

ISSN 2223-2966



СОВРЕМЕННАЯ НАУКА:
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 1 2026 (ЯНВАРЬ)

Учредитель журнала
Общество с ограниченной ответственностью
«НАУЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Журнал издается с 2011 года.

Редакция:

Главный редактор
А.В. Царегородцев
Выпускающий редактор
Ю.Б. Миндлин
Верстка
М.А. Комарова

Подписной индекс издания
в каталоге агентства «Пресса России» — 80016
В течение года можно произвести подписку
на журнал непосредственно в редакции.

Издатель:

Общество с ограниченной ответственностью
«Научные технологии»

Адрес редакции и издателя:
109443, Москва, Волгоградский пр-т, 116-1-10
Тел/факс: 8(495) 142-8681
E-mail: redaktor@nauteh.ru
<http://www.nauteh-journal.ru>

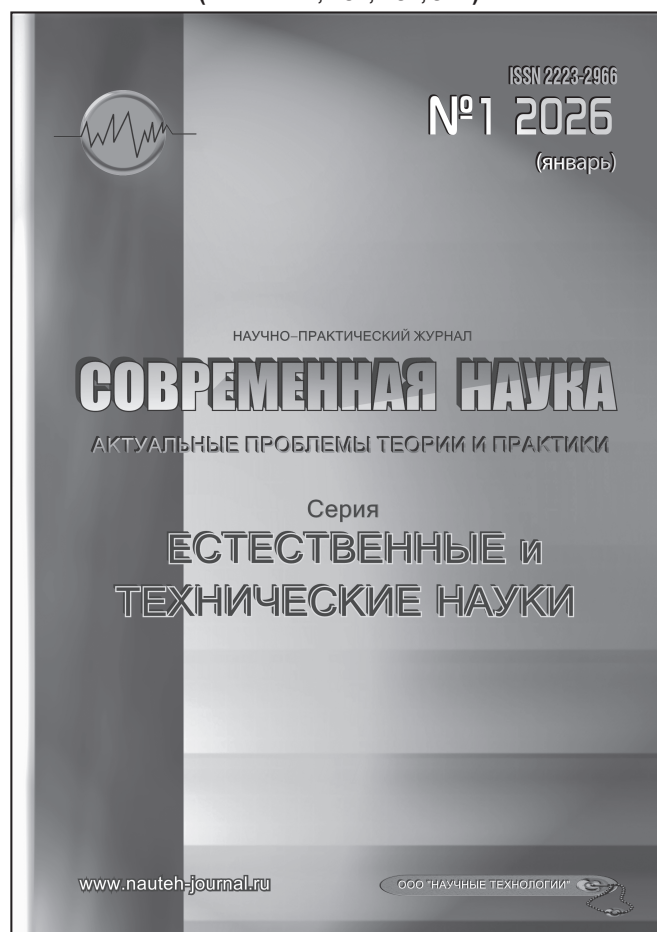
Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия.

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-44912 от 04.05.2011 г.

Научно-практический журнал

Scientific and practical journal

(БАК — 1.1.2, 1.5.x, 2.3.x, 3.1.x)



В НОМЕРЕ:

ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ, ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ,
КЛИНИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА

Авторы статей несут полную ответственность
за точность приведенных сведений, данных и дат.

При перепечатке ссылка на журнал
«Современная наука:
Актуальные проблемы теории и практики» обязательна.

Журнал отпечатан в типографии
ООО «КОПИ-ПРИНТ» тел./факс: (495) 973-8296
Подписано в печать 12.01.2026 г. Формат 84x108 1/16
Печать цифровая Заказ № 0000 Тираж 2000 экз.

