет, 2018. С. 278–285. EDN: YSACMH.

9. Хуторской А. В. Пять уровней реализации метапредметного подхода в содержании образования // Вестник Института образования человека. 2017. № 2. С. 8. EDN: UUNYNY.

10. Формирование универсальных учебных действий в основной школе: от действия к мысли. Система заданий: Пособие для учителя. Серия: Стандарты второго поколения / А. Г. Асмолов, Г. В. Бурменская, И. А. Володарская и др. 6-е изд. М.: Просвещение, 2017. EDN: APPJEC.

11. Громыко Ю. В., Просекин М. Ю. Обучающая мыследеятельность нового поколения и базовые педагогические компетенции // Психолого-педагогические исследования. 2022. Т. 14. № 2. С. 100–128. DOI: 10.17759/psyedu.2022140207. EDN: MGHPMP.

12. Винокуров В. В. Иччи (духи-хозяева) в якутском героическом эпосе Олонхо // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. Серия: Эпосоведение. 2017. № 3 (7). С. 38–51. EDN: ZIFYKR.

13. Поликарпова Е. М., Ефремов Н. Н., Молукова С. В. Дидактические предпосылки сохранения и развития родного языка // Общество: социология, психология, педагогика. 2021. № 11 (91). С. 152–157. DOI: 10.24158/spp.2021.11.24. EDN: OTRRSA.

14. Красная книга Республики Саха (Якутия) / М-во охраны природы Респ. Саха (Якутия), Департамент биол. ресурсов, Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Якут. науч. центр, Ин-т биол. проблем криолитозоны. Якутск: Сахаполиграфиздат, 2000. Т. 2: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды животных (насекомые, рыбы, земноводные, пресмыкающиеся, птицы, млекопитающие) / редкол.: В. Г. Алексеев (пред.), Н. Г. Соломонов, М. М. Тяптиргянов. 2003. 205 с. ISBN 5-85259-814-3.

15. Андреева А. А. Активизация речемыслительной деятельности учащихся якутских школ при изучении лексических средств связности текста // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. 2006. Т. 5. № 23. С. 104–109. EDN: KZPFDL.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 378.147:811.111’243
DOI 10.17513/snt.40848

CC BY 4.0

SUMMARY КАК ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ПРОФЕССИОНАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ ТЕКСТОВ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ РУССКИМИ И КИТАЙСКИМИ СТУДЕНТАМИ

Минина О. Г. ORCID ID 0000-0001-6709-7546,
Потемкина В. А. ORCID ID 0000-0003-1256-6522

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный педагогический университет имени А. И. Герцена», Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: sefl@mail.ru

В статье рассматривается использование технологии summary на занятиях по профессионально ориентированному английскому языку в группах русских и китайских студентов. Целью исследования было изучение summary как самостоятельной технологии и определение круга ее возможностей для стимуляции говорения на английском языке для решения профессиональных задач. Предлагается определение, типология и модель технологии, а также рассматриваются возможности ее применения к созданию различного типа вторичных реферативных текстов. Приводится анализ прогрессивного развития навыка говорения и критического (аналитического) мышления. Исследование было проведено на базе РГПУ им. А. И. Герцена. Материалом исследования послужили листы наблюдений (протоколы) обучения студентов различных направлений технологии summary. Авторы приходят к выводу о том, что технология summary позволяет более эффективно развивать у студентов навыки порождения вторичных текстов различной структуры и сложности, умение работать с разным количеством реферируемых текстов, создавая источниковедческие и политические обзоры, рекламные посты-обзоры и другие типы профессиональных текстов. Доказывается, что данная технология способствует развитию критического мышления и способности вскрывать подсмыслы и импликатуры в рекламном и политическом текстах, строить гипотезы об интенциях автора и грамотно их формулировать на английском языке. Повышается качество устной речи, ее структурированность, логичность, грамотность, снижается количество ошибок, что в итоге позволяет студентам на более высоком уровне решать реальные профессиональные задачи. В то же время авторы отмечают необходимость тщательного отбора текстов при работе с иностранными студентами, в частности с китайскими, учет особенностей их менталитета и коммуникативных сложностей.

Ключевые слова: технология summary, профессионально ориентированный текст, вторичный текст, английский язык, навык говорения, критическое мышление

SUMMARY AS A TECHNOLOGY TO CREATE SECONDARY PROFESSIONALLY ORIENTED TEXTS IN ENGLISH BY RUSSIAN AND CHINESE STUDENTS

Minina O. G. ORCID ID 0000-0001-6709-7546,
Potemkina V. A. ORCID ID 0000-0003-1256-6522

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Russian State Pedagogical University named after A. I. Herzen”, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: sefl@mail.ru sefl@mail.ru

The article discusses the use of summary technology in professionally oriented English classes in groups of Russian and Chinese students. The purpose of the study was to investigate summary as an independent technology and indicate the range of its capabilities to stimulate English speaking to solve professional problems. The definition, typology and model of the technology are proposed, and the possibilities of its application to the creation of various types of secondary abstract texts are considered. The article provides an analysis of the progressive development of speaking skills and critical (analytical) thinking. The study was conducted on the basis of Herzen State Pedagogical University. The study material involved students’ observation sheets while teaching them English due to summary technology. The authors conclude that summary technology allows students to more effectively develop the skills of generating secondary texts of various structures and complexity, the ability to work with a different number of refereed texts, creating scientific and political reviews, advertising posts and other types of professional texts. The authors prove that this technology promotes the development of critical thinking and the ability to uncover sub-meanings and implications in advertising and political texts, build hypotheses about the author’s intentions and correctly formulate them in English. In general, the quality of oral speech increases (its structure, logic and literacy), and the number of errors decreases, which ultimately allows students to solve real professional tasks at a higher level. At the same time, the authors note the need for careful selection of texts when working with international students, in particular, with Chinese, knowledge of the peculiarities of their mentality and communicative difficulties.

Keywords: summary technology, professionally oriented text, secondary text, English, speaking skills, critical thinking

Введение

Процесс реферирования текста, бесспорно, является необходимым этапом научной и интеллектуально-профессиональной деятельности. Большинство авторов напрямую связывают коммуникативную компетенцию выпускников вуза и научных работников с анализом и компрессией текстов и обосновывают необходимость подготовки студентов именно в этом аспекте (М. А. Слепнева, Л. С. Пичкова) [1, 2]. Реферирование рассматривается обычно в практико-ориентированном ключе как технология порождения вторичных текстов при обучении преимущественно чтению и письму. Все авторы, так или иначе затрагивающие данную тему, пишут об актуальности обучения реферированию (Н. А. Дронова, Е. И. Мартынова и др.) [3, 4]. Некоторые из них на основании анализа аутентичных англоязычных источников и опыта работы со студентами вузов предлагают языковые клише и стратегии создания вторичных текстов на английском языке (Е. А. Горбаренко, С. А. Домышева, М. А. Adzintsova) [5–7]. В практико-ориентированной работе Л. П. Маркушевской содержатся теоретические положения и практический инструментарий (последовательность, план и вокабуляр) по составлению письменных аннотаций и рефератов [8]. В статье Е. Н. Солововой и И. А. Басовой [9] особое внимание обращается на необходимость обучать студентов письменному реферированию именно «звучащего» академического текста. Для успешного реферирования аудиотекста предложена определенная последовательность действий и критерии оценивания вторичного текста: адекватность, логичность и полнота изложения, композиционная четкость, единство стиля и языковая грамотность. В то же время акцент на национально-культурных различиях в создании вторичных текстов делается редко. К таким немногочисленным работам можно отнести, например, статью О. А. Казьминой «Обучение написанию вторичных текстов на занятиях РКИ» [10]. Данная статья представляет особый интерес, поскольку обучение иностранных студентов построению текстов на английском и русском языках без языка-посредника (родного) имеет ряд трудностей и специфику, которые на данный момент практически не изучены. В. А. Потемкина также затрагивала данную проблему с точки зрения общей концепции различий в подходе к обучению китайских студентов, но собственно акцент на обучении их процессу реферирования по определенному скрипту еще не ставился [11].

Особый интерес как отечественных, так и зарубежных исследователей вызывает использование технологии реферирования в онлайн-обучении, в том числе с применением искусственного интеллекта. К основным вопросам, рассматриваемым в таких работах, относятся: особенности обучения реферированию текста в дистанционной среде (Л. М. Спыну, И. Н. Мешкова, О. А. Шереметьева) [12], компьютерная обработка и генерация профессионально ориентированных текстов, проблемы, возникающие при использовании технологий искусственного интеллекта, и сравнение текстов, созданных ИИ и традиционно человеком (И. В. Петрова) [13]. Особое внимание привлекает работа R. Zhang [14], в которой на основе анализа 57 статей были выявлены пять основных типов технологий для изучения иностранного языка (технологии мобильного обучения, мультимедийного обучения и социализации, преобразования речи в текст, трансформации текста в речь, а также обучения на основе цифровых игр). Результаты эксперимента позволили выявить преимущества этих технологий: использование новых форматов заданий и видов деятельности, быстрая разработка учебного контента, облегчение взаимодействия между студентами и преподавателем и переосмысление подходов к обучению. Как отмечает автор, эти технологии, будучи интегрированными в различные аспекты преподавания иностранных языков, оказали положительное влияние на процесс усвоения материала в целом.

Некоторые немногочисленные авторы связывают реферирование с технологией развития критического мышления (Т. В. Леденева) [15]. В статье Т. В. Леденевой, например, реферирование рассматривается как интеллектуальный процесс, включающий в себя смысловую компрессию оригинального текста и создание его краткой, но семантически адекватной версии. Предлагается алгоритм обучения реферированию и даются методические рекомендации по обучению студентов навыкам смыслового свертывания текста, развитию способности к обобщению, перифразу, абстрагированию от конкретной вербальной формы выражения, построению визуальной схемы и созданию итогового реферата.

В своих более ранних работах [16, 17] автор рассматривала реферирование профессиональных текстов с точки зрения отбора и компрессии информации под поставленные задачи, систематизации и упорядочивания в соответствии с практической профессиональной задачей, рефлексии и умения аргументировать свою позицию.

Целью такой работы было создание целостной и эффективной системы интеграции профессионального обучения магистрантов и развития их когнитивных, конструктивно-проектных, коммуникативных, лидерских и управленческих компетенций в рамках решения профессиональных задач на английском языке.

С точки зрения алгоритма обучения и стратегий реферирования интересным представляется англоязычное пособие "What's the Main Idea?": Using Text Structure to Build Comprehension [18], которое рассматривает различные способы структурирования текста в зависимости от возрастных категорий обучающихся для формирования понимания прочитанного. Авторы подробно описывают предлагаемую структуру для ускорения понимания текста (FASCT) и обучения студентов формулировать основную идею в виде краткого изложения. Структура представляется авторами как универсальная, применимая к текстам любого жанра. К основным ее элементам относятся: описание структуры текста, выделение основных мыслей, реферирование, использование схем и диаграмм, выделение и интерпретация слов-связок (смысловых маркеров). Но ни в одной из изученных работ технология реферирования не рассматривается как способ обучения говорению.

Таким образом, можно с определенностью сказать, что в работах отечественных и зарубежных исследователей тема реферирования рассматривается исключительно в ракурсе обучению чтению и письму в практико-ориентированном ключе. При этом многие авторы останавливаются на ней мимоходом и исследуют фрагментарно, считая, что проблема не имеет самостоятельной научной ценности. В то же время потенциал этого вида когнитивной операции далеко не полностью изучен и исчерпан.

Цель исследования – изучение summary как самостоятельной технологии, и определение круга ее возможностей для стимуляции говорения на английском языке для решения профессиональных задач. В задачи данной статьи входит: рассмотрение понятия и типологии summary, классификация по различным основаниям, лексическое наполнение и языковой инструментарий и предварительная оценка эффективности технологии, проверенная опытным путем.

Материалы и методы исследования

Исследование было проведено на базе РГПУ им. А. И. Герцена, в институтах философии человека, истории и социальных наук и русского языка как иностранного (с китайскими студентами). Материалом исследования послужили листы наблюдений (протоколы) обучения студентов различных направлений технологии summary. Методы исследования, используемые в работе, включали: общефилософские методы анализа и синтеза, метод дефиниции, метод классификации, наблюдение, педагогический эксперимент, графическую репрезентацию результатов исследования.

Результаты исследования и их обсуждение

Прежде чем говорить об изучаемом феномене, возникла необходимость его определить. *Под summary авторы понимают технологию реферирования текста, включающую: название, определение формата и источника текста, смысловое деление текста на части, выделение эксплицитных и имплицитных стратегий автора, вывод. Неотъемлемыми характеристиками summary являются постоянные ссылки на автора текста, определение его стратегий воздействия на адресата и использование общенаучной лексики, позволяющей эти стратегии сформулировать.*

Последовательность этапов summary схематически представлена на рис. 1.

Лексика, предложенная студентам для использования в summary, включала в себя следующие лексические единицы:

1. The title of the article is…(The article is entitled…)
2. The article is taken from…
3. The article can be subdivided into…. parts.

In the first abstract (part) of the article the author: states, argues, contends, claims, declares, affirms, asserts, thinks, believes, puts forward (advances) the idea, introduces the notion of…, propounds a notion (a theory) that, sets out a doctrine (theory) of…

In the second part (abstract) (then) the author: (re)formulates a hypothesis, identifies the problems of…, highlights, emphasizes, focuses on, specifies, probes into…, justifies, advocates, argues for/against smth., rejects, acknowledges, makes an assumption about smth., assumes, shares views (assumptions), accepts (denies) the validity of …, rests his argument on…, grounds his argument on…, recognizes the merit of…, pays attention to…, draws our attention to…, points out flaws (in the argument), explores, studies, investigates, notes, outlines, implies, enumerates, gives examples, proves, classifies, passes over to…

4. At the end the author: arrives at a conclusion (solution) that…, concludes (comes to a conclusion) that…, sums up with…, offers a criterion for…, summarizes with…



Рис. 1. Алгоритм summary
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

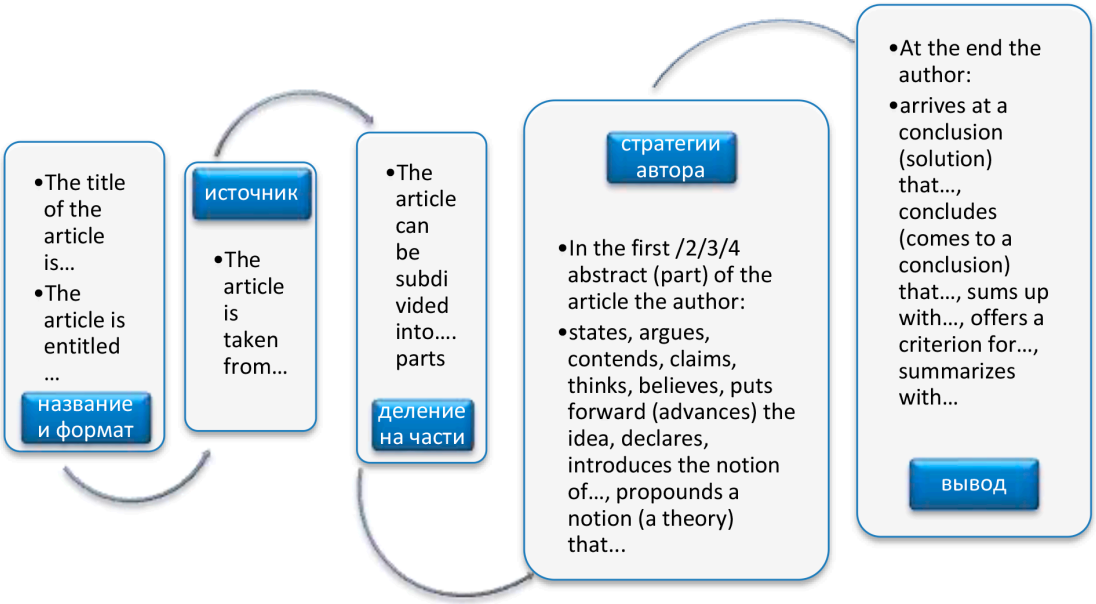


Рис. 2. Стратегия summary
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

В целом когнитивную последовательность и лексическое наполнение структуры summary можно представить следующей схемой (рис. 2).

В процессе работы с данной технологией со студентами были выделены следующие типы summary:

1) по количеству одновременно реферируемых текстов: *монотекстовое summary* (реферируется один текст), *компаративное summary* (реферируются и сравниваются два текста) и *политекстовое summary* (реферируется более двух текстов: источниковедческий обзор, обзор политических новостей);

2) по типу реферируемого(-ых) текстов: summary аудиотекста, печатного текста, видео, креолизованного текста (совмещающего в себе несколько информационных кодов, например рекламного текста);

3) по типу анализируемой информации: *эксплицитное summary* (вскрытие поверхностной структуры текста и очевидных интенций автора) и *имплицитное summary* (вскрытие подсмыслов и манипулятивных стратегий автора, например, в политическом и рекламном тексте);

4) по времени отнесенности текста: ретроспективное summary (реферирование уже созданного текста) и *проспективное summary* (анонс будущего текста).

Схематически эти классификации представлены на рис. 3.1 и 3.2.

Наиболее простым и часто используемым в процессе обучения является монотекстовое ретроспективное эксплицитное summary печатного текста.

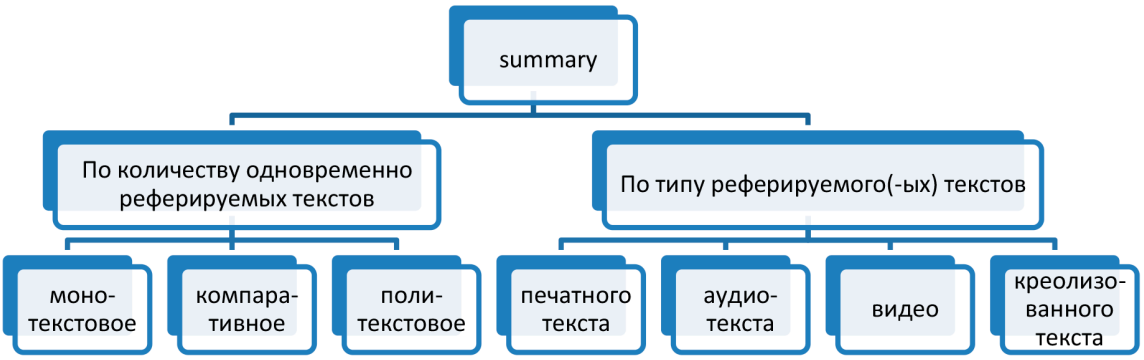


Рис. 3.1. Классификация summary
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

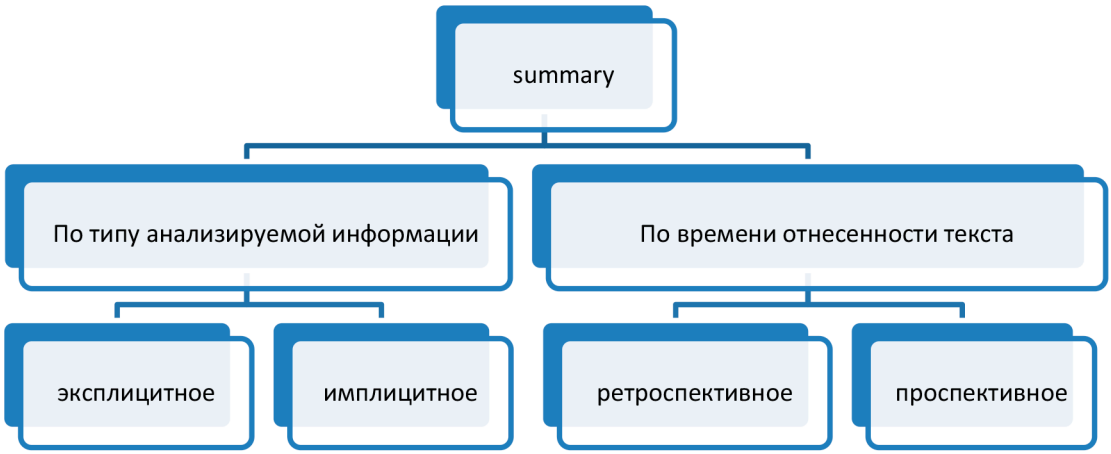


Рис. 3.2. Классификация summary (продолжение)
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Именно печатный текст и этот тип summary был выбран для эксперимента со студентами направлений «зарубежное регионоведение», «связи с общественностью» и «русский язык как иностранный». Целью эксперимента было выявить эффективность использования технологии summary при создании устного вторичного текста – пересказа, а также выявить разницу, если она обнаружится, между прогрессом русских и китайских студентов.