ISSN 2223-2966



Редакционный совет

Атаев Алевдин Рашитханович — д.м.н., профессор, Дагестанский государственный медицинский университет

Безруких Марьям Моисеевна — д.б.н., профессор, Институт возрастной физиологии РАО

Бекетов Сергей Валериевич — д.б.н., ФГБНУ НИИ Пушного звероводства и кролиководства имени В.А. Афанасьева

Белых Владимир Иванович — Д.м.н., доцент, Алтайский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации

Грачев Николай Николаевич — доктор высшей степени в области технических наук (DoctorHabilitatus), профессор, Московский государственный институт электроники и математики НИУ ВШЭ (технический университет)

Гусева Анна Ивановна — д.т.н., профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Зубкова Валентина Михайловна — д.б.н., профессор, Российский государственный социальный университет

Каллаев Нажмудин Омаркадиевич — д.м.н., профессор, Дагестанский государственный медицинский университет

Квасов Андрей Иванович — д.т.н., профессор, Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева

Корнеев Андрей Матиславович — д.т.н., профессор, Липецкий государственный технический университет

Корягина Наталья Александровна — д.м.н., доцент, Пермский государственный медицинский университет им. ак. Е.А.Вагнера Министерства здравоохранения Российской Федерации

Кравец Бронислава Борисовна — д.м.н., профессор, Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко Министерства здравоохранения Российской Федерации

Кулик Сергей Дмитриевич — д.т.н., доцент, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Матвеев Всеволод Борисович — д.м.н., профессор, ФГБУ РОНЦ им. Н.Н. Блохина, член-корреспондент РАН

Миндлин Юрий Борисович — к.э.н., доцент, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии им. К.И. Скрябина

Надежкин Сергей Михайлович — д.б.н., профессор, Всероссийский НИИ селекции и семеноводства овощных культур Россельхозакадемии

Овезов Алексей Мурадович — д.м.н., доцент, ГБУЗ МО Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимирского

Олейникова Светлана Александровна — д.т.н., доцент, Воронежский государственный технический университет

Рахимов Ильгизар Ильясович — д.б.н., профессор, Казанский (Приволжский) федеральный университет

Ромашкова Оксана Николаевна — д.т.н., профессор, Московский городской педагогический университет

Симаков Юрий Георгиевич — д.б.н., профессор, Московский государственный университет им. К.Г. Разумовского (ПКУ)

Симоненков Алексей Павлович — д.м.н., профессор, независимый эксперт

Трапезов Олег Васильевич — д.б.н., в.н.с., ФИЦ «Институт цитологии и генетики СО РАН»

Федорова Оксана Ивановна — д.б.н., доцент, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии им. К.И. Скрябина

Харитонов Михаил Анатольевич — д.м.н., профессор, Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова

Царегородцев Анатолий Валерьевич — д.т.н., профессор, Московский государственный лингвистический университет redaktor3@nauteh.ru

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Общая биология

Егорова А.В., Выводцев Н.В. — Изучение инвазивного потенциала *Acer negundo* L. (sapindaceae) в растительных сообществах урбанизированной среды г. Хабаровска: анализ распространения и абиотических характеристик на экспериментальных площадках в бассейне р. Черная
Egorova A., Vyvodtsev N. — An investigation into the invasive potential of *Acer negundo* L. (sapindaceae) within plant communities of the urbanized environment of Khabarovsk: an analysis of its dispersal and abiotic characteristics on experimental plots in the Chernaya river basin7

Подвигина А.Д., Беляев А.Н., Беспалов А.Ф. — К изучению фауны гамазовых клещей (gamasoidea) мелких млекопитающих лесопарков города Казани
Podvigina A., Belyaev A., Bepalov A. — To study the fauna of gamasid mites (gamasoidea) of small mammals in the forest parks of the city of Kazan. ...12

Романова Д.А. — Половой диморфизм адаптационных реакций на соревновательные нагрузки спортсменов — полиатлонистов на этапах многолетней подготовки
Romanova D. — Sexual dimorphism of adaptive reactions to competitive loads in sportsmen at the stages of long-term training17

Романова Д.А. — Прогностическая значимость морфофункциональных показателей и эффективность методики целевой коррекции функционального состояния полиатлонистов в интервале между видами программы
Romanova D. — Prognostic significance of morphofunctional indicators and effectiveness of the technique of targeted correction of the functional state of polyathletes in the interval between program types.22

Харитонов А.Э., Макарова А.С. — Методологический подход к определению фитотолерантности к токсическому воздействию поллютантов с использованием гидропоники

Kharitonov A., Makarova A. — Methodological approach to determining phytotolerance to toxic pollutant impact using hydroponics.27

Информатика, вычислительная техника и управление

Адволоткин Д.И. — Некоторые подходы к построению моделей фрагментов железнодорожной сети с использованием графов
Advolotkin D. — Some approaches to building models of railway network fragments using graphs32

Аксенов С.Г. — Двухуровневая интеллектуальная гибридная система управления: интеграция классических алгоритмов и нечёткой логики для обеспечения устойчивости в условиях неопределённости
Aksenov S. — Two-level intelligent hybrid control system: integration of classical algorithms and fuzzy logic to ensure stability in the face of uncertainty.38

Аксенов С.Г. — Гибридный алгоритм динамического выбора управления: двухуровневая интеграция классических моделей и нечёткой логики на основе бинарных критериев
Aksenov S. — Hybrid dynamic control selection algorithm: two-level integration of classical models and fuzzy logic based on binary criteria42

Артамонов А.А. — Методика наполнения модели цифрового объекта из разнородных информационных ресурсов на основе количественной оценки эффективности методов извлечения данных
Artamonov A. — Methodology for populating a digital object model from heterogeneous information resources based on quantitative assessment of data extraction methods efficiency45

Архангельский А.А., Юхимук Р.А. — Модель надежности компьютерной системы тренажера, использующего дополненную виртуальную реальность

Arhangelsky A., Yukhimuk R. — A model of the reliability of the computer system of a simulator using augmented virtual reality51

Батчаев А.А. — Моделирование течений в канале электромембранной системы и способ повышения эффективности её работы

Batchaev A. — Modeling of flows in the channel of an electromembrane system and a method for increasing the efficiency of its operation56

Баязитов Ф.А. — Систематизация методов сжатия больших языковых моделей по фазе применения и характеру воздействия

Bayazitov F. — Систематизация методов сжатия больших языковых моделей по фазе применения и характеру воздействия59

Вербова М.А., Подольный В.А., Суворов С.В. — Гибридные алгоритмы коллаборативной фильтрации для рекомендации товарных групп на основе неоднородных пользовательских данных

Verbova M., Podolnyy V., Suvorov S. — Hybrid collaborative filtering algorithms for product group recommendations based on heterogeneous user data64

Горячкин Б.С., Савельев А.А., Фонин М.А., Лобанов Д.С. — Кластеризация зон когнитивной нагрузки пользователя по окуломоторным данным сессий просмотра графических структур

Goryachkin B., Savelyev A., Fonin M., Lobanov D. — Clustering of user cognitive load zones based on oculomotor data from graphical structure viewing sessions70

Дёмин В.Д., Ромашкова О.Н. — Метод детектирования и классификации аномалий в производственных данных на основе гибридных моделей глубокого обучения

Dyomin V., Romashkova O. — A hybrid deep learning method for anomaly detection in visual data of robotic production systems78

Елисеева В.Д., Косюра Н.А. — Разработка алгоритма предподготовки данных для подсистемы детектирования аномалий

Eliseeva V., Kosyura N. — Development of an algorithm for data pre-preparation for the anomaly detection subsystem85

Задорнов А.А., Юрчик П.Ф. — Трансформация процесса принятия решений в эпоху искусственного интеллекта

Zadornov A., Yurchik P. — Transformation of the decision-making process in the era of artificial intelligence93

Каранетян К.О., Никонов В.В. — О гибридной модели оценивания высшего образования с помощью технологий искусственного интеллекта

Karapetyan K., Nikonov V. — On a hybrid model for assessing higher education using artificial intelligence technologies99

Кармицкий К.С., Кузнецов А.С. — Функциональное моделирование интеллектуальной системы управления 3d-печатью

Karmitsky K., Kuznetsov A. — Functional modeling of an intelligent 3d printing control system 103