На первом этапе студентам уровня B1 было предложено пересказать текст общепрофессиональной направленности, касающийся проблем межкультурной коммуникации. Задача ставилась следующим образом: пересказать текст, выделяя стратегии автора и комментируя, какие задачи автор последовательно решает в тексте. При этом схема summary студентам предоставлена не была. На выполнение задания отводилось 15 мин, предполагалось, что за это время студенты выполнят скан-чтение и перескажут содержание текста, выполняя задание (использование телефонов и ИИ не разрешалось).

При прослушивании студентов преподаватель заполнял следующий лист-протокол (табл. 1).

Оценивались следующие критерии:

– Структурность – четко и правильно выделены смысловые части и есть слова-маркеры, которые их разграничивают – 1 балл.

– Последовательность – в пересказе студент плавно ведет слушателя от предпосылок к следствиям, без обрывов мысли с корректным использованием маркеров рубрикации, наречий последовательности, союзов, вводных слов – 1 балл.

– Логичность – следствия закономерно вытекают из причин, студент корректно выявляет стратегии автора и называет их – 1 балл.

– Вокабуляр богатый, профессионально-насыщенный, соответствует уровню B2 – 1 балл.

– Полнота – все значимые смысловые акценты текста отражены в пересказе – 1 балл.

Таблица 1

Лист-протокол группы

Группа	Этап 1		
№	Структурность, логичность, последовательность, вокабуляр, полнота пересказа (0–5)	Число смысловых пропусков	Число языковых ошибок
Студ. 1			
Студ. 2			
Студ. 3			

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 2

Лист-протокол сводный

Гр	Этап 1				Этап 2			
	Количество справившихся с заданием «реферирование» (%)	Структурность, логичность, последовательность, полнота пересказа (средний балл)	Число смысловых пропусков (среднее)	Число языковых ошибок (среднее	Количество справившихся с заданием «реферирование» (%)	Структурность, логичность, последовательность, полнота пересказа (средний балл)	Число смысловых пропусков (среднее)	Число языковых ошибок (среднее)
РИСО 1	32 %	3,4	5,5	8,1	67 %	4,2	2,1	3,1
РИСО 2	43 %	2,2	4,7	7	81 %	5	2,4	2
ЗР1	55 %	2,6	5,2	5,4	87 %	5	1,5	1
ЗР2	70 %	1,3	3,3	3,6	90 %	4,3	1,3	1
РКИ 1	66 %	2,75	3,9	6	66 %	3,9	1	3,4

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

– Число смысловых пропусков – опущенная значимая информация.

– Число языковых ошибок – считались лексические и грамматические ошибки.

Далее на протяжении двух занятий студентов знакомили со структурой summary и вокабуляром и тренировали данный вид заданий.

На втором этапе студентам было предложено пересказать аналогичный по тематике, сложности и объему текст, выделяя стратегии автора и комментируя, какие задачи автор последовательно решает в тексте с использованием схемы summary. На выполнение задания отводилось также 15 мин (использование телефонов и ИИ не разрешалось). При прослушивании студентов преподаватель заполнял аналогичный лист-протокол для этого этапа. Дополнительно на каждом этапе подсчитывалось количество справившихся с заданием в процентах от общего количества студентов, выполнявших задание.

Результаты эксперимента в целом можно обобщить следующим образом (табл. 2).

Заключение

При сравнении результатов первого и второго этапов было отмечено существенное увеличение процента студентов, справившихся с заданием «реферирование», во всех группах (в полтора-два раза), Это объясняется тем, что, получив четкую структуру, студенты быстрее и качественнее стали создавать тексты по привычной и понятной им модели. Исключением стала группа РКИ. Здесь процент справившихся с заданием остался прежним, что объясняется рядом причин. Во-первых, в этих группах были студенты уровня А2, не справившиеся с заданием ни в первый, ни во второй раз, поскольку общий невысокий уровень языковой подготовки требовал большего времени на тренировку. Кроме того, один учащийся отказался выполнять задание из-за наличия в нем концептов, не обсуждающихся в китайской культуре открыто, например понятия «потери лица», а также темы «гуаньси» (по блату) или непотизма. Они являются очень чувствительными темами в китайском обществе, и в печатном/учебном тек-

сте это не типичная тема для обсуждения. К тому же, именно в обществе иностранного преподавателя и в другой стране обсуждение «внутренних» проблем китайского общества, как раз и воспринимается как «потеря лица». Третьей причиной можно считать то, что традиционно обучение иностранному языку в Китае ориентировано на чтение и письмо, а не на говорение, китайские студенты испытывают больше трудностей, чем русские студенты, при неподготовленном говорении, а в данном случае на подготовку было дано всего 15 мин.

В то же время во всех группах обучающихся от первого ко второму этапу существенно выросло качество вторичных текстов: они стали структурными, более логичными и последовательными, вокабуляр усложнился, тексты стали соответствовать уровню B1–B2. Пересказ стал более полным, сократилось количество смысловых пропусков и существенно снизилось число языковых (грамматических и лексических) ошибок. Это касалось и русских, и китайских студентов, с той лишь разницей, что русские студенты показали все-таки более выраженную положительную динамику, как следует из табл. 2.

Это визуально заметные и количественно обрабатываемые результаты, касающиеся достаточно простого типа summary – монотекстового ретроспективного эксплицитного summary печатного текста. Но предложенная структура может быть применена и к более сложным типам заданий: компаративному и политекстовому summary, summary аудио, видео и креолизованного текста, имплицитному (вскрытие подсмыслов и манипулятивных стратегий автора) и проспективному summary (анонс будущего текста). Эти типы summary сложнее поддаются количественному анализу, требуют больше времени на освоение и подготовку, а также предполагают большую подготовленность самого преподавателя к аналитической работе с профессионально ориентированным текстом.

Тем не менее опыт включения подобных заданий в учебную программу уже позволяет оценить их преимущества, к которым можно отнести развитие у студентов следующих интеллектуальных и профессионально-коммуникативных способностей:

– умение работать с разными по структуре, содержанию и сложности текстами по инвариантной стержневой схеме;

– умение работать с разным количеством реферируемых текстов, создавая источниковедческие и политические обзоры, рекламные посты-обзоры и другие типы профессиональных текстов;

– развитие критического мышления и способность вскрывать подсмыслы и импликатуры в рекламном и политическом текстах, строить гипотезы об интенциях автора и грамотно их формулировать на английском языке;

– умение разворачивать вторичный текст summary в будущее и говорить о структуре будущего проекта и текстового продукта (рекламного объявления, аналитического обзора и т. д.), причем с выделением как эксплицитных, так и имплицитных стратегий;

– повышение качества устной речи, которая становится структурированной, логичной, грамотной, соответствует уровню интеллектуального развития молодого специалиста и позволяет им на высоком уровне решать реальные профессиональные задачи.

Таким образом, технология summary представляется исключительно эффективной, важной и во многих случаях оптимальной при подготовке студентов к созданию вторичных профессионально ориентированных как письменных, так и (что особенно важно) устных текстов. Знание структуры summary снимает необходимость обращаться к помощи искусственного интеллекта, писать и заучивать сложные тексты, но позволяет за 10–15 мин представить собственный достойный речевой продукт и решить профессиональную задачу. Тем не менее следует отметить необходимость тщательного отбора текстов при работе с иностранными студентами, в частности с китайскими. Следует учитывать особенности их менталитета и коммуникативные сложности, а также привычные для них модели обучения и поведенческие стереотипы.

Важно также отметить, что адаптация summary для студентов разного уровня языковой подготовки не требует существенных изменений (упрощения или усложнения) самой технологии, а заключается в подборе текстов (печатные или аудио, один текст или несколько, с эксплицитным или имплицитным содержанием и т. д.). На основе предложенной инвариантной схемы преподаватель может варьировать задачи – упрощать или усложнять их: например, предложить студентам в формате summary рассказать о будущем рекламном ролике или плане своего научного исследования. Разнообразие задач на основе summary, поставленных перед обучающимися, многообразно и зависит лишь от творческого подхода преподавателя и направления обучения студентов. А вариативность и постоянное усложнение вторичных текстов на основе summary раскрывает перед развивающимся профессионалом все новые и новые когнитивные и коммуникативные возможности. И если на ознакомление студентов с технологией на примере простейшего текста ушло только три занятия (включая контрольный срез), сложные вторичные тексты требуют

большего времени на отработку и освоение. В принципе же данная технология позволяет обслуживать потребности специалиста любого профиля и любого уровня экспертности в создании высококачественных профессионально ориентированных текстов под любую задачу профессиональной деятельности.

Список литературы

1. Слепнева М. А. Профессионально ориентированное обучение аспирантов иностранному языку в системе многоуровневой подготовки в вузе // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Гуманитарные науки. 2025. № 1. С. 151–155. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=80576186 (дата обращения: 30.03.2026). DOI: 10.37882/2223-2982.2025.01.37. EDN: JYEAMY.

2. Пичкова Л. С. Школа экономического/делового английского языка // Вестник МГИМО Университета. 2014. № 5 (38). С. 206–208. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=22770389 (дата обращения: 30.03.2026). EDN: TEHKBX.

3. Дронова Н. А. Вторичные тексты как средство оптимизации иноязычной подготовки будущих специалистов // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 64–4. С. 44–48. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=43874244 (дата обращения: 30.03.2026). DOI: 10.18411/lj-08-2020-127. EDN: LYQFBI.

4. Мартынова Е. И. Актуализация обучения аспирантов компрессии научного текста // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2022. № 4. С. 107–110. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=50120245&ysclid=mnd8fvfj23479439633 (дата обращения: 30.03.2026). EDN: LAQVVL.

5. Макаричев Ф. В., Горбаренко Е. А. Некоторые приемы обучения чтению на английском языке студентов технических вузов // Специальная техника и технологии транспорта. 2021. № 11. С. 254–258. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=46712273&ysclid=mnd8hinji0614107799 (дата обращения: 30.03.2026). EDN: PVKNAZ.

6. Домышева С. А., Копылова Н. В. Дидактические приемы развития навыков компрессии текста у студентов-менеджеров // Бизнес-образование в экономике знаний. 2021. № 2 (19). С. 44–50. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/didakticheskie-priemy-razvitiya-navykov-kompressii-teksta-u-studentov-menedzherov (дата обращения: 30.03.2026). EDN: HLJJAV.

7. Adzintsova M. A. Teaching ESP students how to render and summarize texts // Профессионально ориентированный иностранный язык: от обучения к эффективной коммуникации: сборник научных статей участников IV международной научно-практической конференции (Минск, 18 мая 2023 г.). Минск: Академия управления при Президенте Республики Беларусь, 2023. P. 202–207. [Электронный ресурс]. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=54137948&pff=1 (дата обращения: 30.03.2026). EDN: FBQUEF.

8. Маркушевская Л. П., Цапаева Ю. А. Аннотирование и реферирование: методические рекомендации для самостоятельной работы студентов. СПб.: Университет ИТМО, 2008. 51 с. [Электронный ресурс]. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=30659543&ysclid=mnd9xxd69u895688962 (дата обращения: 30.03.2026). EDN: XFVPES.

9. Соловова Е. Н., Басова И. А. Необходимость обучения студентов профильных языковых вузов/факультетов реферированию звучащих академических текстов // Вестник Московского университета. Серия 19: Лингвистика и межкультурная коммуникация. 2012. № 2. С. 19–30. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/neobhodimost-obucheniya-studentov-profilnyh-yazykovyh-vuzov-fakultetov-referirovaniyu-zvuchaschih-akademicheskih-tekstov (дата обращения: 30.03.2026). EDN: PAVCUV.

10. Казьмина О. А. Обучение написанию вторичных текстов на занятиях РКИ (на примере создания аннотации, реферата, рецензии) // Текст. Образование. Коммуникация: стратегии работы с текстом как основа формирования функциональной грамотности: сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Ярославль, 05 апреля 2022 г.). Ярославль: Государственное автономное учреждение дополнительного профессионального образования Ярославской области «Институт развития образования», 2022. С. 199–212. [Электронный ресурс]. URL: https://elibrary.ru/smjuqb?ysclid=mnda1w5etv284988335 (дата обращения: 30.03.2026). EDN: SMJUQB.

11. Потемкина В. А. Особенности восприятия образовательного процесса в российских вузах студентами из Китайской Народной Республики // Письма в Эмиссия.Оффлайн. 2025. № 4. С. 3503. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82824813 (дата обращения: 05.04.2026). EDN: WZOSHM.

12. Спыну Л. М., Мешкова И. Н., Шереметьева О. А. Особенности преподавания ряда аспектов французского языка в вузе в период пандемии Ковид-19 // Глобальный научный потенциал. 2021. № 8 (125). С. 104–108. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=46709869&ysclid=mnda2ziynh192627027 (дата обращения: 30.03.2026). EDN: RRVZGH.

13. Петрова И. В., Слепнева М. А. Обучение аспирантов технических университетов реферированию и аннотированию профессионально ориентированных текстов: методология, возможности применения технологий искусственного интеллекта, возникающие проблемы // Современное педагогическое образование. 2024. № 12. С. 315–319. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obuchenie-aspirantov-tehnicheskih-universitetov-referirovaniyu-i-annotirovaniyu-professionalno-orientirovannyh-tekstov-metodologiya (дата обращения: 30.03.2026). EDN: DSAHTR.

14. Zhang R., Zou Di. Types, purposes, and effectiveness of state-of-the-art technologies for second and foreign language learning // Computer Assisted Language Learning. 2022. Vol. 35. Is. 4. P. 696–742. URL: https://www.sci-hub.ru/10.1080/09588221.2020.1744666?ysclid=mndae56tcn112080997 (дата обращения: 30.03.2026). DOI: 10.1080/09588221.2020.1744666. EDN: ZVPZOC.

15. Леденева Т. В., Зинкевич Н. А. Проблемы обучения современных студентов реферированию иноязычного текста // Филологические науки в МГИМО. 2020. № 3 (23). С. 80–87. URL: https://philnauki.mgimo.ru/jour/article/viewFile/291/288?ysclid=mndafzd6pz370256234 (дата обращения: 30.03.2026). DOI: 10.24833/2410-2423-2020-3-23-80-87. EDN: UKUXDU.

16. Минина О. Г. Системное и критическое мышление как компетенция современного образования // Профильная школа. 2023. Т. 11. № 2. С. 41–45. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53958571 (дата обращения: 05.04.2026). DOI: 10.12737/1998-0744-2023-11-2-41-45. EDN: JSNXRR.

17. Минина О. Г. Формирование универсальных компетенций студентов магистрантов педагогических направлений // Профильная школа. 2021. Т. 9. № 1. С. 50–56. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44873369 (дата обращения: 05.04.2026). DOI: 10.12737/1998-0744-2021-9-1-50-56. EDN: HYEALN.

18. Hudson K., Owens Ju., Moore K. A. et al "What's the Main Idea?": Using Text Structure to Build Comprehension // Reading Teacher. 2021. Vol. 75. Is. 1. P. 113–118. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=71331695&ysclid=mndah2928z48507163 (дата обращения: 30.03.2026). DOI: 10.1002/trtr.2016. EDN: NWJLPS.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: За счет внутреннего гранта РГПУ им. А. И. Герцена «Междисциплинарный адаптационный образовательный проект для иностранных студентов РГПУ им. А. И. Герцена «Мир вокруг нас – The World around us – 我们周围的世界», 2025.

Financing: At the expense of an internal grant from the A. I. Herzen Russian State Pedagogical University "Interdisciplinary adaptive educational project for international students of the A. I. Herzen Russian State Pedagogical University "Мир вокруг нас – The World around us – 我们周围的世界", 2025.

УДК 378.1
DOI 10.17513/snt.40849

CC BY 4.0

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СТУДЕНТОВ В MOODLE В КОНТЕКСТЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ

Потапов А. А. ORCID ID 0000-0002-4497-5796, Зайнуллин Р. Р.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», Казань, Российская Федерация, e-mail: aapot@ya.ru

Трендом современного образования является персонализация обучения, реализуемая через построение индивидуальных образовательных траекторий. В статье представлена разработанная и экспериментально проверенная методика организации проектной практики студентов технических направлений подготовки в системе Moodle, направленная на поддержку индивидуальных образовательных траекторий и повышение качества проектных работ. Эксперимент проводился на кафедре промышленной электроники Казанского государственного энергетического университета. В нем приняли участие 77 студентов 3-го курса, разделенных на две экспериментальные и одну контрольную группы. Для экспериментальных групп была реализована авторская методика, включающая инициацию тем, взаимное рецензирование идей и итоговую сдачу проекта. Контрольная группа работала по традиционной схеме. Оценка итоговых проектов проводилась экспертной комиссией по шести критериям. Статистический анализ показал значимое превосходство итоговых проектов экспериментальных групп по четырем критериям из шести. Доля проектов, получивших оценку «отлично», в экспериментальных группах составила 61,5 % против 28 % в контрольной, а анкетирование выявило высокую удовлетворенность проектной практикой у студентов экспериментальных групп. Показано, что предложенная методика создает условия для реализации принципов субъектности выбора, полилогичности обратной связи и прозрачности образовательного процесса, способствуя построению индивидуальных образовательных траекторий. Результаты работы могут быть масштабированы и использованы для проектного обучения в технических вузах.

Ключевые слова: проектная деятельность, проектная практика, индивидуальная образовательная траектория, LMS Moodle, взаимооценка, инженерное образование, качество проектов, качество образования, методика обучения

ORGANIZATION OF STUDENTS' PROJECT ACTIVITIES IN MOODLE IN THE CONTEXT OF AN INDIVIDUAL EDUCATIONAL TRAJECTORY

Potapov A. A. ORCID ID 0000-0002-4497-5796, Zaynullin R. R.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan State Power Engineering University", Kazan, Russian Federation, e-mail: aapot@ya.ru

The trend of modern education is the personalization of learning, implemented through the construction of individual educational trajectories. The article presents a developed and experimentally tested methodology for organizing project practice for students of technical areas of training in the Moodle system, aimed at supporting individual educational trajectories and improving the quality of project work. The experiment was carried out at the Department of Industrial Electronics of the Kazan State Power Engineering University. It involved 77 third-year students, divided into two experimental and one control groups. For the experimental groups, the author's methodology was implemented, including the initiation of topics, mutual review of ideas and the final delivery of the project. The control group worked according to the traditional scheme. The evaluation of the final projects was carried out by an expert commission according to six criteria. Statistical analysis showed a significant superiority of the final projects of the experimental groups in four out of six criteria. The share of projects that received an "excellent" rating in the experimental groups was 61.5 % versus 28 % in the control group, and the questionnaire revealed high satisfaction with the project practice among students of the experimental groups. It is shown that the proposed methodology creates conditions for the implementation of the principles of subjectivity of choice, polylogic feedback and transparency of the educational process, contributing to the construction of individual educational trajectories. The results of the work can be scaled up and used for project-based learning in technical universities.