Кононов А.Н. — Методология трансформации legacy-монолита в микросервисную архитектуру: DDD-декомпозиция, ошибки и метрики успеха на стеке Java Spring

Kononov A. — Methodology for the transformation of legacy monolith into microservice architecture: DDD decomposition, errors, and success metrics on the Java Spring stack 110

Лобанов О.А. — Влияние задвоенности записей на качество информации в профессиональных системах

Lobanov O. — The impact of duplicate records on information quality in professional systems 116

Максименко Н.С. — Гибридные методы прогнозирования эволюции компонентной базы вычислительных систем на основе интеграции статистических и нейросетевых моделей

Maximenko N. — Hybrid methods for predicting the evolution of the component base of computer systems based on the integration of statistical and neural network models 119

Михайлов Д.В., Тарасьев А.А. — О выявлении волнового эффекта между региональными рынками недвижимости Российской Федерации

Mikhailov D., Tarasyev A. — On identifying the wave effect between regional real estate markets of the Russian Federation 127

Мунтян Н.В. — Оптимизация затрат на вычислительные ресурсы <i>Muntian N.</i> — Optimizing the cost of computing resources. 136	Шакиров К.Ф. — Исследование эффективности методов обработки дисбаланса данных на синтетических наборах <i>Shakirov K.</i> — Investigation of the effectiveness of data imbalance processing methods on synthetic datasets. 171
Откидач И.И. — Методология анализа системных вызовов в операционной системе Linux средствами strace <i>Otkidach I.</i> — Methodology for analyzing system calls in the Linux operating system using strace .. 140	Шалобанов С.В., Шалобанов С.С. — Поиск неисправного блока в динамических системах класса автоматического управления с использованием дифференциальной весовой функции <i>Shalobanov S., Shalobanov S.</i> — Search for a faulty block in dynamic systems of the automatic control class using a differential weighting function. 175
Потапенко А.В. — Системный анализ как средство принятия решений в управлении безопасностью объектов критической информационной инфраструктуры финансового сектора <i>Potapenko A.</i> — Systems analysis as a decision-making tool in security management of critical information infrastructure objects in the financial sector 147	Юшкин В.Н., Марченко С.С., Стрижакова Е.А., Пенькова Р.И. — Разработка статистической модели управления рейтингами в соревновательных процессах с использованием соотношения показателей эффективности <i>Yushkin V., Marchenko S., Strizhakova E., Penkova R.</i> — Development of a statistical model for rating management in competitive processes using the ratio of performance indicators 179
Стручкова А.М. — Теоретические основы применения нейросетей для диагностирования повреждений авиационной техники в условиях крайнего севера <i>Struchkova A.</i> — Theoretical basis of the use of neural networks for diagnosing damage to aircraft equipment in the far north. 151	Клиническая медицина
Токин Г.М., Кузнецов С.Ф., Желялева Д.Р. — Моделирование и оптимизация ферритового полоскового циркулятора для СВЧ-приложений <i>Tokin G., Kuznetsov S., Zhelyaleva D.</i> — Modeling and optimization of a ferrite stripline circulator for microwave applications. 158	Алиев Н.А., Шамилова С.Г., Бурдюков М.С. — Киста или опухоль головки поджелудочной железы? Спонтанная ЭУС-тонкоигольная пункция объемного образования головки поджелудочной железы для морфологической верификации. Описание клинического случая <i>Aliyev N., Shamilova S., Burdyukov M.</i> — Cyst or tumor of the pancreatic head? Spontaneous EUS-fine-needle puncture of a mass lesion of the pancreatic head for morphological verification. Description of a clinical case. 185
Хакимова З.Н. — Об интегрировании одного четырёхпараметрического класса дробно-полиномиальных обыкновенных дифференциальных уравнений <i>Khakimova Z.</i> — On the integration of one four-parameter class of fractional-polynomial ordinary differential equations. 163	Ахмедова С.Р., Омаров Н.С. — Прогностическая модель индивидуального успеха эко у пациенток с эндометриозом на основе клинико-лабораторных маркеров <i>Ahmedova S., Omarov N.</i> — Prognostic model of individual IVF success in patients with endometriosis based on clinical and laboratory markers. 189
Черепанов Н.В. — Возможности организации процесса согласования документов в компании на основе методов нейронных сетей <i>Cherepanov N.</i> — Possibilities of organizing the process of document approval in a company based on neural network methods 167	Болгов Д.Ю., Кузнецов Д.С., Кузнецов С.И., Мурадян И.Ф. — Изменение эндотелий-зависимой вазодилатации (ЭЗВД) у пациентов с ИБС, на фоне перенесённой новой коронавирусной инфекции (COVID 19)

Bolgov D., Kuznetsov D., Kuznetsov S., Muradyan I. — Changes in endothelium-dependent vasodilation (EDVD) in patients with ischemic heart disease (IHD) against the background of a transferred new coronavirus infection (COVID-19). 195

Ичмелян А.М., Богдасаров А.Ю., Давидян Л.Ю. — Влияние мелатонина на репродуктивную функцию женщин (Обзор литературы)
Ichmelyan A., Bogdasarov A., Davidyany L. — The Effect of Melatonin on Female Reproductive Function (Literature Review) 199

Султанова О.Э., Чернышева Е.Н., Джаалали Уаиль, Наамун Даллель, Трабелси Шаима, Герби Салман, Руис Хауа Джохар — Алгоритм ведения пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями на фоне дисплазии соединительной ткани и сопутствующими депрессивными расстройствами
Sultanova O., Chernysheva E., Djaalali Wail, Naamun Dallel, Trabelsi Shaima, Herbi Salman, Ruis Hawa Johar — Management algorithm for patients with cardiovascular diseases associated with connective tissue dysplasia and concomitant depressive disorders. 205

Султанова О.Э., Чернышева Е.Н., Прокопенко Н.А., Печеров А.А., Ходжа Шурук, Манал Шеддира — Гендерные особенности влияния гомоцистеина на риск возникновения острого коронарного синдрома у пациентов с синдромом недифференцированной дисплазии соединительной ткани
Sultanova O., Chernysheva E., Prokopenko N., Pecherov A., Khojha Shuruk, Manal Sheddura — Gender-specific effects of homocysteine on the risk of acute coronary syndrome in patients with undifferentiated connective tissue dysplasia syndrome 211

Хафизова Ф.А., Кузьмина К.Ю., Силантьева Е.Н. — Применение цифровых технологий для эффективной диагностики, лечения и профилактики осложнений стоматологических заболеваний
Hafizova F., Kuzmina K., Silantieva E. — Application of digital technologies for effective diagnostics, treatment, and prevention of complications of dental diseases. 216

Наши авторы 224

ИЗУЧЕНИЕ ИНВАЗИВНОГО ПОТЕНЦИАЛА ACER NEGUNDO L. (SAPINDACEAE) В РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВАХ УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЫ Г. ХАБАРОВСКА: АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И АБИОТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПЛОЩАДКАХ В БАССЕЙНЕ Р. ЧЕРНАЯ

**AN INVESTIGATION INTO THE INVASIVE
POTENTIAL OF ACER NEGUNDO L.
(SAPINDACEAE) WITHIN PLANT
COMMUNITIES OF THE URBANIZED
ENVIRONMENT OF Khabarovsk:
AN ANALYSIS OF ITS DISPERSAL
AND ABIOTIC CHARACTERISTICS
ON EXPERIMENTAL PLOTS
IN THE CHERNAYA RIVER BASIN**

**A. Egorova
N. Vyvadtsev**

Summary. An investigation conducted in the Railway District of Khabarovsk City revealed a high incidence of *Acer negundo* L., identified as an invasive species. To quantitatively assess the distribution of *A. negundo*, a population inventory was performed on four experimental plots. The inventory results demonstrated a significant density of saplings and mature individuals, characterized by varying degrees of trunk inclination, and the presence of polycaudal specimens forming a dense understory layer. These morphological and demographic characteristics indicate successful naturalization and active expansion of *A. negundo* in local biotopes. A weak differentiation in sexual dimorphism was observed, with a slight dominance of male individuals. The encounter characteristics of the species are defined by the formation of monodominant communities, influencing biodiversity and the structure of native phytocenoses. Given the potential negative impact of *Acer negundo* L. on the local flora, it is advisable to conduct systematic monitoring of the species distribution and develop comprehensive strategies for controlling its population.