Keywords: project activity, project practice, individual educational trajectory, LMS Moodle, mutual assessment, engineering education, quality of projects, quality of education, teaching methods

Введение

Современные требования к инженерному образованию предполагают формирование у выпускников способности самостоятельно ставить и решать профессиональные задачи, работать в команде, разрабатывать инновационные продукты. Эффективным средством достижения этих целей выступает проектная деятельность [1]. Проектная деятельность прочно вошла в практику

высшего образования как метод, развивающий критическое мышление, самостоятельность и способность к коллаборации [2, 3]. В инженерном образовании проекты часто ориентированы на решение реальных производственных задач, что требует гибкого подхода к выбору тем и индивидуального сопровождения [4, 5]. Однако традиционная организация проектной деятельности в вузах сталкивается с рядом противоречий. Во-первых, темы проектов часто назначаются преподавателем в рамках его научных интересов, что ограничивает возможность учета индивидуальных интересов и карьерных устремлений студентов. Во-вторых, процесс выполнения проекта слабо структурирован: отсутствуют этапы коллективного обсуждения и рецензирования идей, обратная связь сводится к итоговой оценке руководителя. В-третьих, возрастающая нагрузка на преподавателей затрудняет полноценное сопровождение десятков индивидуальных проектов. Эти противоречия актуализируют поиск новых организационно-педагогических решений, опирающихся на потенциал цифровой образовательной среды.

В условиях цифровой трансформации образования [6] открываются новые возможности для поддержки проектной работы, особенно в контексте индивидуализации обучения – построения индивидуальных образовательных траекторий (ИОТ) студентов. Понятие индивидуальной образовательной траектории подразумевает возможность студента самостоятельно определять содержание, темп и форму своего обучения при поддержке преподавателя [7]. Применительно к проектной деятельности ИОТ означает право студента самостоятельно формулировать тему проекта (в рамках научного направления), выбирать методы исследования, форму представления результата, а также получать обратную связь не только от руководителя, но и от других участников образовательного процесса [8].

Информационно-образовательная среда, в частности LMS Moodle, является эффективной платформой для реализации ИОТ благодаря широким возможностям настройки курсов, организации обратной связи и отслеживания индивидуальных достижений [9]. Ряд исследований посвящен использованию отдельных элементов Moodle в проектном обучении [10, 11]. Типичная практика применения системы в проектной деятельности сводится к размещению методических материалов и приему отчетов через элемент «Задание». Между тем в зарубежных исследованиях подчеркивается важность раннего этапа формулировки проблемы и коллективного обсуждения для успешности проекта [3, 12]. Такие элементы LMS, как «База данных», «Семинар», «Форум», «Вики», позволяют организовать коллективную работу, взаимооценку и рефлексию, что принципиально важно для поддержки проектной деятельности в контексте ИОТ. Однако комплексное использование названных элементов в логике проектного цикла применительно к техническим направлениям подготовки остается малоизученным. Настоящая работа призвана восполнить этот пробел.

Цель исследования – разработать и экспериментально проверить методику организации проектной деятельности студентов технических направлений подготовки в LMS Moodle, обеспечивающую поддержку индивидуальных образовательных траекторий и повышение качества проектных работ.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось в весеннем семестре 2024–2025 учебного года на кафедре «Промышленная электроника» Казанского государственного энергетического университета. В эксперименте приняли участие 77 студентов 3-го курса, обучающихся по направлению 11.03.04 Электроника и наноэлектроника. Были сформированы три группы: две экспериментальные (ЭГ-1, 25 чел.; ЭГ-2, 27 чел.) и одна контрольная (КГ, 25 чел.). Распределение групп было естественным по академическим группам. Все группы проходили распределенную проектную практику в течение 13 учебных недель. Научное руководство практикой осуществляли преподаватели кафедры.

В контрольной группе применялась традиционная схема выполнения проектной практики. Студенты получали темы от руководителей, выполняли проект и сдавали итоговый отчет через элемент «Задание» в Moodle. В экспериментальных группах проектная деятельность организовывалась по специально разработанной методике. Методика для ЭГ реализована в виде отдельного курса в LMS Moodle и включала пять последовательных этапов.

Этап 1. Инициация и выбор темы (недели 1–2). Студентам предлагалось заполнить запись в элементе «База данных». Поля записи: ФИО, научный руководитель, название проекта, решаемая проблема, планируемый продукт, ключевые слова. База была открыта для просмотра всем участникам, что позволяло студентам знакомиться с идеями друг друга.

Этап 2. Взаимное рецензирование идей (недели 3–4). После того как темы были зафиксированы, каждый студент загружал

в элемент «Семинар» расширенное описание проекта (2–3 страницы), включающее актуальность, цели, задачи, техническое задание, методы и ожидаемые результаты. Настраивалось случайное распределение работ для рецензирования, в итоге каждый студент получал три работы однокурсников. Оценка проводилась по четырем критериям: актуальность, реалистичность, техническая сложность, качество описания. Студенты выставляли баллы по каждому критерию и давали комментарии к рецензируемому проекту.

Этап 3. Выполнение проекта (недели 5–10). На основе полученных рецензий студенты дорабатывали концепцию своего проекта и приступали к реализации. На этом этапе использовался «Форум» для консультаций с руководителем.

Этап 4. Рефлексия и взаимооценка (недели 11–12). Дополнительно проводился второй семинар, на котором студенты оценивали итоговые проекты друг друга по упрощенным критериям: понятность описания, значимость результатов, качество оформления. Эти данные использовались для качественного анализа, но не влияли на итоговую оценку.

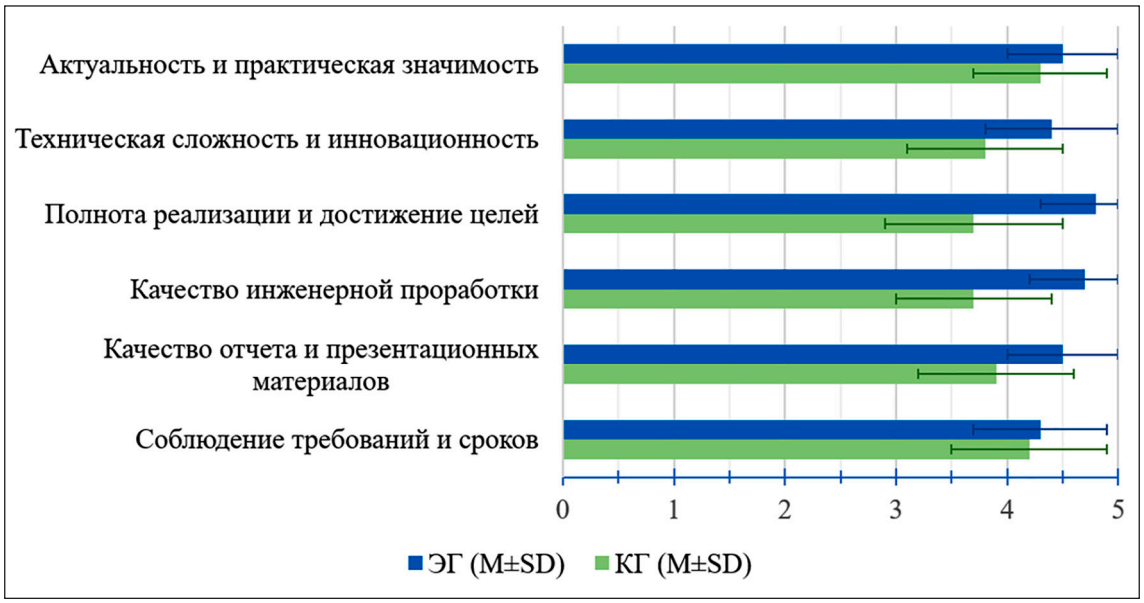
Этап 5. Итоговая сдача проекта (неделя 13). Студенты ЭГ и КГ загружали итоговый отчет и все сопутствующие материалы в элемент «Задание». Итоговые проекты оценивались экспертной комиссией, состоящей из трех преподавателей кафедры, не участвовавших в руководстве данными проектами. Оценка проводилась по единой рубрике, включающей шесть критериев (каждый от 0 до 5 баллов): актуальность и практическая значимость; техническая сложность и инновационность; полнота реализации и достижение целей; качество инженерной проработки; качество отчета и презентационных материалов; соблюдение требований и сроков. Максимальная сумма баллов – 30.

Дополнительно проводилось анкетирование студентов до и после практики для оценки уровня развития проектных компетенций (самооценка по 10-балльной шкале) и удовлетворенности процессом (по окончании). В анкетировании участвовали все студенты трех групп. Для сравнения средних значений применялся t-критерий Стьюдента для независимых выборок. Различия считались значимыми при $p < 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе педагогического эксперимента была проведена оценка итоговых проектов студентов экспериментальных (ЭГ-1, n = 25; ЭГ-2, n = 27; объединенная ЭГ, n = 52) и контрольной (КГ, n = 25) групп экспертной комиссией. Результаты сравнения средних баллов по всем критериям представлены на рисунке.

Статистически значимые различия ($p < 0,05$) по четырем из шести критериев свидетельствуют о том, что разработанная методика положительно влияет на качество проектов.



Сравнение средних баллов по критериям оценки итоговых проектов в экспериментальной и контрольной группах (среднее значение ± стандартное отклонение)
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Распределение проектов по итоговым оценкам

Итоговая оценка	ЭГ-1 (n = 25)	ЭГ-2 (n = 27)	КГ (n = 25)
Отлично	64,0 %	59,3 %	28,0 %
Хорошо	32,0 %	37,0 %	48,0 %
Удовлетворительно	4,0 %	3,7 %	24,0 %

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Наиболее выраженный эффект наблюдается по критериям, связанным с планированием и технической реализацией – «Полнота реализации и достижение целей» (разность средних значений Δ = 1,1) и «Качество инженерной проработки» (Δ = 1,0). Это объясняется тем, что этап рецензирования до начала активной работы над проектом позволяет студентам получить содержательную обратную связь от нескольких однокурсников, выявить слабые места в постановке задач, скорректировать план и избежать ошибок, которые могли бы снизить итоговое качество проекта. В традиционной схеме такая обратная связь либо отсутствует, либо дается только руководителем, который не всегда может оперативно указать на все недостатки. Полученные результаты согласуются с исследованиями, подчеркивающими важность ранней обратной связи для успешности проектов [12, 13].

Значимые, но менее выраженные различия по критериям «Техническая сложность и инновационность» (Δ = 0,6) и «Качество отчета и презентационных материалов» (Δ = 0,6) объясняются тем, что рецензенты в семинаре на этапе 2 часто обращали внимание на возможность усилить проект, используя, например, современные компоненты или методы разработки. Это подтверждается анализом рецензий, где встречались предложения по использованию более совершенной элементной базы или новейших программных средств. Студенты, получая такие комментарии, стремились повысить уровень сложности своих работ.

Отсутствие значимых различий по срокам сдачи (Δ = 0,1) является показателем сбалансированности методики, подтверждая, что дополнительные этапы работы в разработанном курсе Moodle не привели к задержкам и не создали неравных временных условий для ЭГ. Следовательно, повышение качества достигнуто не за счет увеличения времени, а за счет более эффективной организации деятельности.

Дополнительно был проведен анализ распределения проектов по итоговым оценкам (таблица). Оценку «отлично» получали работы, набравшие 27–30 баллов, «хорошо» – 22–26 баллов, «удовлетворительно» – менее 22 баллов.

Данные таблицы показывают, что в экспериментальных группах доля проектов, получивших «отлично», составляет 61,5% (в среднем по двум группам), тогда как в контрольной группе – только 28%. Доля «удовлетворительных» работ в ЭГ не превышает 4 %, в то время как в КГ достигает 24 %. Распределения в ЭГ-1 и ЭГ-2 близки, что свидетельствует о воспроизводимости эффекта разработанной методики. Это означает, что предложенная методика не просто повышает средний балл, но и радикально снижает риск неудачных проектов. Полученные в ходе эксперимента результаты позволяют утверждать, что разработанная методика не только привела к статистически значимому повышению качества итоговых проектов, но и создала условия для реализации принципов индивидуализации обучения.

Принцип субъектности выбора проявился в том, что 100 % студентов экспериментальных групп самостоятельно сформулировали тему проекта в элементе «База данных», тогда как в контрольной группе темы выдавались руководителем. Анкетирование показало, что 77 % студентов ЭГ оценили тему как полностью соответствующую их интересам (в КГ – только 32 %). Высокий коэффициент вариативности тем в ЭГ свидетельствует о том, что студенты не ограничивались типовыми формулировками, а предлагали уникальные разработки, что является прямым следствием предоставленной свободы выбора. Небольшое преимущество ЭГ по критерию «Актуальность и практическая значимость» (Δ = 0,2) может быть интерпретировано именно как следствие более глубокого личностного осмысления темы. Когда студент самостоятельно выбирает тематику проекта, он естественным образом стремится обосновать его важность. Данные анкетирования (прирост самооценки компетенций, особенно «умение формулировать проблему» и «способность к экспертной оценке») свидетельствуют о том, что студенты ЭГ не просто выполни-

ли проект, но и осознали свой личностный рост. Высокий уровень удовлетворенности (92,3 % отметили полезность этапа выбора темы, 88,5 % – полезность рецензирования) показывает, что предоставленная свобода и возможность влиять на ход работы воспринимаются студентами позитивно и повышают их вовлеченность. Это согласуется с пониманием ИОТ как траектории, которая строится самим обучающимся при поддержке педагога, а не навязывается извне [8].

Принцип полилогичности обратной связи был реализован через этап взаимного рецензирования в «Семинаре». Каждый студент ЭГ получил три содержательные рецензии от однокурсников, причем 84 % рецензий были оценены комиссией как конструктивные. Анкетирование показало, что 71 % студентов ЭГ отметили, что учли полученные замечания при доработке проекта. Полученные результаты хорошо согласуются с выводами исследователей о важности взаимооценки для развития метакогнитивных навыков [14] и с работами, подчеркивающими роль цифровой среды в персонализации обучения [15].

Принцип прозрачности и публичности реализовывался через открытый доступ ко всем записям и работам. Анализ логов Moodle среди ЭГ показал, что каждая запись в «Базе данных» имела в среднем 12 просмотров, а 63,5 % студентов ЭГ сообщили, что целенаправленно знакомились с работами однокурсников для сравнения и поиска идей. Высокая активность студентов ЭГ (в среднем 26 входов в курс за весь период практики против 5 в КГ) и удовлетворенность работой в среде (96 % положительных отзывов) подтверждают, что платформа не создавала барьеров, а напротив, способствовала реализации индивидуальных маршрутов.

В КГ, где студенты получали темы от руководителей и не проходили этапов коллективного обсуждения, возможности для реализации ИОТ были существенно ограничены. Хотя руководители, безусловно, старались учитывать интересы студентов, сам механизм распределения тем проектов оставался директивным. Это выразилось меньшей удовлетворенностью темой проекта (только 44 % в КГ выразили удовлетворенность против 92,3 % в ЭГ). Таким образом, комплексное использование элементов в LMS Moodle позволяет студенту активно участвовать в формировании содержания своей деятельности и может служить полноценной педагогической технологией, поддерживающей индивидуальные образовательные траектории в массовом образовательном процессе.

Заключение

Разработанная методика проведения проектной практики представляет собой целостную систему, в которой индивидуализация обучения выступает не самоцелью, а средством достижения более высоких образовательных результатов. Данные эксперимента убедительно демонстрируют, что предоставление студентам свободы выбора при одновременной организации содержательной обратной связи и публичности этапов работы ведет к повышению качества проектной деятельности. Полученные данные могут служить основанием для внедрения разработанной методики в практику проектного обучения техническим специальностям, а также для дальнейшего исследования возможностей LMS Moodle в контексте персонализации образования.

Список литературы

1. Зарипова Р. С., Кошкина И. А., Тюрина М. М. Проектная деятельность как метод обучения студентов в системе высшего образования // Казанская наука. 2024. № 1. С. 57–59. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=61448199 (дата обращения: 29.03.2026).

2. Мишин И. Н. Реализация проектной деятельности в системе студентоцентрированного обучения // Высшее образование в России. 2022. Т. 31. № 3. С. 140–151. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48217494 (дата обращения: 29.03.2026). DOI: 10.31992/0869-3617-2022-31-3-140-151.

3. Saad A., Zainudin S. A review of Project-Based Learning (PBL) and Computational Thinking (CT) in teaching and learning // Learning and Motivation. 2022. Vol. 78. P. 101802. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48888260 (дата обращения: 29.03.2026). DOI: 10.1016/j.lmot.2022.101802.

4. Потапов А. А., Семенников А. В. Формирование инженерных компетенций у старшеклассников через проектную деятельность на профессиональных пробах // Современные наукоемкие технологии. 2026. № 2. С. 230–234. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40695 (дата обращения: 29.03.2026). DOI: 10.17513/snt.40695.

5. Павлова И. В., Потапов А. А. Внедрение проектной деятельности в образовательный процесс в инженерном вузе // Цифровизация инженерного образования: Сборник материалов международной онлайн-конференции (Ижевск, 30 марта – 01 апреля 2021 г.). Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, 2021. С. 111–114. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=46177388 (дата обращения: 29.03.2026).

6. Ларионов В. Г., Шереметьева Е. Н., Горшкова Л. А. Цифровая трансформация высшего образования: технологии и цифровые компетенции // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. 2021. № 2. С. 61–69. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46176033 (дата обращения: 29.03.2026). DOI: 10.24143/2073-5537-2021-2-61-69.

7. Сазонов Б. А. Организация образовательного процесса: возможности индивидуализации обучения // Высшее образование в России. 2020. Т. 29. № 6. С. 35–50. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43036402 (дата обращения: 29.03.2026). DOI: 10.31992/0869-3617-2019-29-6-35-50.

8. Данейкин Ю. В., Калпинская О. Е., Федотова Н. Г. Проектный подход к внедрению индивидуальной образовательной траектории в современном вузе // Высшее образование в России. 2020. Т. 29. № 8–9. С. 104–116. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43866455 (дата обращения: 29.03.2026). DOI: 10.31992/0869-3617-2020-29-8-9-104-116.

9. Прохорова М. П., Шкунова А. А., Гуреева Е. П. Средства персонализации образовательного процесса в рамках электронных курсов // Проблемы современного педагогического образования. 2021. № 71–3. С. 183–187. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46587325 (дата обращения: 29.03.2026).

10. Шамсутдинова Т. М. Когнитивная модель траектории электронного обучения на основе цифрового следа // Открытое образование. 2020. Т. 24. № 2. С. 47–54. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42811982 (дата обращения: 29.03.2026). DOI: 10.21686/1818-4243-2020-2-47-54.

11. Минаев Д. В. Опыт реализации проектного подхода для подготовки магистров с использованием цифровой платформы управления проектами // Материалы научно-методической конференции СЗИУ РАНХиГС. 2022. № 1. С. 58–84. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49716404 (дата обращения: 29.03.2026).

12. Guo P., Saab N., Post L. S., Admiraal W. A review of project-based learning in higher education: Student outcomes and measures // International Journal of Educational Research. 2020. Vol. 102. P. 101586. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43701456 (дата обращения: 29.03.2026). DOI: 10.1016/j.ijer.2020.101586.

13. Шорина Т. В. Перспективы проектного обучения в вузе в цифровую эпоху // Мир науки, культуры, образования. 2024. № 2 (105). С. 247–249. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65872893 (дата обращения: 29.03.2026). DOI: 10.24412/1991-5497-2024-2105-247-249.

14. Аджиева Е. М., Петренко А. А. Развитие компетенции командной работы у студентов в проектной деятельности // Развитие образования. 2024. Т. 7. № 1. С. 12–21. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65419623 (дата обращения: 29.03.2026). DOI: 10.31483/r-109009.

15. Горбатов С. В., Краснова Е. А. Цифровой след как механизм индивидуализации образовательной траектории студента (на примере курса «Цифровые технологии самообразования») // Перспективы науки и образования. 2022. № 4 (58). С. 193–208. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49391218 (дата обращения: 29.03.2026). DOI: 10.32744/pse.2022.4.12.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ.

Financing: The work was carried out at the expense of a grant provided by the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to educational institutions of higher education, scientific and other organizations to support plans for the development of human resources in terms of stimulating their scientific and scientific-pedagogical workers to defend doctoral dissertations and carry out research work.

УДК 378.1:37.01
DOI 10.17513/snt.40850

CC BY 4.0

ТРАДИЦИИ В КОНТЕКСТЕ ЭТНОПЕДАГОГИЧЕСКОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ВУЗА

[1]Птицына Е. В., [2]Березина Т. И., [2]Федорова Е. Н.

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петрозаводский государственный университет», Петрозаводск, Российская Федерация, e-mail: ptycina@yandex.ru;

[2]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет», Москва, Российская Федерация

В условиях глобализации и модернизации системы образования задача сохранения, изучения традиций становится стратегически важным ресурсом для гармоничного развития личности. Цель статьи – теоретическое обоснование понятия «традиция», выделение уровней и компонентов работы с традицией в контексте этнопедагогической направленности образовательного процесса вуза. Современная система высшего образования ориентирована на формирование личности, способной понимать и ценить культурное разнообразие, уважительно относиться к национальным традициям своего народа. Авторы представляют междисциплинарный анализ дефиниции «традиции» (философский, социологический, педагогический аспекты), формулируют основные свойства и признаки традиции, выделяют уровни их изучения (реконструктивный, адаптационный, образно-символический) применительно к этнопедагогической направленности вузовского образования. Они трактуют традиции как основу, обеспечивающую взаимосвязь между разными поколениями, формирования гражданской и этнокультурной идентичности в современном многокультурном мире. Особое внимание в статье уделяется народным традициям, представляющим уникальное явление отражения исторически накопленного опыта поколений, воплощенного в искусстве, обычаях, праздниках, ремеслах, фольклоре, народной педагогике. Традиции служат звеном, связывающим поколения, обеспечивают сохранение духовных и нравственных устоев, культурных особенностей, развивают гражданскую идентичность, приобщают к общероссийским традиционным духовным ценностям. Авторы отмечают, что вуз становится активным транслятором культурных традиций и этнопедагогических основ воспитания, позволяющим объединить когнитивное, нравственное и культурное развитие студентов. Интеграция традиций в образовательный процесс вуза позволяет превратить образование в активный процесс освоения культуры. В статье авторы делают вывод, что обращение к традициям – это не только изучение исторических и ретроспективных аспектов, но и совершенствование теоретико-методологических оснований современного образования, характеризующегося гуманистической направленностью.

Ключевые слова: традиции, народные традиции, ценности, национальные ценности, этнопедагогика, этнопедагогическая направленность, вуз, студенты

TRADITIONS IN THE CONTEXT OF THE ETHNO-PEDAGOGICAL ORIENTATION OF THE UNIVERSITY EDUCATIONAL PROCESS

[1]Ptitsyna E. V., [2]Berezina T. I., [2]Fedorova E. N.

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Petrozavodsk State University", Petrozavodsk, Russian Federation, e-mail: ptycina@yandex.ru;

[2]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow State Pedagogical University", Moscow, Russian Federation

In the context of globalization and modernization of the education system, the task of preserving and studying traditions has become a strategically important resource for the harmonious development of individuals and society. The purpose of this article is to provide a theoretical justification for the concept of «tradition» and to identify the levels and components of working with tradition in the context of the ethno-pedagogical orientation of the university educational process. The modern higher education system is focused on developing individuals who can understand and appreciate cultural diversity and have a respectful attitude towards their national traditions. The authors present an interdisciplinary analysis of the definition of «tradition» (philosophical, sociological, and pedagogical aspects), formulate the main properties and features of tradition, and identify the levels of their study (reconstructive, adaptive, and figurative-symbolic) in relation to the ethnopedagogical focus of university education. They interpret traditions as the basis for ensuring intergenerational communication and the formation of civic and ethnocultural identity in today's multicultural world. The article focuses on folk traditions, which are a unique reflection of the historical experience of generations, embodied in art, customs, holidays, crafts, folklore, and folk pedagogy. Traditions serve as a link between generations, preserving spiritual and moral values, cultural characteristics, and fostering civic identity and adherence to national traditions. The authors note that the university becomes an active transmitter of cultural traditions and ethnopedagogical foundations of education, which allows for the integration of cognitive, moral, and cultural development of students. The integration of traditions into the university's educational process transforms education into an active process of cultural acquisition. The authors conclude that the appeal to traditions is not only about studying historical and retrospective aspects, but also about improving the theoretical and methodological foundations of modern education, which is characterized by a humanistic focus.

Keywords: traditions, folk traditions, values, national values, ethnopedagogy, ethnopedagogical orientation, university, students

Введение

Современный этап развития российской системы образования характеризуется приоритетом этнокультурного воспитания, в основе которого лежит приобщение обучающихся к общероссийским традиционным духовным ценностям, включая культурное наследие народов России. Каждый регион России – это уникальные традиции, отражающие духовные ценности, эстетические идеалы и мудрость народа, которые формировались веками и стали важной частью его культуры. В федеральных государственных образовательных стандартах закрепляется обязательность учета этнокультурного компонента: изучение родных языков, основ религиозных культур и светской этики, краеведческого материала; формирование российской гражданской идентичности, осознание своей этнокультурной принадлежности, уважение к другим народам; приобщение к традиционным ценностям, включая ценности своей этнической группы. Таким образом, в условиях глобализации и активных социокультурных изменений задача изучения традиций и обращения к этнопедагогическим основам воспитания в вузе становится стратегически важной для развития общества.

Об изучении богатого воспитательного потенциала традиций и разработки путей, методов и средств их реализации в воспитании писали еще К. Д. Ушинский, Л. Н. Толстой, П. Ф. Каптерев, Н. И. Пирогов и др. Великие педагоги рассматривали принцип народности как важнейший в воспитательном процессе и говорили о необходимости сохранения своей национальной идентичности, духовности и культурного своеобразия. Они отмечали уникальность принципа народности, который определяет ментальность каждого этноса в системном воплощении социальных установок, идеалов, ценностей, родного языка, нравов и обычаев [1]. Лучшие ценности и традиции народной педагогики, проверенные самой жизнью, всегда выступали аксиомой и основой построения и функционирования отечественной системы образования. Основатель этнопедагогики Г. Н. Волков подчеркивал, что в традиционной культуре, ее обычаях, обрядах, фольклоре и предметном мире заложены действенные механизмы воспитания гармоничной личности, укорененной в родной культуре [2]. Современные исследователи продолжают развивать его идеи, доказывая эффективность этнопедагогического подхода для формирования ценностных ориентаций, патриотизма и толерантности личности.

Этнопедагогика изучает народную педагогику, обобщает воспитательные традиции разных народов и предлагает пути их использования в современных условиях. Народные традиции, отражая образ и стиль жизни народа, играют важную и определяющую роль в воспитании новых поколений. Важный элемент этнопедагогики – погружение в традиционную среду. Изучение народных традиций помогает личности отождествлять себя с прошлым, историей и культурой своего народа [3]. Р. М. Эхаева отмечает, что этнопедагогика, являясь основой воспитания, обучения и развития личности, отражает смыслы и идеалы человеческих ценностей, таких как отношение к труду, семье и окружающим [4]. В. С. Болбас выделяет следующие взаимосвязанные стратегические задачи этнопедагогики в современном образовании: содействует этнокультурному формированию и этнонациональной самоидентификации личности; способствует естественному приобщению к мировым, общечеловеческим ценностям; обеспечивает эффективность любого воспитательно-образовательного процесса [5]. Этнопедагогика позволяет соединять научные исследования, творческую деятельность в обучении и воспитании и становится практическим инструментом изучения традиций.

Цель исследования – теоретическое обоснование понятия «традиция», выделение уровней и компонентов работы с традицией в контексте этнопедагогической направленности образовательного процесса вуза.

Материалы и методы исследования

Анализ, синтез, обобщение теоретических положений. Методология исследования базируется на комплексном подходе (философский, социологический, педагогический аспекты) к изучению понятия «традиции» в контексте исследований по этнопедагогике.

Результаты исследования и их обсуждение

Понятие «традиция» является предметом исследования многих наук, что свидетельствует о его многогранности. Философский взгляд на проблему, как отмечают М. И. Долгушин, П. Н. Савицкий, Н. С. Трубецкой, Е. Шацкий, раскрывает традицию как необходимое условие становления культуры и сбалансированности гармонии общества. Ученые отводят традициям связующую роль, отмечают, что они являются общим наследием, которое обеспе-

чивает взаимосвязь человека и общества. В социологии традиция рассматривается как взаимодействие групп и индивидов с целью передачи накопленного из поколения в поколение опыта, норм поведения, ценностей и представлений, выступающих регулятивными и воспитательными принципами. Уникальное сочетание конкретных традиций определяет особенности каждого общества. Дефиниция «традиция» определяется как реально существующий атрибут общества, а ее носителями выступают индивиды. Важно отметить два подхода к пониманию традиции: функциональный (акцент на функции передачи ценностей из поколения в поколение) и объектный (фокус на самих ценностях, которые подлежат передаче). В педагогическом аспекте М. С. Каган раскрывает данную категорию как одно из условий становления культуры [6, с. 30]. Т. В. Лодкина, Е. В. Марковичева, В. А. Разумный, акцентируют роль традиции в передаче ценного педагогического опыта [7]. Термин «традиция» происходит от лат. traditio («передавать») – то, что перешло от одного поколения к другому, что унаследовано от предшествующих поколений; «исторически сложившиеся и передаваемые из поколения в поколение обычаи, нормы поведения, взгляды», а также как «установившийся порядок, неписаный закон в поведении, в быту» [7]. К традициям относятся не только объекты наследия (общественные установки, нормы поведения, ценности, способы действия, технологии, ритуалы, обычаи), но и процессы их трансляции, передачи, усвоения и воспроизводства. По мнению А. А. Аверьянова, данная дефиниция является механизмом трансляции и возобновления ценностей, норм, смыслов, моделей культуры, непрерывно воспроизводит идентичность носителя традиции [8]. Изучение традиций способствует сохранению своей национальной принадлежности и гордости за свою страну, укреплению социальных связей и гармоничному развитию общества.

С. К. Бондырева и Д. В. Колесов справедливо отмечают, что традиция является фактором стабильности и однородности общества; а ее ослабление ведет к утрате обществом устойчивости и самобытности [9, с. 20]. Уникальность традиции в том, что она выступает устойчивой формой поведения и взаимоотношений, общественным мнением, связанной с моральными нормами, привычками и отношениями. Традиции возникают из образа жизни людей и их потребностей, они взаимодействуют друг с другом, поддерживая, вытесняя или зарождая новые. Каждое новое поколение через традиции воспринимают накопленный опыт, а их постоянное переосмысление способствует развитию общества [10; 11]. Главные задачи традиций – обеспечивать стабильность и единство общества, а также объединять его членов. Чем больше в обществе устоявшихся порядков, тем больше в нем традиций. Ослабление традиций ведет к нарушению стабильности общества, потере им своей уникальности и связи с прошлым. В условиях активного обмена между культурами происходит заимствование и влияние традиций [12].

Таким образом, традиции – это сложный социокультурный феномен, выполняющий ключевую роль в функционировании общества и являющийся условием его исторического развития. По своей сути они представляют собой коллективный опыт, закрепляющий определенный этап эволюции социума и обеспечивающий преемственность между поколениями. Выступая в роли регулятора цивилизации, традиции формируют ее образ, наиболее ярко проявляясь в культуре народа. Они служат связующим звеном между разными поколениями, а также являются основой для формирования гражданской и этнокультурной идентичности в современном многокультурном мире. Традиции в педагогическом контексте рассматриваются не как неизменный пережиток, а как двигатель развития образовательной системы, они обеспечивают связь времен и смысловую наполненность учебной деятельности.

Хотелось бы отметить, что в контексте этнопедагогики традиции являются продуктом истории, имеющим процессуальный, непрерывный характер. В их основе лежит положительный жизненный опыт этноса, а также способность общества его усваивать и передавать. Традиция является механизмом накопления, сохранения и коллективного использования важного для жизни общества опыта. Значение традиции для общества определяется ее полезностью, то есть способностью отвечать на определенные человеческие потребности, и тем, что ее принимает большая часть общества [13]. К положительным изменениям относятся возникновение и распространение традиций, к отрицательным – их ослабление, искажение и забвение. Анализ научной литературы позволяет выделить ряд отличительных черт и признаков традиции: а) является механизмом накопления, сохранения и коллективного использования важного для жизни региона, страны опыта; б) присущ устойчивый и инерционный ха-

рактер, при относительной динамичности и перестройке; в) представляет собой форму коллективной адаптации этноса к среде; г) имеет избирательный характер наследования; д) локализована в отношении определенной группы, коллектива, области с общей культурой; е) функционирование традиции основано на силе и авторитете общественного мнения.

Стремительное развитие цивилизации обусловливает динамику развития принципов профессионального образования: непрерывности; преемственности; интегративности; вариативности; гибкости и открытости; фундаментализации [14]. В данном контексте образование, выступая социокультурным институтом в духовно-нравственном и интеллектуальном развитии страны, должно быть ориентировано на гуманистические традиции и ценности [15; 16]. Следовательно, образование, основанное на национально-культурных традициях, обладает высокой воспитательной силой, поскольку опирается на исторически сложившиеся формы социального взаимодействия и моральные нормы. Оно приобщает индивида к коллективному опыту, развивает социальные чувства: патриотизм, уважение к иным культурам [17]. Традиции воспитывают уважение к труду, стремление к общественной пользе, а также способствуют развитию организованности, самодисциплины и работоспособности.

Таким образом, авторы рассматривают традиции в контексте этнопедагогики как основу, обеспечивающую взаимосвязь поколений в передаче норм, ценностей, опыта, выступающую воспитательными принципами их приобщения к новым условиям деятельности, формирования этнокультурной идентичности в современном многокультурном мире. Авторы выделяют уровни работы с традициями в образовательном процессе вуза (в учебной и внеучебной деятельности):

а) реконструктивный уровень – опора на этнографические, музейные и архивные источники; выявление конструктивных и символических закономерностей; точное, копийное воспроизведение традиций (воссоздание костюма, обрядов, фольклора и др.);

б) адаптация традиционных элементов в новых условиях – опора на визуальную цитатность, ограниченную вариативность решений в исследование структуры, композиции (создание новых моделей на основе структурных признаков традиции);

в) образно-символическая интерпретация – работа с образами, символами, знаками традиций.

При этом важно отметить последовательность работы с традицией: передача – повторение (восприятие + усвоение + воспроизведение) – передача. В контексте исследования на теоретическом уровне авторы выделяют основные компоненты работы с традицией: мотивационно-ценностный (потребность в изучении традиций, развитие устойчивого интереса к их нравственно-смысловому анализу); информационно-знаниевый (понимание нравственных категорий, ценностей традиций); концептуально-практический (умение использовать полученные знания в собственной творческой созидательной деятельности); рефлексивный – оценка традиций, ценностно-смысловой самоанализ.

Этнопедагогический потенциал традиций заключается в способности выступать эффективным ресурсом личностного развития студентов вуза, где они проявляют интерес и уважение к другим культурам, противодействуют распространению стереотипов и ксенофобских настроений; могут оказать грамотную психолого-педагогическую поддержку, помочь другим интегрироваться в социум, сохраняя при этом связь с родной культурой. Определяя этнопедагогическую стратегию образования в вузе, в первую очередь нужно опираться на народные традиции и идеалы и через их постижение прокладывать путь к формированию ценностей. Народная культура, с ее архетипичностью, интерактивностью и терапевтическим потенциалом, представляет собой эффективный ресурс. В нее входят различные виды и приемы труда, народные обычаи и нравы, характерные особенности коммуникации, восприятия и преобразования мира, декоративно-прикладного и устного народного творчества, искусства и архитектуры. Народные традиции представляют собой уникальное явление, отражающее исторически накопленный опыт поколений, воплощенный в искусстве, обычаях, праздниках и ремеслах. Н. Л. Худякова пишет, что в современном быстро меняющемся обществе знания о ценностях и традициях должны преподноситься обучающимся как знания о принципах организации своего поведения и деятельности, которые предполагают разные способы осуществления в соответствии с разнообразными и меняющимися условиями жизни [18]. В образовании национальные ценности выступают в качестве осознанных и признанных коллективных представлений об идеалах [19], регулирующих отношения, поведенческие акты и жизнедеятельность людей, культивируя их луч-

шие и совершенные личностные качества. Характерной особенностью системы образования является опора на педагогические традиции, которые лежат в основе созидательной деятельности не только отдельного индивида, но и жизни общества в целом, выступая фактором его духовно-нравственного совершенствования и устойчивого развития. Национальные особенности личности проявляются во взглядах на жизнь, в мировоззренческих установках и ценностных ориентирах, которые претерпевают изменения в связи с переменами.

Изучение народных традиций в вузе содействует возрождению и восстановлению наследия, обладает большими воспитательными возможностями, а также создает творческое пространство для личностно-ориентированной деятельности. Особое внимание в вузе должно уделяться формированию национального самосознания студентов, которое определяется эмоционально-ценностным отношением к традициям своего народа во взаимосвязи с творческой активностью. Для этого важно проводить конференции, выставки, творческие мастерские, мастер-классы по вопросам изучения традиций; включать студентов в проектную и исследовательскую деятельность по проблемам этнокультурной направленности. В этом аспекте важен диалог, а традиции предоставляют инструменты для его реализации в учебном процессе: сравнение сказок, пословиц, традиций разных народов; мастерские, раскрывающие культурное наследие семей и педагогических традиций. Это делает обучение более живым, личностно значимым и эффективным, формирует у студентов уважение к культуре и осознание ее ценности для современности. Следовательно, в контексте этнопедагогики в вузе важно создавать условия для изучения культурных традиций, сохранения наследия и его активного использования в воспитании нового поколения.

Заключение

Таким образом, складываясь веками и тысячелетиями, традиции подтверждают свою жизнеспособность в виде идеальных образов жизнедеятельности этноса, как оптимальной в условиях конкретной географической, природной и культурно-исторической среды. Обращение к традициям – это не только изучение исторических и ретроспективных аспектов, но и совершенствование теоретико-методологических оснований современного образования, характеризующегося гуманистической направленностью. Высшее образование на лучших этнокультурных традициях позволяет превратить его в активный процесс освоения культуры: создать условия для уважительного отношения к культурному многообразию, толерантности и готовности к взаимодействию с представителями различных этнических групп, признания идейно-нравственных и смысловых основ национальной культуры в структуре мировой культуры. Перспективы дальнейшего исследования авторы видят в практическом подтверждении описанных теоретических положений.

Список литературы

1. Дридгер К. А. Принцип народности воспитания как исторически развивающееся педагогическое явление // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. № 16 (135). С. 425–428. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=18939395 (дата обращения: 27.03.2026).

2. Волков Г. Н. Этнопедагогика как педагогика национального спасения // Сибирский педагогический журнал. 2004. № 1. С. 194–198. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=18358902 (дата обращения: 22.03.2026).

3. Ivanov V. A., Tolstova E. V. Development of ethnopedagogy by G. N. Volkov // Paradigmata poznání, 2021. № 1. С. 16–28. URL: https://sociosphera.com/files/conference/2021/pp_1-21.pdf (дата обращения: 20.03.2026).

4. Эхаева Р. М. Роль народной педагогики в формировании личности // Мир науки, культуры, образования, 2020. № 2 (81). С. 201–203. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=42837030 (дата обращения: 10.03.2026). DOI: 10.24411/1991-5497-2020-00262.

5. Болбас В. С. Этнопедагогика в контексте развития современной педагогической науки // Непрерывное образование: XXI век. 2023. С. 1–9. URL: http://elibrary.petrsu.ru/books/65610 (дата обращения: 02.03.2026). DOI: 10.15393/j5.art.2023.8646.