Keywords: *Acer negundo*, invasive species, stand inventory, experimental plots, urban environment, secondary area.

Егорова Анна Викторовна

Аспирант, ФГБОУ ВО Тихоокеанский
государственный университет, г. Хабаровск
lapatina_anna@mail.ru

Выводцев Николай Васильевич

Доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
ФГБОУ ВО Тихоокеанский государственный
университет, г. Хабаровск

Аннотация. В рамках исследования, проводимого в Железнодорожном районе г. Хабаровска, зафиксирована высокая частота встречаемости *Acer negundo* L., классифицируемого как инвазивный вид. С целью количественной оценки распространения *A. negundo* была проведена инвентаризация популяций на четырех экспериментальных площадках. Результаты инвентаризации продемонстрировали значительную плотность поросли и зрелых особей, характеризующихся различной степенью наклона стволов, а также наличие поликаудексных экземпляров, формирующих плотный подлесочный ярус. Данные морфологические и демографические характеристики свидетельствуют об успешной натурализации и активной экспансии *A. negundo* в локальных биотопах. Отмечена слабая дифференциация по половому диморфизму, с незначительным доминированием мужских особей. Характер встречаемости вида определяется как образование монодоминантных сообществ, оказывающих влияние на биоразнообразие и структуру аборигенных фитоценозов. Учитывая потенциальное негативное воздействие *Acer negundo* L. на местную флору, представляется целесообразным проведение систематического мониторинга распространения вида и разработка комплексных стратегий контроля его популяции.

Ключевые слова: *Acer negundo*, инвазивный вид, урбанизированная среда, распространение, абиотические факторы, растительные сообщества, Хабаровск.

Аcer negundo L. (Sapindaceae Juss.) идентифицируется как один из доминантных древесных инвазивных видов, характеризующийся широкой географической распространенностью [2], [3]. Изначально эндемичный для восточной части Северной Америки, вид в настоящее время интродуцирован в глобальном масштабе, охватывая все континенты, включая Северную и Южную Америку, Евразию, Австралию и Африку, что привело к формированию обширного вторичного ареала [4], [7]. Экологическая пластичность *Acer negundo* обуславливает его инвазионный потенциал в различных регионах вторичного ареала, с предпочтением к прибрежным и антропогенно нарушенным территориям. В Российской Федерации *Acer negundo* проявляет выраженные инвазионные характеристики, определяемые как один из ста наиболее опасных инвазивных видов и зафиксированные в региональных «черных книгах», документирующих негативное воздействие на местные экосистемы [5], [6]. Несмотря на широкое использование *Acer negundo* L. в урбанизированном озеленении г. Хабаровска, научные публикации, посвященные анализу его распространения и регенерации в городских экосистемах, ограничены [15]. В связи с вышеизложенным, инициировано настоящее исследование, направленное на установление количественных и качественных параметров, описывающих биологические особенности вида в условиях городской среды. В населенных пунктах, вследствие недостаточного уровня агротехнического обслуживания и контроля, *Acer negundo* L. формирует линейные насаждения шириной от 1 до 7 метров вдоль дорожных коммуникаций [7], что свидетельствует об экспансивном характере вида и потенциальной угрозе биоразнообразию урбанизированных экосистем [16].

Материалы и методы

В период с апреля по июнь были отобраны и детально охарактеризованы четыре временных экспериментальных площадки, локализованные в бассейне реки Черная, Железнодорожный район. Координатное определение местоположения и измерение пространственных параметров осуществлялось с использованием геоинформационных систем (ГИС) Google Maps. Пространственное распределение *Acer negundo* L. на каждой экспериментальной площадке было зафиксировано и картографировано с указанием геопространственных координат.