6. Каган М. С. Философия культуры. СПб., 1996. 310 с.

7. Трегулова Н. П. Становление дефиниции «традиция» // Вестник Бурятского государственного университета. Философия, 2021. Вып. 2. С. 79–85. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46265460 (дата обращения: 10.03.2026). DOI: 10.18101/1994-0866-2021-2-79-85.

8. Биктагирова Г. Ф. Междисциплинарный анализ понятия «традиция» // Фундаментальные исследования. 2013. № 6. С. 725–729. URL: https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=31582 (дата обращения: 10.03.2026).

9. Бондырева С. К., Колесов Д. В. Традиции: стабильность и преемственность в жизни общества. М.: Издательство Московского психолого-социального института; Воронеж: Издательство НПО «МОДЭК», 2007. 280 с. [Электронный ресурс]. URL: https://old.irorb.ru/files/kafedri/pedagogi/kniga2.pdf (дата обращения: 10.04.2026).

10. Лавринова Н. Н., Чеботарев С. А., Кожевникова Т. М. Социальные функции духовно-нравственных традиций в культуре // Неофилологи. 2022. Т. 8. № 1. С. 179–192. URL: https://.www.elibrary.ru/item.asp?id=48320021 (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.20310/2587-6953-2022-8-1-179-192.

11. Беляева Л. Ю., Фоменко Е. Е. Сохранение русских народных традиций через занятия декоративно-прикладным творчеством и проблемы вовлечения молодежи в активную деятельность // Мир науки. Педагогика и психология. 2023. Т. 11. № 5. URL: https://mir-nauki.com/PDF/01PDMN523.pdf. (дата обращения: 12.04.2026).

12. Ли Я. Традиции народной педагогики: сущность, структура, функции // Перспективы развития высшей школы.

Гродно. 2022. С. 252–254. [Электронный ресурс]. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=48709550 (дата обращения: 10.04.2026).

13. Сорокина Л. И., Прямкова Н. А. Традиции народного искусства в современной культуре // Культура и искусство. 2021. № 3. С. 23–36. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=45610431 (дата обращения: 02.04.2026). DOI: 10.7256/2454-0625.2021.3.33006.

14. Курбанов Д. И. Современные тенденции в подготовке педагогических кадров // Проблемы и перспективы развития спортивного образования, науки и практики. 2023. № 11. С. 106–113. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54356413 (дата обращения: 11.03.2026).

15. Березина Т. И., Москаленко М. С., Федорова Е. Н. Этнокультурные составляющие профессиональной подготовки будущего учителя в образовательном процессе вуза // Современные проблемы науки и образования. 2023. № 1. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=32396 (дата обращения: 15.03.2026). DOI: 10.17513/spno.32396.

16. Палаткина Г. В., Палаткин В. В., Глебова А. П. Этнопедагогические средства формирования патриотических ценностей студентов // Современные наукоемкие технологии, 2024. № 11. С. 200–205. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40230 (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.17513/snt.40230.

17. Птицына Е. В. Сохранение художественных традиций родного края в образовательном процессе вуза // Современные наукоемкие технологии, 2024. № 5–1. С. 203–207. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40029 (дата обращения: 15.04.2026). DOI: 10.17513/snt.40029.

18. Худякова Н. Л. Традиционные ценности как основа воспитания в современном быстро меняющемся обществе // Вестник Челябинского государственного университета. 2023. № 4 (474). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=54359132 (дата обращения: 02.04.2026). DOI: 10.47475/1994-2796-2023-474-4-91-101.

19. Коршунова Н. М. Этнокультурные ценности и их роль в процессе этнокультурной социализации будущих учителей иностранных языков // Вестник Марийского государственного университета, 2021. Т. 15. № 2. С. 135–141. URL: http://vestnik.marsu.ru/view/journal/article.html?id=2184 (дата обращения: 02.04.2026). DOI: 10.30914/2072-6783-2021-15-2-135-141.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 378.1:378.6
DOI 10.17513/snt.40851

CC BY 4.0

ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ И БЕЛАРУСИ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЫПУСКА СПЕЦИАЛИСТОВ И ПОТРЕБНОСТЕЙ ОТРАСЛИ

Рущицкая О. А., Куликова Е. С., Кружкова Т. И., Фетисова А. В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный аграрный университет», Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: e.s.kulikova@inbox.ru

Подготовка кадров для агропромышленного комплекса в системе высшего образования России и Беларуси приобретает стратегическое значение в условиях технологического обновления сельского хозяйства, изменения структуры занятости и возрастания требований к качеству профессиональной подготовки. Для обеих стран аграрный сектор сохраняет высокую экономическую и социальную значимость, однако масштабы отрасли, механизмы закрепления выпускников и параметры образовательного воспроизводства различаются. Цель исследования заключается в сравнительной оценке того, насколько выпуск специалистов аграрного профиля соответствует емкости отрасли и может быть поддержан экономическими условиями последующего трудоустройства. Исследование выполнено на основе официальных статистических данных России и Беларуси по выпуску специалистов, численности занятых в сельском хозяйстве, уровню отраслевой заработной платы и общим параметрам трудоустройства выпускников. Использованы методы сравнительного, динамического и индексного анализа. В качестве аналитических показателей рассчитаны выпуск специалистов на 1000 занятых в отрасли и относительная зарплатная привлекательность аграрного сектора по отношению к средней оплате труда в экономике. Установлено, что в России при значительно большем масштабе занятости выпуск аграрных кадров в расчете на 1000 занятых оказывается ниже, чем в Беларуси. Это указывает на более напряженную нагрузку на систему кадрового воспроизводства. Одновременно в обеих странах аграрный сектор уступает среднему уровню оплаты труда по экономике, что ограничивает его способность удерживать молодых специалистов. Белорусская модель демонстрирует более высокую относительную насыщенность выпуском и более выраженные институциональные механизмы распределения выпускников, тогда как российская ситуация в большей степени определяется масштабом сектора и рыночной конкуренцией за кадры.

Ключевые слова: агрообразование, кадры, выпуск, занятость, соответствие, Беларусь, Россия

EDUCATIONAL SUPPORT FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX OF RUSSIA AND BELARUS: A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PRODUCTION OF SPECIALISTS AND THE NEEDS OF THE INDUSTRY

Ruschitskaya O. A., Kulikova E. S., Kruzhkova T. I., Fetisova A. V.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “ Ural State Agrarian University”, Yekaterinburg, Russian Federation, e-mail: e.s.kulikova@inbox.ru

Training personnel for the agro-industrial complex in the higher education systems of Russia and Belarus has become a strategic issue under conditions of technological modernization in agriculture, changing employment structures, and growing requirements for the quality of professional preparation. In both countries, the agricultural sector preserves major economic and social importance, yet the scale of the sector, the institutional mechanisms of graduate allocation, and the parameters of educational reproduction differ substantially. The purpose of the study is to assess comparatively the extent to which graduate output in agricultural fields corresponds to sectoral capacity and can be supported by the economic conditions of subsequent employment. The study is based on official statistical data from Russia and Belarus on graduate output, employment in agriculture, sectoral wages, and general indicators of graduate placement. Comparative, dynamic, and index methods are used. Two analytical indicators are calculated: graduates per one thousand persons employed in the sector and the relative wage attractiveness of agriculture compared with the average wage in the national economy. The findings show that Russia, despite its much larger agricultural labor base, demonstrates a lower graduate output per one thousand employed persons than Belarus. This indicates a more strained configuration of personnel reproduction. At the same time, in both countries agriculture remains below the economy-wide average wage, which weakens its capacity to retain young specialists. The Belarusian model reveals a higher relative saturation of the sector with graduates and stronger institutional mechanisms of graduate allocation, whereas the Russian case is influenced more strongly by sectoral scale and market competition for qualified labor.

Keywords: agroeducation, personnel, graduates, employment, alignment, Belarus, Russia

Введение

Подготовка кадров для агропромышленного комплекса в современных условиях приобретает значение одного из ключевых факторов устойчивости сельского хозяйства и продовольственной безопасности. Для России и Беларуси данный вопрос имеет особую значимость, поскольку в обеих странах аграрный сектор сохраняет высокую экономическую и социальную роль, а эффективность его развития все в большей степени зависит от качества кадрового обеспечения. Речь идет уже не только о количественном восполнении специалистов, но и о способности системы образования формировать профессиональный контур, соответствующий технологическому обновлению отрасли, цифровизации производственных процессов, усложнению управленческих функций и трансформации рынка труда.

В научной литературе кадровое обеспечение аграрного сектора рассматривается как часть более широкой проблемы стратегического развития агропромышленного комплекса. Так, R. A. Migunov и A. A. Syutkina показывают, что кадровый вопрос должен рассматриваться в логике стратегического целеполагания развития сельского хозяйства и выступает одним из базовых ограничителей отраслевого роста [1]. Е. П. Акри, А. Д. Корнилова, К. Ю. Доладов связывают перспективы кадрового обеспечения АПК России с инновационным развитием, подчеркивая, что потребность отрасли определяется не только численностью работников, но и изменением содержания профессиональных функций [2]. С. А. Андрющенко и Ю. П. Бондаренко дополняют данный подход, акцентируя внимание на роли государственной политики и региональных приоритетов в формировании условий для воспроизводства кадрового потенциала агропромышленного комплекса [3]. Отдельное направление исследований связано с институциональной связью аграрного образования, аграрной науки и модернизации сельского хозяйства. А. Р. Валиев, Р. М. Низамов, Р. И. Сафин и соавт. рассматривают аграрную науку и образование как взаимосвязанные элементы устойчивого развития агропромышленного комплекса [4]. А. А. Гончаров показывает, что реализация программ технического перевооружения без достаточного кадрового сопровождения снижает результативность модернизационных мер [5]. К сходным выводам приходят О. В. Закарчевский и А. С. Апатенко, подчеркивающие возрастающую зависимость отрасли от специалистов, способных работать в технологически усложняющейся среде [6].

Для белорусского контекста значимы исследования, связывающие устойчивость аграрного сектора с согласованностью производственной, инвестиционной и кадровой политики. С. А. Кондратенко и Н. Н. Котковец показывают, что устойчивое развитие агропромышленного комплекса Республики Беларусь требует системного подхода к кадровому обеспечению [7]. В другой работе они отмечают зависимость производственного потенциала сектора от воспроизводства человеческого капитала [8]. На региональном уровне О. Г. Лоретц, Е. М. Кот и А. В. Ручкин обосновывают значение программно-целевого подхода как инструмента согласования отраслевых и кадровых параметров развития [9]. Вопросы качества кадрового воспроизводства затрагиваются и в исследованиях М. В. Мельникова, М. А. Морозовой, Э. Н. Маллямовой, где анализируется эффективность подготовки научных кадров отрасли [10]. В. И. Нечаев и С. П. Михайлушкина связывают развитие аграрной науки и образования с необходимостью адаптации сектора к внешним ограничениям и усилению технологической самостоятельности [11]. С. А. Свиридова, А. В. Горячева и В. Н. Кузьмин расширяют дискуссию за счет сравнительного анализа модернизационных мер, используемых в зарубежной практике [12]. Непосредственно к сфере аграрного образования обращаются В. И. Трухачев, Е. В. Хохлова, Е. Н. Кролевецкая, обосновывающие необходимость долгосрочного прогнозирования кадровых потребностей отрасли [13]. И. М. Четвертаков, В. П. Четвертакова и А. М. Воробьева показывают, что кадровая проблема выходит за пределы собственно сельскохозяйственного производства и затрагивает смежные сферы АПК [14]. Ю. В. Чутчева и А. С. Сопов фактически подтверждают, что государственная поддержка технической модернизации не обеспечивает полной отдачи без соответствующего кадрового сопровождения [15].

При всей значимости названных исследований остается недостаточно раскрытым вопрос о том, насколько выпуск специалистов аграрного профиля соотносится с масштабом занятости в сельском хозяйстве и в какой мере экономические условия отрасли позволяют закреплять молодых специалистов после завершения обучения. Имеющиеся публикации убедительно показывают важность кадрового обеспечения, но в меньшей степени дают сопоставимый количественный инструмент для оценки его структурной достаточности. Авторы исходят из того, что образовательное обеспечение агропромышленного комплекса

должно оцениваться не по абсолютному числу выпускников, а через сопоставление выпуска, отраслевой занятости и экономических условий трудоустройства.

Цель исследования – выявление факторов, влияющих на кадровую устойчивость аграрного сектора России и Беларуси, на основе сопоставительного анализа выпуска специалистов аграрного профиля, масштабов занятости в сельском хозяйстве и экономических условий закрепления выпускников в отрасли.

Для достижения поставленной цели решаются две взаимосвязанные задачи. Первая состоит в оценке относительной обеспеченности аграрного сектора выпускниками профильных направлений подготовки через расчет числа выпускников на 1000 занятых в сельском хозяйстве. Вторая связана с определением того, в какой мере уровень оплаты труда и институциональные механизмы трудоустройства способствуют закреплению молодых специалистов в отрасли.

Материалы и методы исследования

Эмпирическую базу исследования составили официальные статистические данные Федеральной службы государственной статистики России и Национального статистического комитета Республики Беларусь, а также открытые статистические публикации по образованию, труду, занятости и заработной плате. В анализ включены показатели выпуска специалистов аграрного профиля, численности занятых в сельском хозяйстве, среднемесячной начисленной заработной платы в отрасли и средней заработной платы по экономике в целом. Временной контур построен на сопоставлении опубликованных рядов за 2022–2025 гг. с акцентом на наиболее поздние доступные значения, обеспечивающие межстрановое сравнение. В рамках индексного подхода рассчитан выпуск аграрных специалистов на 1000 занятых в секторе. Дополнительно рассчитан коэффициент зарплатной привлекательности сельского хозяйства как отношение отраслевой заработной платы к средней заработной плате по экономике. Сравнительный анализ применен для выявления различий между странами, динамический анализ – для интерпретации текущих значений в контексте последних опубликованных рядов, а панельный срез «до/после» использован в аналитической логике сопоставления периода до и после усиления внешних и технологических вызовов начала 2020-х гг.

Результаты исследования и их обсуждение

Для ответа на первый исследовательский вопрос необходимо сопоставить выпуск аграрных специалистов не сам по себе, а относительно масштаба занятости в сельском хозяйстве. В табл. 1 рассчитан показатель числа выпускников на 1000 занятых в агропромышленном комплексе, что создает базу для прямого межстранового сравнения.

Данные табл. 1 показывают, что при колоссальном различии в размере аграрного сектора интенсивность кадрового воспроизводства в двух странах неодинакова.

Таблица 1

Выпуск аграрных специалистов относительно занятости в агропромышленном комплексе

Страна	Выпуск аграрного профиля, тыс. чел.	Занятые в агропромышленном комплексе, тыс. чел.	Выпускников на 1000 занятых, чел.	Интерпретация
Россия	16,5	4020,0	4,1	Поток подготовки кадров относительно масштаба сектора ограничен
Беларусь	3,9	350,3	11,1	Относительная насыщенность выпуском существенно выше

Примечание: составлена автором на основе сопоставления данных Федеральной службы государственной статистики о выпуске специалистов и занятости в сельском хозяйстве, а также данных Национального статистического комитета Республики Беларусь по образованию и среднесписочной численности работников по видам экономической деятельности. [Электронный ресурс]. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Trud_06-2025.xlsx; https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/public_brochures/index_99834/; https://dataportal.belstat.gov.by/osids/indicator-info/10203200003?viewType=CHART (дата обращения: 10.04.2026).

Таблица 2

Зарплатная привлекательность сельского хозяйства
и условия закрепления выпускников

Страна	Отраслевая заработная плата	Средняя заработная плата по экономике	Соотношение, %	Вывод
Россия	59 834 руб.	96 232 руб.	62,2	Экономическое удержание выпускников в секторе затруднено
Беларусь	1584,0 бел. руб.	2476,5 бел. руб.	64,0	Даже при институциональной поддержке сектор уступает среднему уровню оплаты
Беларусь, распределение выпускников	16,0 тыс. трудоустроены из 17,3 тыс. подлежащих распределению	17,3 тыс. получили направление на работу	92,5	Институциональный механизм частично компенсирует более слабую зарплатную привлекательность

Примечание: составлена автором на основе данных Федеральной службы государственной статистики о среднемесячной начисленной заработной плате по видам экономической деятельности, данных Национального статистического комитета Республики Беларусь о начисленной средней заработной плате работников и статистики распределения выпускников, получивших высшее образование за счет бюджетных средств. [Электронный ресурс]. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Soc_pol_11_2025.xlsx;https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/stoimost-rabochey-sily/operativnye-dannye/o-nachislennoy-sredney-zarabotnoy-plate-rabotnikov/o-nachislennoy-sredney-zarabotnoy-plate-rabotnikov-respubliki-belarus-v-dekabre-2025-g/; https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/8df/ ab87a3hqzwbuewhugb7s0intg5s9m6nb.pdf (дата обращения: 10.04.2026).

В России при выпуске 16,5 тыс. специалистов и занятости 4020,0 тыс. чел. показатель составляет лишь 4,1 выпускника на 1000 занятых, что означает, что даже при количественно заметном выпуске система высшего образования работает на значительно более емкий рынок труда, где единичный поток молодых специалистов быстро «растворяется» в общей массе отраслевой занятости. В Беларуси при выпуске 3,9 тыс. чел. и занятости 350,3 тыс. чел. соответствующий показатель достигает 11,1, то есть оказывается примерно в 2,7 раза выше. В аналитическом плане это свидетельствует о более высокой относительной насыщенности сектора формальным образовательным потоком. Вместе с тем полученное различие не следует трактовать как прямое доказательство более высокого качества подготовки. Оно показывает прежде всего разную конфигурацию связи между системой образования и отраслью. Для России ключевой вызов связан с масштабом аграрного сектора и необходимостью расширенного воспроизводства кадров. Для Беларуси – с эффективным использованием уже более плотного потока выпускников и их закреплением в реальном производстве.

Второй блок анализа связан с возможностью удержания подготовленных специалистов в отрасли. Даже относительно высокий выпуск не обеспечивает кадровую устойчивость, если сектор проигрывает межотраслевую конкуренцию по уровню оплаты труда. Поэтому в табл. 2 сопоставлены отраслевые заработные платы с общеэкономическим средним уровнем, а также учтен белорусский механизм распределения выпускников как дополнительный институциональный регулятор кадрового потока.

Результаты табл. 2 подтверждают, что в обеих странах формируется общий ограничитель кадровой устойчивости – более низкая зарплатная привлекательность сельского хозяйства по сравнению со средним уровнем оплаты труда в экономике. В России отраслевая заработная плата составляет 59 834 руб. при среднем значении 96 232 руб., что дает соотношение 62,2%. Это означает, что молодой специалист, ориентированный на экономически рациональный выбор, сталкивается с заметным материальным разрывом уже на входе в трудовую траекторию. В Беларуси аналогичное соотношение составляет 64,0 %, то есть разрыв несколько меньше, но по существу сохраняется. При этом белорусская модель демонстрирует важное институциональное отличие: 17,3 тыс. выпускников, подлежащих распределению, практически полностью получают направление на работу, а 16,0 тыс. реально трудоустраиваются. Следовательно, слабость зарплатного сигнала в определенной степени компенсируется административно организованным вхождением в профессию. Однако и здесь предел компенсации очевиден: распределение облегчает старт занятости, но не отменяет долгосрочной проблемы конкурентоспособности отрасли на рынке труда. Тем самым сопоставление России и Беларуси показывает, что образо-

вательное обеспечение агропромышленного комплекса определяется не только масштабом подготовки, но и совокупностью экономических и институциональных условий закрепления кадров.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что образовательное обеспечение агропромышленного комплекса России и Беларуси должно оцениваться не по абсолютному выпуску специалистов, а через его соотношение с масштабом отрасли и условиями последующего трудоустройства. В этом состоит принципиальный исследовательский результат работы. Сопоставление показало, что Беларусь характеризуется более высокой относительной насыщенностью аграрного сектора выпускниками, тогда как для России ключевым ограничителем выступает масштаб занятости, при котором даже заметный по абсолютному значению выпуск оказывается сравнительно недостаточным.