Результаты и обсуждение

Представлено детальное описание четырех экспериментальных площадок, предназначенных для изучения *Acer negundo* L. Первый участок, с площадью 7 га, расположен в зоне пересечения улиц Машинистов и Геодезическая. Инвентаризация древесной растительности проводилась как вдоль магистральных коммуникаций, так и на прилегающих внутридворовых территориях. Ви-

зуальный анализ картографических данных (Рис. 1) демонстрирует наличие 134 экземпляров *Acer negundo* L., достигающих высоты 5–8 м. Отмечено значительное количество регенеративного подроста, свидетельствующего о высокой репродуктивной способности вида. Доля ортотропных деревьев с доминирующим стволом составила 8,9 % от общего числа учтенных особей. Морфологически преобладают поликаудексные экземпляры, произрастающие под углом к горизонтальной поверхности.



Рис. 1. Распространение *Acer negundo* L. на первом участке исследования (пересечение улиц Машинистов и Геодезической)

Второй участок обследования (площадью 1,25 га), локализован в границах улиц Машинистов и территории стадиона КГБ ПОУ ХТТТ. Инвентаризация древесных насаждений осуществлялась на внутридворовой территории и по периметру стадиона. Результаты учета (Рис. 2) показали, что общее количество *Acer negundo* L. составило 75 экземпляров. Высота исследуемых деревьев достигала 5–8 м. Отмечено наличие обильного подроста. Морфологической особенностью популяции является преобладание многоствольных экземпляров, демонстрирующих наклонный рост относительно поверхности почвы.



Рис. 2. Результаты исследования, демонстрирующие наличие *Acer negundo* L. на втором участке (улица Машинистов, прилегающая к стадиону КГБ ПОУ ХТТТ)

На участке пересечения ул. Машинистов и пер. Клубный, вдоль дорожного полотна, зафиксировано произрастание *Acer negundo* L. в количестве 86 экземпляров (Рис. 3). Высота преобладающей части деревьев варьи-

рует в диапазоне 5–8 метров. Отмечено наличие трех моноствольных экземпляров, достигающих высоты 9 метров. Характерной особенностью популяции является обильный подрост. Подавляющее большинство учтенных деревьев демонстрирует многоствольность и произрастает с наклоном относительно поверхности почвы.



Рис. 3. Обнаружение *Acer negundo* L. на третьем участке исследования (пересечение улиц Машинистов и Клубного переулка)

На четвертом учетном участке, расположенном на пересечении пер. Клубный и пер. Школьного, вдоль дорожного полотна зафиксировано 56 экземпляров *Acer negundo* L., достигающих высоты 5–8 метров (Рис. 4). Отмечено значительное количество подроста. Характерной особенностью популяции является многостволь-

ность всех учтенных экземпляров и наклонный рост стволов относительно поверхности почвы, что может быть обусловлено геоботаническими особенностями местности или воздействием антропогенных факторов.



Рис. 4. Распространение *Acer negundo* L. на четвертом участке (пересечение пер. Клубный и пер. Школьного)

Выводы

Картографические данные (Рис. 5) демонстрируют высокую частоту встречаемости *Acer negundo* L. на исследуемой территории.

Способность *A. negundo* к формированию вторичных сообществ совместно с аборигенными видами на территориях с нарушенным почвенным покровом (например, после строительных работ или квазипожар-



Рис. 5. Карта распространения *Acer negundo* L. на пробных участках в бассейне р. Черная

ных поражений) указывает на потенциал к дальнейшему географическому расширению и постепенной инвазии в аборигенные растительные ассоциации [1], [8], [11]. Представленные наблюдения согласуются с выводами ряда исследователей, отмечающих высокую инвазивность *A. negundo* в различных географических регионах, что подчеркивает актуальность дальнейшего мониторинга и анализа распространения данного вида на территории г. Хабаровска с целью разработки эффективных стратегий контроля и минимизации его негативного влияния на местные экосистемы.