Второй значимый вывод связан с тем, что в обеих странах сельское хозяйство уступает среднему уровню оплаты труда по экономике. Следовательно, проблема кадрового обеспечения имеет не только образовательное, но и структурно-экономическое измерение. Подготовка специалистов без достаточных механизмов их удержания не обеспечивает полной отдачи образовательной системы. Белорусская модель показывает, что институциональные механизмы распределения способны частично компенсировать слабую зарплатную привлекательность на этапе входа в профессию, но не устраняют фундаментального разрыва между отраслевыми и общеэкономическими стимулами.

Список литературы

1. Migunov R. A., Syutkina A. A. Research of Challenges of the Agro-Industrial Complex as the Basis of Strategic Goal-Setting of the Development of the Agricultural Sector // Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy. 2022. № 4. P. 135–145. DOI: 10.26897/0021-342X-2022-4-135-145.

2. Акри Е. П., Корнилова А. Д., Доладов К. Ю. Перспективы кадрового обеспечения АПК России в условиях инновационного развития // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2025. № 8 (126). С. 64–71. DOI: 10.33938/258-64.

3. Андрющенко С. А., Бондаренко Ю. П. Предпосылки и приоритеты государственной политики регионального развития агропромышленного комплекса России // Международный сельскохозяйственный журнал. 2024. № 4 (400). С. 443–447. DOI: 10.55186/25876740_2024_67_4_443.

4. Валиев А. Р., Низамов Р. М., Сафин Р. И., Мухаметгалиев Ф. Н., Нежметдинова Ф. Т. Приоритеты развития агропромышленного комплекса и задачи аграрной науки и образования // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17. № 1 (65). С. 97–107. DOI: 10.12737/2073-0462-2022-97-107.

5. Гончаров А. А. Анализ выполнения целевых программ в решении проблемы технического перевооружения сельского хозяйства // Агроинженерия. 2021. № 4 (104). С. 53–58. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-4-53-58.

6. Закарчевский О. В., Апатенко А. С. Техническое оснащение сельского хозяйства: путь к национальному суверенитету и продовольственной безопасности // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2025. № 10–1 (128). С. 105–119. DOI: 10.33938/25101-105.

7. Кондратенко С. А., Котковец Н. Н. Стратегические направления и механизмы устойчивого развития агропромышленного комплекса Республики Беларусь // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. 2025. Т. 63. № 3. С. 183–203. DOI: 10.29235/1817-7204-2025-63-3-183-203.

8. Котковец Н. Н., Кондратенко С. А. Развитие производственного потенциала агропромышленного комплекса Республики Беларусь в контексте тенденций мирового рынка продовольствия // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. 2024. Т. 62. № 1. С. 7–21. DOI: 10.29235/1817-7204-2024-62-1-7-21.

9. Лоретц О. Г., Кот Е. М., Ручкин А. В. Стратегическое развитие сельского хозяйства в регионе: программно-целевой метод // Аграрный вестник Урала. 2023. Т. 23. № 3. С. 93–102. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-232-03-93-102.

10. Мельников М. В., Морозова М. А., Маллямова Э. Н. Эффективность подготовки научных кадров отрасли // Экономика сельского хозяйства России. 2022. № 4. С. 57–62. DOI: 10.32651/224-57.

11. Нечаев В. И., Михайлушкина С. П. Роль отечественной аграрной науки и образования в развитии агропромышленного комплекса в условиях западных санкций: инновационно-ориентированный подход // Экономика сельского хозяйства России. 2022. № 5. С. 36–47. DOI: 10.32651/222-36.

12. Свиридова С. А., Горячева А. В., Кузьмин В. Н. Адаптация мер по модернизации сельского хозяйства в странах с развитым сельским хозяйством применительно к России // Международный сельскохозяйственный журнал. 2025. № 7 (409). С. 935–938. DOI: 10.55186/25876740_2025_68_7_935.

13. Трухачев В. И., Хохлова Е. В., Кролевецкая Е. Н. Стратегические ориентиры развития аграрного образования: форсайт-кейс РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева // Агроинженерия. 2025. Т. 27. № 1. С. 89–95. DOI: 10.26897/2687-1149-2025-1-89-95.

14. Четвертаков И. М., Четвертакова В. П., Воробьева А. М. Состояние и развитие отраслей I и III сфер АПК России // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2022. Т. 15. № 2 (73). С. 126–136. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2022_2_126.

15. Чутчева Ю. В., Сопов А. С. Меры государственной поддержки технической модернизации сельского хозяйства: отечественный и зарубежный опыт // Техника и оборудование для села. 2025. № 11 (341). С. 41–45. DOI: 10.33267/2072-9642-2025-11-41-45.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 378.147:004.8
DOI 10.17513/snt.40852

CC BY 4.0

МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ БУДУЩИХ IT-СПЕЦИАЛИСТОВ

Швыров В. В. ORCID ID 0009-0005-0163-2952,
Суворова Е. Ю. ORCID ID 0000-0003-4308-9765,
Капустин Д. А. ORCID ID 0009-0008-4254-319X

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Луганский государственный педагогический университет», Луганск, Российская Федерация, e-mail: kap-kapchik@mail.ru

Проблема индивидуализации подготовки IT-специалистов в условиях разнородного уровня знаний студентов остается не решенной традиционными линейными учебными программами. Цель исследования – разработка методики использования интеллектуальных систем на основе больших языковых моделей для формирования индивидуальных образовательных траекторий будущих IT-специалистов. В качестве методов применены теоретический анализ и систематизация научной литературы, а также моделирование педагогического процесса. Результатом является гибридная методика, сочетающая адаптивное тестирование, генерацию траектории с помощью языковых моделей, безопасное выполнение кода и рефлексию на основе логов. Предложена микросервисная архитектура программного комплекса, включающего диагностический, аналитический, исполнительный и рефлексивный модули. В отличие от универсальных подходов, методика ориентирована на специфику IT-образования, к которой относятся приоритет практико-ориентированных задач с автоматизированной проверкой кода, имитация реального технологического стека, использование безопасных сред выполнения. Раскрыты риски и этические аспекты применения методики, предложены способы их минимизации. Приведены критерии оценки эффективности методики – динамика компетенций, рост самостоятельности, временная эффективность, снижение рутинной нагрузки преподавателя. Работа носит концептуальный характер, эмпирическая апробация запланирована как следующий этап исследования. Методика предоставляет структурированный план внедрения персонализированного обучения в IT-образовании.

Ключевые слова: индивидуальная образовательная траектория, большие языковые модели, интеллектуальные системы, IT-образование, адаптивное обучение, гибридная архитектура

METHODOLOGY FOR USING INTELLIGENT SYSTEMS TO FORM INDIVIDUAL EDUCATIONAL TRAJECTORIES OF FUTURE IT SPECIALISTS

Shvyrov V. V. ORCID ID 0009-0005-0163-2952,
Suvorova E. Yu. ORCID ID 0000-0003-4308-9765,
Kapustin D. A. ORCID ID 0009-0008-4254-319X

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Lugansk State Pedagogical University", Lugansk, Russian Federation, e-mail: slshj@yandex.ru

The problem of individualizing the training of IT specialists in the context of heterogeneous levels of student knowledge remains unresolved by traditional linear curricula. The aim of the study is to develop a methodology for using intelligent systems based on large language models to form individual educational trajectories for future IT specialists. The methods employed include theoretical analysis and systematization of scientific literature, as well as modeling of the pedagogical process. The result is a hybrid methodology combining adaptive testing, trajectory generation using language models, secure code execution, and log-based reflection. A microservice architecture of the software suite is proposed, comprising diagnostic, analytical, executive and reflective modules. Unlike universal approaches, the methodology is oriented towards the specifics of IT education, which include the priority of practice-oriented tasks with automated code verification, simulation of a real technological stack, and the use of secure execution environments. The risks and ethical aspects of applying the methodology are disclosed, and ways to minimize them are suggested. Criteria for evaluating the effectiveness of the methodology are given – competence dynamics, increased learner autonomy, time efficiency, and reduction of the teacher's routine load. The work is conceptual in nature; empirical testing is planned as the next stage of the research. The methodology provides a structured plan for implementing personalized learning in IT education.

Keywords: individual educational trajectory, large language models, intelligent systems, IT education, adaptive learning, hybrid architecture

Введение

Проблема индивидуализации обучения в высшей школе, особенно когда речь идет о подготовке будущих IT-специалистов, давно перестала быть чисто теоретической. Студенты приходят учиться в вуз с разным багажом знаний, осваивают материал в неодинаковом темпе. В этом случае линейные образовательные программы демонстрируют недостаточную гибкость. Традиционные формы организации занятий, даже если в программе предусмотрены вариативные модули, не позволяют в полной мере учесть индивидуальные особенности каждого обучающегося [1, 2]. Возникает закономерный запрос на новые педагогические инструменты, которые позволят выстраивать глубокие и при этом персонализированные компетенции.

В последние годы научным сообществом активно исследуются возможности искусственного интеллекта для адаптивного обучения. Большие языковые модели (БЯМ, LLM) способны генерировать образовательный контент, анализировать ответы, давать обратную связь, одним словом, выступать в роли интеллектуальных помощников [3, 4]. Однако прямое включение таких моделей в образовательный процесс без дополнительных ограничений сопряжено с некоторыми рисками, такими как фактологические ошибки (так называемые галлюцинации БЯМ), трудности с проверкой сгенерированных материалов, а главное – отсутствие прозрачности педагогической логики [5]. В этой связи особую актуальность приобретает разработка гибридных методик, где мощь языковых моделей сочетается с формальными методами диагностики и контроля. Как показывают исследования в области интеллектуальных обучающих систем, эффективнее всего работают подходы, в которых БЯМ берут на себя генерацию, а планирование и оценку реализуют строгие модели предметной области [6, 7].

При разработке методики необходимо учитывать особенности профессиональной подготовки в сфере IT, отличающие ее от других направлений. Во-первых, содержание обучения здесь исключительно динамично, поскольку технологический стек, языки программирования, фреймворки и инструменты разработки обновляются быстрее, чем возможно пересматривать утвержденные учебные планы. Поэтому методика должна обеспечивать не столько трансляцию набора знаний, сколько формирование умения осваивать новые средства и быстро адаптироваться к изменяющимся условиям. Во-вторых, основной результат обучения в IT не воспроизведение фактов, а способность решать практические задачи с помощью кода, что выдвигает на первый план проектную и алгоритмическую деятельность. В-третьих, программный код, в отличие от многих других учебных продуктов, таких как эссе, чертежи, лабораторные отчеты и пр., поддается объективной автоматической проверке. Это позволяет интеллектуальной системе предоставлять оперативную обратную связь без постоянного участия преподавателя. В-четвертых, в IT-образовании традиционно высока доля самостоятельной работы, что делает актуальным интеллектуальное сопровождение в любое время. Наконец, сами студенты часто приходят с разным предпочтением в выборе языков и инструментов, и гибкая траектория должна учитывать эту вариативность. Перечисленные особенности отличают IT-подготовку от большинства гуманитарных, естественнонаучных и инженерных направлений, где проверка результатов требует экспертной оценки неформализуемых или многовариантных решений. Предлагаемая методика учитывает указанную специфику через архитектурные решения, в частности через безопасное выполнение пользовательского кода, адаптивное тестирование с генерацией задач и механизмы дополнения запросов к языковой модели актуальными библиотеками.

Научная новизна предлагаемой работы заключается не в создании принципиально новых технологических компонентов, а в концептуальной интеграции существующих решений в рамках замкнутого педагогического цикла «Диагностика → Проектирование → Реализация → Рефлексия → Коррекция». В отличие от фрагментарных подходов, где ИИ либо заменяет преподавателя, либо выступает надстройкой над LMS, в данной методике впервые описана ролевая трансформация преподавателя с указанием конкретных действий, требуемых компетенций и условий реализации. Таким образом, работа носит концептуальный характер и служит ориентиром для последующих эмпирических исследований.

Цель исследования – разработка методики, в которой большие языковые модели выступают инструментом диагностики, контроля и поддержки, а преподаватель сохраняет за собой функции анализа, определения и проектирования образовательной стратегии в процессе формирования индивидуальных образовательных траекторий (ИОТ) будущих IT-специалистов.

Материалы и методы исследования

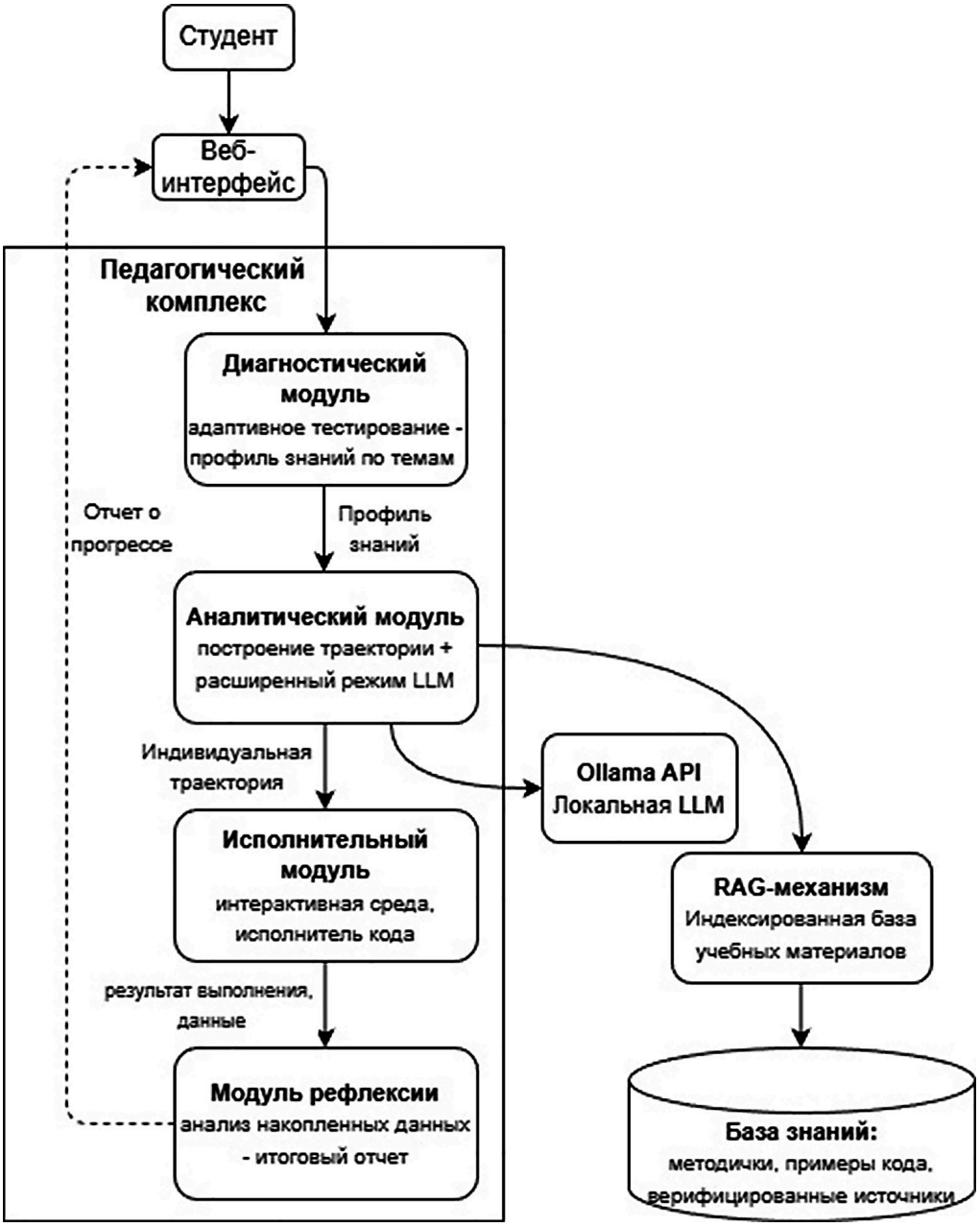
При подготовке IT-специалистов индивидуальную образовательную траекторию можно определить как динамическую, самоорганизующуюся модель обучения, реализуемую в профессионально ориентированной цифровой среде. Такая модель на основе алгоритмического анализа исходного уровня компетенций, профессиональных намерений и когнитивных предпочтений обучающегося формирует последовательность практико-ориентированных задач, приближенных к реальному технологическому стеку IT-индустрии, и допускает адаптацию содержания, темпа и способов обратной связи. Среди существенных характеристик этой траектории выделяются вариативность, позволяющая студенту выбирать язык программирования и глубину освоения материала, модульность как деление на самостоятельные блоки компетенций, технологическая релевантность, то есть ориентация на актуальные фреймворки и библиотеки, а также проектная насыщенность, означающая преобладание практических заданий по разработке приложений, оптимизации алгоритмов и поиску уязвимостей.

Несмотря на множество теоретических работ, посвященных ИОТ, большинство из них сводятся к уточнению определения этого понятия [8] или описанию отдельных организационных форм, например, синхронно-асинхронной деятельности [9]. Одни авторы сосредоточены на внедрении ИОТ в цифровую среду [10], другие рассматривают общие вопросы их реализации в современных условиях [11]. В исследованиях, посвященных искусственному интеллекту в высшей школе, обсуждаются главным образом общие перспективы и тенденции его внедрения [12, 13], предлагаются отдельные технические и методические решения [14, 15]. При этом между концептуальными моделями и их практической реализацией сохраняется заметный разрыв. Существующие подходы, как правило, работают фрагментарно. Например, системы управления обучением (LMS) в полной мере обеспечивают административную поддержку, но не дают глубокой адаптации. Рекомендательные системы подбирают подходящий контент, но не выстраивают целостной траектории, по которой мог бы эффективно двигаться обучающийся. Генеративные БЯМ создают обучающие материалы, но зачастую это происходит без учета системной педагогической логики.

Для преодоления этого разрыва необходимы комплексные методики, связывающие педагогические принципы построения ИОТ с технологическими возможностями современных интеллектуальных систем. Под методикой в данном случае понимается система последовательных действий, правил и инструментов, позволяющая преподавателю или образовательной платформе, опираясь на исходные данные об обучающемся и целевых компетенциях, сформировать, реализовать и скорректировать его уникальную образовательную траекторию. Поскольку данная работа носит теоретико-методический характер, в ней не представлены результаты эмпирической апробации. Вместо этого описывается архитектура разработанного программного комплекса и логика его применения, а также предлагаются критерии для будущей оценки эффективности.

В рамках решения этой задачи был разработан веб-ориентированный программный комплекс, построенный на принципах микросервисной архитектуры. В его основе лежит гибридный подход, объединяющий адаптивное тестирование, большие языковые модели, технологию Retrieval-Augmented Generation (RAG) и педагогическое проектирование. Система состоит из четырех основных взаимосвязанных модулей, каждый из которых решает свою часть задачи. *Диагностический модуль* реализован как адаптивный тест. Он не просто подсчитывает долю правильных ответов, а формирует структурированный профиль знаний студента с детализацией по темам. *Аналитический модуль,* опираясь на этот профиль, строит индивидуальную траекторию. В расширенном режиме он обращается к локально развернутой большой языковой модели через Ollama API. Чтобы повысить достоверность ответов, запросы дополняются фрагментами из предварительно проиндексированной базы учебных материалов, таких как методические указания, примеры кода, типовые задачи и т. п. За счет этого механизма модель работает с проверенными источниками. *Исполнительный модуль* предоставляет собой интерактивную среду для выполнения заданий. Основной его элемент – безопасный исполнитель кода, который изолирует процесс выполнения программ. *Модуль рефлексии* анализирует данные, накопленные в ходе работы, и формирует итоговый отчет о прогрессе студента. На рисунке представлена архитектурная схема системы.

В представленном прототипе использовались облегченные модели DeepSeek-R1 и YandexGPT-5-Lite-8B-instruct. При работе с учебной группой до 30 студентов достаточно сервера, оснащенного одним-двумя графическими ускорителями (GPU) с объемом видеопамяти не менее 8 ГБ на каждый. Оперативная память системы должна составлять от 16 до 32 ГБ, процессор не менее 4 ядер. В такой конфигурации время обработки одного запроса к модели составляет 2–5 с.



Архитектурная схема педагогической системы формирования ИОТ
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Использование внешних API, особенно зарубежных, во многих вузах запрещено внутренними регламентами из-за рисков утечки персональных данных и зависимости от сторонних сервисов. Локальное развертывание гарантирует, что все данные студентов, результаты тестирований, сведения об успеваемости и пр. остаются на сервере организации и никуда не передаются. Кроме того, автономный режим работы позволяет сохранять непрерывность учебного процесса даже при отсутствии доступа к сети Интернет.

Результаты исследования и их обсуждение

Предлагаемая методика применения интеллектуальной системы в формировании ИОТ у будущих IT-специалистов состоит из пяти этапов, каждый из которых решает конкретную педагогическую задачу.

Первый этап – диагностический. Студент проходит адаптивное тестирование и короткое анкетирование, в которых выявляется не только уровень его знаний, но и когнитивные предпочтения, професси-

ональные намерения. Результатом является формализованный профиль обучаемого.

Второй этап – аналитический. На основе профиля формируется ИОТ. В базовом режиме используются готовые шаблоны. В расширенном запускается последовательность запросов к языковой модели, которая шаг за шагом определяет разрыв в компетенциях, составляет детальный план с временными ориентирами и подбирает учебные ресурсы. Полученная траектория проверяется системой и выдается студенту в наглядной форме.

Третий этап – реализационный. Студент выполняет практические задания в интерактивной среде. Безопасное выполнение кода позволяет сразу проверять решения, а все действия фиксируются в логах. Студент последовательно работает над задачами из своей траектории. Если задача решена верно, она отмечается как выполненная, прогресс обновляется. При возникновении трудностей можно запросить подсказку. Тогда система отправляет в модель текущий код и условие, получает в ответ наводящий вопрос или указание на возможную ошибку, но не готовое решение. Такой подход оставляет пространство для самостоятельного мышления. Можно также запросить развернутое объяснение синтаксиса, что особенно полезно на начальном этапе. Наконец, предусмотрены автоматические подсказки. Если студент долго не вводит код или его попытки неудачны, система сама инициирует подсказку (эту опцию настраивает преподаватель).

Четвертый этап – рефлексивный. Когда работа над траекторией завершена, модуль рефлексии формирует подробный отчет, в который включается статистика успеваемости, динамика обращений за подсказками, рекомендации по дальнейшему движению. Это помогает студенту развивать навык самооценки.

Таблица 1

Направления деятельности преподавателя
при внедрении и использовании интеллектуальной системы

Направление работы	Действия преподавателя	Педагогическая задача / результат
Формирование учебной базы	Отбор и логическая систематизация учебно-методических материалов (лекции, задания, примеры кода, стандарты, типичные вопросы и ответы). Создание эталонных документов с типичными ошибками и способами их исправления	Обеспечить релевантность и точность работы системы при генерации подсказок и рекомендаций
Настройка педагогической логики системы	Выбор языковой модели с учетом задач (работа с кодом, универсальные инструкции). Проектирование и проверка системы запросов для анализа профиля, планирования, подсказок и объяснений кода. Корректировка запросов на основе типичных примеров	Настроить систему на направляющий, а не решающий характер помощи, учитывать уровень подготовки студента
Определение критериев оценки и правил поддержки	Задание правил оценивания выполнения задач. Настройка условий автоматической помощи: количество неудачных попыток перед подсказкой, время бездействия перед напоминанием	Индивидуализировать условия сопровождения в зависимости от сложности задания и подготовки студента.
Привлечение внешних источников	Подключение внешних баз данных для расширения рекомендаций по учебным ресурсам и карьерным ориентирам	Обогатить образовательный контекст, связать обучение с реальными профессиональными перспективами
Мониторинг успеваемости	Анализ сводных данных по группе и детальных сведений по каждому студенту: выполненные задания, затруднения, частота запросов подсказок, сложные темы	Видеть актуальную картину прогресса, своевременно выявлять проблемные зоны
Индивидуальные консультации на основе данных	Подготовка к консультациям по данным системы (текущая задача студента, написанный код, запрошенные подсказки). Разбор не поверхностных ошибок, а логических и синтаксических проблем	Сделать консультации адресными, эффективными, сократить время на выявление реальных затруднений
Рефлексия и корректировка методики	Анализ накопленных данных после завершения курса или крупного модуля. Оценка результатов, планирование изменений в методике	Непрерывное улучшение образовательного процесса на основе фактических данных

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 2

Критерии оценки эффективности методики

Критерий	Способ измерения	Ожидаемый показатель
Достижение планируемых компетенций	Сравнение результатов итогового тестирования с исходным диагностическим профилем	Уменьшение разрыва между целевым и фактическим уровнем знаний по каждой теме траектории
Рост самостоятельности обучающегося	Частота запросов подсказок на одно задание	Снижение количества обращений за помощью по мере продвижения по траектории; увеличение доли самостоятельно решенных задач
Временная эффективность	Соотношение запланированного и фактически затраченного времени на выполнение траектории	Доля студентов, укладывающихся в нормативные сроки без принудительной корректировки
Снижение рутинной нагрузки преподавателя	Количество автоматически проверенных заданий; доля консультаций, подготовленных по данным системы; опрос преподавателя	Рост числа заданий, проверенных без участия педагога; сокращение времени на рутинные операции

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Пятый этап – педагогический анализ. Преподаватель, изучая обобщенные данные по группе, выявляет темы, вызывающие устойчивые затруднения, и при необходимости корректирует учебные материалы или настройки запросов к модели. Так замыкается цикл непрерывного улучшения методики.

Внедрение интеллектуальной системы на базе больших языковых моделей кардинально меняет характер работы преподавателя. Освобождаясь от рутинных операций, педагог получает возможность сосредоточиться на стратегических и творческих задачах. В предлагаемой методике он выступает в трех взаимосвязанных ролях: архитектора образовательного процесса, эксперта-аналитика и наставника. Основные направления работы преподавателя, конкретные действия и их педагогический смысл отражены в табл. 1.

Поскольку предлагаемая методика носит концептуальный характер, ее эффективность не может быть измерена в рамках данной работы. Однако для последующей эмпирической апробации необходимо определить систему критериев, которые позволят оценить, насколько применение методики достигает заявленных целей. Предлагаются следующие критерии (табл. 2).

Перечисленные критерии взаимосвязаны и образуют единую систему. Так, рост самостоятельности обучающегося коррелирует со снижением частоты обращений за подсказками и одновременно влияет на временную эффективность. Достижение планируемых компетенций связано с динамикой успеваемости и результатами итогового контроля. В свою очередь, снижение рутинной нагрузки преподавателя является косвенным следствием повышения автономности студентов и автоматизации проверки заданий. Систему критериев предполагается использовать при проведении педагогического эксперимента, который составит содержание следующих публикаций. В рамках данной работы они служат ориентирами для проектирования методики и ее последующей верификации.

Предложенная методика имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при внедрении. Во-первых, она требует наличия вычислительных ресурсов для локального развертывания больших языковых моделей. Во-вторых, успешная реализация зависит от уровня квалификации преподавателей, которым необходимо приобрести навыки формулирования промптов, анализа данных и базовое понимание принципов машинного обучения. В-третьих, технология RAG и фильтрация запросов снижают, но не устраняют полностью риск галлюцинаций модели, так что требуется периодический контроль со стороны педагога. Кроме того, методика разработана преимущественно для IT-специальностей, ее перенос на другие предметные области потребует дополнительной адаптации. Наконец, эффективность методики на данном этапе не была подтверждена экспериментально в силу концептуального характера данной работы; это планируется сделать на следующих этапах. Дальнейшая работа будет направлена на эмпирическую апробацию описанной методики в реальном учебном процессе. Планируется провести формирующий эксперимент с участием экспериментальной и контрольной групп студентов с использованием разработанного программного комплекса. Критериями оценки выступят динамика успеваемости, изменение частоты обращения за подсказками, уровень вовлеченности, измеряемый

по данным логирования, а также результаты аттестационных испытаний. Отдельным направлением станет автоматизация настройки промптов на основе накапливаемых данных об ошибках студентов.

Заключение

Предложенная методика ориентирована преимущественно на практические задачи IT-образования, среди которых ускоренная подготовка кадров в условиях динамично меняющегося рынка труда, работа с разным уровнем подготовки студентов, а также снижение рутинной нагрузки на преподавателя при сохранении контроля за качеством обучения. В отличие от фрагментарных решений, данная методика предлагает целостный, замкнутый цикл от адаптивной диагностики до рефлексии и коррекции траектории на основе собранных данных. К особенностям методики для IT-специалистов относятся ориентация на практические задачи, симуляция реального технологического стека и автоматизированная проверка кода, что отличает ее от универсальных подходов, применимых в гуманитарных или естественнонаучных дисциплинах.

Для образовательных организаций методика дает структурированный план внедрения персонализированного обучения, в котором прописаны необходимый технологический стек и последовательность шагов, от настройки системы до педагогического анализа результатов. Важно, что преподаватель не вытесняется из процесса, а получает новые роли, для освоения которых описаны требуемые компетенции.

Гибридная интеллектуальная система, объединяющая в себе диагностический, аналитический, исполнительный и рефлексивный модули, служит технической основой предложенной методики. Такой подход позволяет перейти от абстрактной идеи персонализации к практическому созданию адаптивных образовательных сред. Методика не претендует на универсальность, но дает работающую основу для подготовки IT-специалистов, где возможности больших языковых моделей служат инструментом, а не заменой педагогического проектирования.

Список литературы

1. Носова Е. П. Индивидуальная образовательная траектория: сущность и механизмы проявления // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. 2009. № 12 (91). С. 138–144. EDN: JVZPDV.

2. Вдовина С. А., Кунгурова И. М. Сущность и направления реализации индивидуальной образовательной траектории // Науковедение. 2013. Вып. 6. С. 1–8. EDN: SAKSCB.

3. Wang S., Xu T., Li H. et al. Large Language Models for Education: A survey and outlook // IEEE Signal Processing Magazine. 2025. Vol. 42. Is. 6. P. 51–63. DOI: 10.1109/MSP.2025.3594309.

4. Phung T., Cambronero J., Gulwani S. et al. Generating high-precision feedback for programming syntax errors using large language models // Proceedings of the 16th International Conference on Educational Data Mining. 2023. P. 370–377. DOI: 10.5281/zenodo.8115653.

5. Донина И. А., Воднева С. Н., Михайлова М. Н. Искусственный интеллект в современном образовании: возможности и угрозы // Психолого-педагогический поиск. 2021. № 1 (57). С. 17–29. DOI: 10.37724/RSU.2021.57.1.002. EDN: RITYKT.

6. Alrakhawi H. A., Jamiat N., Abu-Naser S. S. Intelligent tutoring systems in education: a systematic review of usage, tools, effects and evaluation // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2023. T. 101. № 4. С. 1205–1226.

7. Luo J., Zheng C., Yin J. et al. Design and assessment of AI-based learning tools in higher education: a systematic review. // International Journal of Educational Technology in Higher Education. 2025. Vol. 22. Is. 42. DOI: 10.1186/s41239-025-00540-2.

8. Шапошникова Н. Ю. Индивидуальная образовательная траектория студента: анализ трактовок понятия // Педагогическое образование в России. 2015. № 5. С. 39–44. EDN: TWLKHF.

9. Шеманаева М. А. Индивидуальная образовательная траектория как форма синхронно-асинхронной образовательной деятельности // Концепт. 2017. № 9. С. 29–39. DOI: 10.24422/MCITO.2017.9.7470. EDN: ZIBXPR.

10. Полянская Е. Н., Полянский А. И., Бгуашева З. К. Организация индивидуальных образовательных траекторий в цифровой среде // Проблемы современного педагогического образования. 2023. № 81–1. С. 153–155. EDN: DNSQAE.

11. Рыбальченко А. С., Абильдинова Г. М. Индивидуальные образовательные траектории в контексте современности // Педагогический журнал. 2022. Т. 12. № 2А. С. 581–588. DOI: 10.34670/AR.2022.50.42.050. EDN: OLLLDX.

12. Амиров Р. А., Билалова У. М. Перспективы внедрения технологий искусственного интеллекта в сфере высшего образования // Управленческое консультирование. 2020. № 3 (135). С. 80–88. DOI: 10.22394/1726-1139-2020-3-80-88. EDN: XKTQTC.

13. Корчагин С. А. Анализ тенденций применения технологий искусственного интеллекта в образовательной сфере // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Социология. Политология. 2021. Т. 21. Вып. 1. С. 37–42. DOI: 10.18500/1818-9601-2021-21-1-37-42. EDN: PANEFP.

14. Капустин Д. А., Швыров В. В., Суворова Е. Ю., Сентяй Р. Н. Большие языковые модели как средство формирования индивидуальных образовательных траекторий // Материалы пула научно-практических конференций: материалы VII Международной научно-практической конференции, X Международной научно-практической конференции и VII Международной научно-практической конференции (г. Керчь, 23–27 января 2026 г.). Керчь: Керченский государственный морской технологический университет, 2026. С. 973–977. EDN: XMBZEF.

15. Швыров В. В., Капустин Д. А., Суворова Е. Ю., Зинченко В. О. Анализ больших языковых моделей в задачах формирования индивидуальных образовательных траекторий будущих IT-специалистов // Вестник Луганского государственного педагогического университета. Серия: Педагогические науки. Образование. 2026. № 1 (132). С. 115–124. EDN: CONMAU.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 378.14
DOI 10.17513/snt.40853

CC BY 4.0

ФОРМИРОВАНИЕ УСПЕШНОСТИ УНИВЕРСИТЕТСКОГО ОБУЧЕНИЯ ИНОСТРАННЫХ ГРАЖДАН В СОВРЕМЕННЫХ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ: ОРГАНИЗАЦИОННО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ

Шимкович Е. Д. ORCID ID 0000-0003-1520-1078

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань, Российская Федерация, e-mail: EDShimkovich@kpfu.ru

Глобализация высшего образования и геополитические изменения усиливают интерес к российским вузам со стороны иностранных абитуриентов. Цель статьи – выявить и обосновать организационно-педагогические механизмы, обеспечивающие успешность обучения иностранных студентов в российских университетах. Материал и методы: теоретический анализ нормативных документов, обобщение статистических данных, изучение отечественных и зарубежных исследований по межкультурной адаптации, а также анализ практического опыта подготовительного факультета для иностранных учащихся Казанского (Приволжского) федерального университета. Определены ключевые экономические (доступная стоимость обучения, бюджетные квоты, стипендии) и социальные (поликультурная среда, культурное разнообразие, безопасность) факторы привлекательности российского образования. Показано, что системной проблемой остается языковой барьер: даже после подготовительных факультетов значительная часть иностранных студентов испытывают трудности при освоении основных профессиональных программ. Обоснована необходимость создания адаптивной образовательной среды, включающей языковую и предметную подготовку, мероприятия по социокультурной адаптации, психолого-педагогическую поддержку и организационно-педагогическое обеспечение. Представлена авторская модель организационно-педагогических механизмов, включающая четыре взаимосвязанных блока. Успешность обучения иностранных граждан в современных социально-экономических условиях обеспечивается комплексом организационно-педагогических механизмов – от базовых адаптационных мер до методического и управленческого сопровождения с учетом культурного происхождения студентов.

Ключевые слова: иностранные студенты, российские университеты, межкультурная адаптация, языковой барьер, организационно-педагогические механизмы, экспорт образования, подготовительный факультет

FORMATION OF SUCCESS IN UNIVERSITY EDUCATION OF FOREIGN CITIZENS IN MODERN SOCIO-ECONOMIC CONDITIONS: ORGANIZATIONAL AND PEDAGOGICAL MECHANISMS

Shimkovich E. D. ORCID ID 0000-0003-1520-1078

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Kazan (Volga Region) Federal University", Kazan, Russian Federation, e-mail: EDShimkovich@kpfu.ru

Globalization of higher education and geopolitical changes increase interest in Russian universities from foreign applicants. The purpose of the article is to identify and substantiate organizational and pedagogical mechanisms that ensure the success of foreign students' education in Russian universities. Materials and methods: theoretical analysis of regulatory documents, generalization of statistical data, study of domestic and foreign research on intercultural adaptation, as well as analysis of practical experience of the preparatory faculty for international students of Kazan (Volga Region) Federal University. Results: key economic (affordable tuition fees, budget quotas, scholarships) and social (multicultural environment, cultural diversity, safety) factors of attractiveness of Russian education are identified. It is shown that the language barrier remains a systemic problem: even after preparatory faculties, a significant part of foreign students experience difficulties in mastering basic professional programs. The necessity of creating an adaptive educational environment including language and subject training, sociocultural adaptation activities, psychological and pedagogical support, as well as organizational and pedagogical provision is substantiated. The author's model of organizational and pedagogical mechanisms comprising four interconnected blocks is presented. Conclusion: the success of foreign citizens' education in modern socio-economic conditions is ensured by a set of organizational and pedagogical mechanisms – from basic adaptation measures to methodological and managerial support, taking into account the students' cultural background.

Keywords: foreign students, Russian universities, intercultural adaptation, language barrier, organizational and pedagogical mechanisms, education export, preparatory faculty

Введение

Современный этап глобализации высшего образования сопровождается трансформацией мирового образовательного пространства под влиянием новых геополитических и социально-экономических реалий. Для России это выражается в снижении привлекательности западных

университетов для отечественных абитуриентов и одновременном росте интереса к российскому высшему образованию со стороны стран Азии, Африки и Ближнего Востока. По данным Министерства науки и высшего образования РФ, в 2024–2025 учебном году в российских вузах обучалось более 389 тыс. иностранных студентов, причем наибольший прирост показали студенты из Китая, Индии, Египта, Ирана и стран СНГ[1].

Указом Президента РФ от 07 мая 2024 г. № 309 поставлена задача достичь численности иностранных студентов в российских вузах не менее 500 тыс. к 2030 г. [1]. Это амбициозное задание требует не только количественного набора, но и качественного улучшения обучения, адаптации и сопровождения иностранных граждан. Государственные программы «Приоритет-2030» и «Развитие экспортного потенциала российской системы образования» направлены на повышение конкурентоспособности университетов и создание благоприятной поликультурной среды [2].

Однако, как показывают исследования последних лет, системной проблемой остается недостаточная языковая и социокультурная адаптация иностранных обучающихся [3, 4]. Традиционная модель подготовки на подготовительных факультетах и отделениях иностранных граждан как первой ступени университетского обучения, рассчитанная в основном на формирование языковых компетенций, не всегда учитывает индивидуальные культурные особенности, психологические барьеры и различия в образовательных традициях стран исхода. В результате студенты, формально завершившие языковой курс, испытывают серьезные трудности при переходе к обучению на основных факультетах, что нередко приводит к академической неуспеваемости и даже отчислению [4].

Особую актуальность эта проблема приобретает в университетах, которые принимают большое количество иностранных студентов из разных регионов мира. Казанский (Приволжский) федеральный университет (КФУ) является одним из лидеров в России по числу иностранных обучающихся: на подготовительном факультете для иностранных учащихся ежегодно проходят подготовку более 1000 студентов как минимум из 50 стран мира. Накопленный в КФУ опыт требует системного осмысления и обобщения.

Цель исследования – выявить и обосновать организационно-педагогические механизмы, необходимые для формирования успешности обучения иностранных граждан в российских университетах в современных реалиях, а также предложить модель их практической реализации на примере подготовительного факультета.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено с использованием комплекса теоретических и эмпирических методов. Теоретические методы включали: анализ нормативно-правовых актов РФ (Указ Президента № 309, программа «Приоритет-2030»), обобщение статистических данных, представленных в работах А. Л. Арефьева [5], а также изучение отечественных и зарубежных исследований по межкультурной адаптации. Проанализированы классические зарубежные труды K. Oberg [6], Y. Mustafa [7] и др. [8]. Также изучены работы Y. Zhou с соавт. [9], J. W. Berry [10] и C. Ward с соавт. [11]. Среди современных российских публикаций рассмотрены исследования М. Н. Вишневской [12], М. И. Безносовой и А. Р. Галиахметовой [13]. Проанализированы работы Г. П. Ивановой с соавт. [14] и О. В. Куликовой [15].

Эмпирическую базу составил анализ практического опыта работы подготовительного факультета для иностранных учащихся КФУ за 2019–2025 гг. Использованы данные внутреннего мониторинга успеваемости, результаты анкетирования иностранных студентов, а также экспертные интервью с преподавателями и тьюторами.

Дополнительно привлечены материалы о международной олимпиаде Open Doors[2] [16] и статистические данные по международной академической мобильности [17].

Результаты исследования и их обсуждение

Экономическая и социальная привлекательность российского образования

По данным А. Л. Арефьева, средняя стоимость обучения в России остается значительно ниже, чем в странах – лидерах образовательного рынка: в 2023 г. год обучения в российском вузе составлял в среднем 184,5 тыс. руб., тогда как в США – около 3 млн руб., в Великобритании – 2,5 млн руб., в Австралии – 2,2 млн руб. [5]. Это делает российское высшее образование доступным для граждан из стран с разным уровнем до-

[1] Число иностранных студентов в РФ по итогам 2024 года оценивается в 389 тыс. [Электронный ресурс]. URL: https://tass.ru/obschestvo/22845895 (дата обращения: 09.01.2026).

[2] Официальный сайт Международной олимпиады Open Doors / Ассоциация «Глобальные университеты». [Электронный ресурс]. URL: https://od.globaluni.ru/ru (дата обращения: 05.03.2026).

хода, особенно из государств Африки, Центральной Азии и Ближнего Востока.

Российские университеты предлагают иностранным абитуриентам свыше 4000 образовательных программ в различных областях – от медицины и инженерного дела до гуманитарных наук. Наибольшей популярностью пользуются специальности «Клиническая медицина», «Инженерия и технология», «Компьютерные науки» и «Биотехнологии». Кроме того, активно развиваются программы на английском языке, которых в 2024 г. насчитывалось уже более 600 по всей стране.

Важным фактором является также возможность трудоустройства после окончания обучения. По оценкам экспертов, от 40 до 70 % иностранных студентов склонны оставаться в стране обучения, и российский рынок труда, особенно в наукоемких и высокотехнологичных отраслях, заинтересован в таких специалистах [5]. Российское правительство предоставляет иностранным выпускникам упрощенный порядок получения разрешения на работу и вида на жительство.

Социальные стимулы включают богатую историко-культурную среду, доброжелательное отношение к иностранцам и возможность межкультурного общения. Опросы иностранных студентов показывают, что многие из них выбирают Россию именно из-за интереса к русской культуре, литературе, музыке и балету [17].

Проблема языкового барьера и культурного шока

Несмотря на наличие подготовительных факультетов и отделений во всех крупных российских вузах, проблема языковой подготовки остается острой. Исследования М. Н. Вишневской показывают, что даже после завершения подготовительной программы значительная часть иностранных студентов (от 50 до 65 % в зависимости от страны происхождения) оценивают свой уровень владения русским языком как недостаточный для полноценного освоения профессиональных программ [12]. Наиболее сложными аспектами являются понимание лекций на русском языке (особенно когда преподаватель говорит быстро или использует сложную терминологию), работа с академическими текстами и сдача экзаменов в устной форме.

М. И. Безносова и А. Р. Галиахметова отмечают, что трудности понимания лекций, работы с академическими текстами и сдачи экзаменов нередко приводят к академической неуспеваемости [13]. В особо тяжелых случаях это может стать причиной досрочного прекращения обучения: по данным некоторых вузов, отчисление иностранных студентов на первом-втором курсах достигает 15–20 %.

Феномен «культурного шока», впервые описанный K. Oberg, включает несколько фаз: начальную эйфорию («медовый месяц»), фрустрацию из-за культурных различий, постепенную адаптацию и интеграцию. Полный цикл может занимать от 6 до 12 месяцев, а в некоторых случаях и дольше [6]. Согласно Y. Mustafa, успешное преодоление культурного шока ведет к формированию бикультурной личности, способной свободно функционировать в двух культурных пространствах [7]. Автор также подчеркивает, что сам культурный шок может иметь не только негативные, но и позитивные последствия, рассматривая его как возможность для личностного роста и развития межкультурной компетенции, что особенно актуально для иностранных студентов. Некоторые исследователи связывают этот феномен с тройственным кризисом: утратой бытовых автоматизмов, коммуникационными барьерами и трансформацией идентичности [8].

Y. Zhou с соавт. систематизировали теоретические модели адаптации, выделив три основных подхода: модель преодоления стресса (stress-coping model), модель культурного научения (culture learning model) и модель социальной идентификации (social identification model). Каждая из них подчеркивает важность поддерживающей среды, обучения межкультурным навыкам и сохранения позитивной самооценки [9].

J. W. Berry предложил четырехфакторную модель аккультурации: интеграция (поддержание своей культуры и участие в культуре принимающей страны), ассимиляция (отказ от своей культуры в пользу принимающей), сепарация (сохранение своей культуры без участия в принимающей) и маргинализация (потеря обеих культур). Исследования показывают, что интеграция является наиболее успешной стратегией, обеспечивающей психологическое благополучие и академические успехи [10].

C. Ward с соавт. дополнили эту модель, разграничив психологическую адаптацию (эмоциональное благополучие, отсутствие тревоги и депрессии) и социокультурную адаптацию (способность эффективно взаимодействовать с представителями принимающей культуры). Эти два типа адаптации требуют разных форм поддержки: для психологической адаптации важны социальная поддержка и позитивный климат, для социокультурной – обучение конкретным навыкам и знаниям [12].



Организационно-педагогические механизмы успешного обучения: авторская модель

Анализ современных российских исследований и обобщение практического опыта работы подготовительного факультета для иностранных учащихся КФУ позволили разработать авторскую модель организационно-педагогических механизмов, включающую четыре взаимосвязанных блока (рисунок).

Первый блок – языковая и предметная подготовка и сопровождение. Он включает не только базовый курс русского языка как иностранного на подготовительном факультете (объемом не менее 800–1000 академических часов) и предметную подготовку по общеобразовательным дисциплинам в зависимости от будущей специальности,

но и изучение научного стиля речи согласно профилю обучения, а также сопровождающие курсы профессионального русского языка на первом-втором курсах основных факультетов; языковые клубы и разговорные практики. Важным элементом является также обучение академическому письму и навыкам работы с научными текстами [12, 13].

Второй блок – социокультурная адаптация. Сюда входят: знакомство с историей, культурой и традициями России, посещение музеев, театров, исторических культурных мест и т. д., организация национальных праздников и фестивалей, создание интернациональных клубов и землячеств, а также межкультурные тренинги, направленные на снижение стереотипов и развитие толерантности. Опыт КФУ показывает, что регулярные культурные мероприятия снижают уровень тревожности у иностранных студентов и способствуют формированию позитивного образа принимающей страны [18].

Третий блок – психолого-педагогическая поддержка. Он включает: работу психологической службы (индивидуальное и групповое консультирование), тренинги по управлению стрессом и развитию коммуникативных навыков, создание системы наставничества (за каждым иностранным студентом закрепляется русскоязычный студент-волонтер или выпускник подготовительного факультета из числа активистов), а также регулярный мониторинг эмоционального состояния и успеваемости. Исследования показывают, что наличие наставника-ровесника значительно ускоряет процесс адаптации и снижает риск депрессии и тревожных расстройств [15].

Четвертый блок – организационно-методическое обеспечение. Сюда относятся: разработка адаптированных учебных материалов для иностранных студентов (с учетом их языкового уровня); внедрение смешанного обучения с использованием онлайн-курсов и электронных ресурсов и тьюторским сопровождением; создание многоязычной информационной среды (сайт, памятки, навигация на русском, английском, арабском, китайском языках и др.), а также повышение квалификации преподавателей в областях методики преподавания русского языка как иностранного и межкультурной коммуникации.

В КФУ накоплен положительный опыт реализации всех четырех блоков. Для вновь прибывших иностранных студентов организуются мероприятия по знакомству с университетом, городом, правилами проживания в общежитии и техникой безопасности. Работают разговорные клубы, проводятся экскурсии по Казани и Республике Татарстан.

Роль международных проектов и олимпиад

Международная олимпиада Open Doors, ежегодно проводимая в рамках национального проекта, привлекает сотни тысяч участников из десятков стран, а победители получают право на бесплатное обучение в ведущих российских вузах. За годы существования олимпиады в ней приняли участие более 500 тыс. человек из более чем 200 стран мира, около 90 % из них проживают в странах Азии и Африки. Более 12 тыс. победителей и призеров получили право бесплатного обучения в лучших российских университетах [16]. КФУ активно участвует в этой олимпиаде, ежегодно принимая на обучение десятки победителей.

Благодаря целенаправленной реализации всех четырех блоков удается значительно улучшить академические показатели иностранных студентов, снизить уровень тревожности и число отчислений, а также сформировать у них позитивное отношение к России как к стране, где они получают образование. Полученные результаты согласуются с выводами Г. П. Ивановой с соавт., которые подчеркивают, что целенаправленное создание поликультурной образовательной среды является ключевым фактором академических успехов иностранных студентов [14]. В отличие от западных стран, где иностранные студенты чаще обучаются на коммерческой основе и несут полную финансовую ответственность за свое обучение, Россия предоставляет значительные бюджетные квоты и грантовую поддержку. В 2022 г. количество бюджетных мест для иностранных граждан в вузах России выросло на 30 % по сравнению с 2019 г., что усиливает элемент «мягкой силы» и делает российское образование более доступным [16].

Вместе с тем, как отмечает О. В. Куликова, существующая система сопровождения не всегда учитывает индивидуальные особенности студентов из разных регионов [15]. Опыт, накопленный в КФУ, подтверждает, что студенты из стран Турции, Ирана, Ливана адаптируются быстрее благодаря частичному знанию русского языка и близости культур. Студенты из Китая, Вьетнама, Египта, Нигерии, Эквадора испытывают больше трудностей, особенно в первое время. Поэтому необходим дифференцированный подход, учитывающий не только страну происхождения, но и религиозные, этнические и семейные особенности.

Классические модели аккультурации J. W. Berry [10] и интегрированная модель C. Ward с соавт. [11] позволяют предположить, что наиболее успешной стратегией является интеграция, предполагающая сохранение собственной культурной идентичности при активном освоении культуры принимающей страны. В КФУ сохраняется тенденция создавать условия именно для интеграции, а не для ассимиляции. Этому способствуют интернациональные студенческие клубы, где представители разных культур делятся своими традициями, и совместные праздники (Новый год, Масленица, Навруз, Курбан-байрам, китайский Новый год и др.).

Важным ограничением проведенного исследования является то, что оно опирается в основном на данные одного университета – Казанского федерального университета. Хотя КФУ является одним из лидеров по числу иностранных студентов, его опыт может не полностью отражать ситуацию в небольших региональных вузах. Поэтому необходимы дальнейшие сравнительные исследования с участием университетов разных типов – классических, технических, медицинских, педагогических.

Также перспективным направлением является изучение долгосрочных траекторий иностранных выпускников: остаются ли они в России, возвращаются ли на родину или мигрируют в третьи страны, как их опыт обучения в России влияет на их профессиональную и личную жизнь. Такие исследования могли бы использовать смешанную методологию, сочетая количественные опросы с качественными интервью.

Заключение

Успешность университетского обучения иностранных граждан в современных социально-экономических условиях обеспечивается комплексом организационно-педагогических механизмов, объединяемых в четыре группы: языковая и предметная подготовка и сопровождение; социокультурная адаптация; психолого-педагогическая поддержка; организационно-методическое обеспечение. Ключевыми факторами также выступают доступность образования (стоимость обучения, бюджетные квоты, стипендии, гранты), расширение программ на английском языке, развитие дистанционных технологий и тьюторское сопровождение.

Практический опыт Казанского федерального университета подтверждает, что целенаправленная работа по всем четырем направлениям способствует повышению академической успеваемости иностранных студентов, снижению уровня их тревожности, а также формированию у них позитивного отношения к России как к стране обучения. Реализация этих механизмов позволит России достичь национальной цели по численности иностранных студентов к 2030 г. и укрепить свои позиции на мировом рынке образования.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку стандартизированных инструментов оценки эффективности адаптационных программ, а также на изучение влияния цифровизации образования на процессы межкультурной адаптации в условиях смешанного и дистанционного обучения.

Список литературы

1. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года: Указ Президента РФ от 07 мая 2024 г. № 309. [Электронный ресурс]. URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542 (дата обращения: 05.04.2026).

2. Гусева А. И., Калашник В. М., Каминский В. И., Киреев С. В. Исследовательское лидерство программы «Приоритет-2030»: факторы успеха // Высшее образование в России. 2022. Т. 31. № 1. С. 42–58. URL: https://vovr.elpub.ru/jour/article/view/3274 (дата обращения: 12.02.2026). DOI: 10.31992/0869-3617-2022-31-1-42-58.

3. Мисбахова А. Г., Галимянов И. Д. Психологическая адаптация иностранных студентов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Познание. 2022. № 6. С. 60–63. URL: http://www.nauteh-journal.ru/files/010a6c73-751a-40dd-84a5-ea76b92b65c1 (дата обращения: 22.02.2026). DOI: 10.37882/2500-3682.2022.06.14.

4. Мамина Д. А., Мареев В. И., Хунагов Р. Д. Барьеры социокультурной адаптации иностранных студентов в вузах юга России // Вестник Южно-Российского государственного технического университета. Серия: Социально-экономические науки. 2021. Т. 14. № 6. С. 113–122. URL: https://vestnik.npi-tu.ru/index.php/vestnikSRSTU/article/view/1472 (дата обращения: 08.02.2026). DOI: 10.17213/2075-2067-2021-6-113-122.

5. Арефьев А. Л. Обучение иностранных граждан в образовательных организациях высшего образования Российской Федерации. Статистический сборник. М.: Государственный институт русского языка им. А. С. Пушкина, 2020. Вып. 17. 180 с. [Электронный ресурс]. URL: http://lib.lunn.ru/LunnDigitalDocsClosed/DR279756.pdf (дата обращения: 18.03.2026). ISBN 978-5-98269-235-1.

6. Oberg K. Cultural shock: Adjustment to new cultural environments // Practical Anthropology. 1960. Vol. 7. Is. 4. P. 177–182. URL: https://www.sci-hub.ru/10.1177/009182966000700405 (дата обращения: 12.03.2026). DOI: 10.1177/009182966000700405.

7. Mustafa Y. A review of culture shock: Attitudes, effects and the experience of international students // Journal of Intercultural Communication. 2021. Vol. 21. Is. 3. P. 4–25. URL: https://www.immi.se/index.php/intercultural/article/view/18 (дата обращения: 16.04.2026). DOI: 10.36923/jicc.v21i3.18.

8. Culture, Communication and Conflict: Readings in Intercultural Relations / Ed. Gary R. Weaver. Boston: Pearson Publishing, 2000. 584 p. [Электронный ресурс]. URL: https://archive.org/details/culturecommunica0000unse_u7c3/page/n9/mode/2up (дата обращения: 02.03.2026). ISBN 0-536-61343-5.

9. Zhou Y., Jindal-Snape D., Topping K., Todman J. Theoretical models of culture shock and adaptation in international students in higher education // Studies in Higher Education. 2008. Vol. 33. Is. 1. P. 63–75. URL: https://www.tandfonline.

com/doi/full/10.1080/03075070701794833 (дата обращения: 22.03.2026). DOI: 10.1080/03075070701794833.

10. Berry J. W. Migrant acculturation and adaptation // Oxford textbook of migrant psychiatry / Ed. D. Bhugra. Oxford, 2021. P. 311–317. URL: https://books.google.ru/books?hl=ru&lr=&id=97wcEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA311&dq#v=onepage&q&f=false (дата обращения: 16.04.2026). ISBN 978-0-19-883374-1.

11. Ward C., Bochner S., Furnham A. The Psychology of Culture Shock. 2nd ed. London: Routledge, 2001. 386 p. [Электронный ресурс]. URL: https://www.academia.edu/2662056/Psychology_of_culture_shock?auto=download (дата обращения: 16.06.2025). ISBN 0-415-16234-3.

12. Вишневская М. Н. Особенности адаптации иностранных студентов к процессу обучения в российском вузе // Мир науки. Педагогика и психология. 2020. Т. 8. № 2. URL: https://mir-nauki.com/PDF/63PSMN220.pdf (дата обращения: 12.12.2025). DOI: 10.15862/63PSMN220.

13. Безносова М. И., Галиахметова А. Р. Социокультурная и академическая адаптация иностранных обучающихся как необходимое условие экспорта российского образования // Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования: материалы VIII Международной конференции (г. Ижевск, 23–24 апреля 2019 г.) в 2 т. Т. 1. Ижевск: Изд-во ИжГТУ им. М. Т. Калашникова, 2019. С. 519–526. [Электронный ресурс]. URL: http://elibrary.udsu.ru/xmlui/handle/123456789/18830 (дата обращения: 18.04.2025). ISBN 978-5-7526-0832-2.

14. Иванова Г. П., Логвинова О. К., Ширкова Н. Н. Педагогическое обеспечение социокультурной адаптации иностранных студентов: опыт реализации // Высшее образование в России. 2018. Т. 27. № 3. С. 60–69. URL: https://vovr.elpub.ru/jour/article/view/1314 (дата обращения: 18.01.2026).

15. Куликова О. В. Особенности мотивации учения иностранных студентов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2009. № 8. С. 229–232. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=67892729 (дата обращения: 01.03.2026).

16. Демарева В. А. Некоторые аспекты привлечения и удержания иностранных студентов в РФ // Связь поколений как культурное наследие народов Союза независимых государств / Под общей редакцией проф. З. Х. Сарадиевой. Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, 2023. С. 421–424. [Электронный ресурс]. URL: https://ukros.ru/wp-content/uploads/2023/11/Сборник-материалов-конференции_Связь-поколений....pdf#page=421 (дата обращения: 12.12.2025). ISBN 978-5-91326-832-7.

17. Рязанцев С. В., Ростовская Т. К., Скоробогатова В. И., Безвербный В. А. Международная академическая мобильность в России: тенденции, виды, государственное стимулирование // Экономика региона. 2019. Т. 15. № 2. С. 420–435. URL: https://economyofregion.ru/arhiv/2019-2/nomer-2-2019/mezhdunarodnaya-akademicheskaya-mobilnost-v-rossii-tendenczii-vidy-gosudarstvennoe-stimulirovanie/ (дата обращения: 12.05.2025). DOI: 10.17059/2019-2-9.

18. Цветков С. А., Шимкович Е. Д., Гатауллина А. Г. О направлениях социальной адаптации слушателей подготовительного факультета для иностранных обучающихся // Иностранный студент университета: адаптация, обучение, здоровье: монография / под ред. проф. Е. Л. Николаева. Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т им. И. Н. Ульянова, 2024. С. 72–99. URL: https://kpfu.ru/staff_files/F_838974650/Monografiya.pdf (дата обращения: 24.05.2026). ISBN 978-5-7677-3732-1.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.