Расширенный анализ регенеративной способности *Acer negundo* L. на экспериментальных площадках выявил существенные различия в плотности поросли, коррелирующие с уровнем антропогенной нагрузки и структурными особенностями фитоценозов. В частности, на участках, прилегающих к транспортным магистралям, отмечена повышенная концентрация проростков и ювенильных особей, что, вероятно, обусловлено нарушением почвенного покрова и повышенной освещенностью. В то же время, во внутривидовых насаждениях, характеризующихся высокой сомкнутостью крон, регенерация *A. negundo* протекает менее интенсивно, что указывает на конкурентные взаимоотношения с аборигенными видами за ресурсы [13], [14].

Проведенные исследования позволили установить, что распределение *A. negundo* в бассейне р. Черная носит кластерный характер, с образованием монодоминантных участков, особенно в местах деградации есте-

ственной растительности. На таких участках *A. negundo* проявляет высокую конкурентоспособность, подавляя рост других видов и изменяя структуру почвенного покрова. Анализ морфометрических параметров деревьев выявил значительную вариабельность по показателям высоты, диаметра ствола и степени наклона, что свидетельствует об адаптации вида к различным экологическим условиям.

В рамках исследования также была предпринята попытка оценить вклад *A. negundo* в изменение биохимических характеристик почв. Предварительные данные свидетельствуют о том, что присутствие *A. negundo* приводит к увеличению концентрации органического вещества и изменению pH почвенного раствора [18]. Однако, для более детального изучения этого аспекта требуются дополнительные исследования с применением методов почвенного анализа и моделирования.

Полученные результаты подчеркивают необходимость разработки комплексных стратегий по контролю за распространением *A. negundo* в урбанизированной среде г. Хабаровска. Данные стратегии должны включать мониторинг популяций, ограничение распространения, восстановление аборигенных фитоценозов и повышение экологического сознания населения. Эффективная реализация данных мер позволит минимизировать негативное воздействие инвазивного вида на местные экосистемы и сохранить биоразнообразие урбанизированных территорий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонова Л.А. Инвазионный компонент флоры Хабаровского края // Рос. журн. биологических инвазий, 2012. № 4. С. 2–9.
2. Антонова Л.А. Спонтанное расселение интродуцированных деревьев и кустарников в Хабаровском крае // Охрана и рациональное использование лесных ресурсов. Материалы VI Междунар. форума, Благовещенск — Хэйхэ — Харбин, 10–17 июня 2013 г. Благовещенск — Хэйхэ — Харбин: Изд-во ДальГАУ, 2013. С. 38–43.
3. Виноградова Ю.К., Галкина М.А., Котенко О.В., Тохтарь В.К., Зеленкова В.Н., Курской А.Ю. Расселение клена ясенелистного *Acer negundo* L. вдоль Транссибирской магистрали // Вестник Тверского государственного университета. Серия «Биология и экология». — 2022. — № 2 (66). — С. 100–101. DOI: 10.26456/vtbio256.
4. Виноградова Ю.К., Майоров С.Р., Хорун Л.В. Черная книга флоры Средней России: чужеродные виды растений в экосистемах Средней России. М.: ГЕОС, 2010. 512 с.
5. Виноградова Ю.К., Майоров С.Р., Нотов А.А. Черная книга флоры Тверской области: чужеродные виды растений в экосистемах Тверского региона. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2011. 279 с.
6. Ермолова А.С. Состояние, рост и ресурсный потенциал насаждений тополя белого в поймах рек степного Придонья: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук. — Пушкино, 2016.
7. Дгебуадзе Ю.Ю., Петросян В.Г., Хляп Л.А. Самые опасные инвазионные виды России (ТОП-100) / под ред. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018. 688 с.
8. Дубровин Д.И., Крупина Д.П. Эффект сомкнутости крон инвазивного *Acer negundo* L. на плотность видов и обилие трав в урбанизированных сообществах // Наука, природа и общество. Материалы Всерос. науч. конф., посвященной 100-летию Ильменского государственного заповедника, 100-летию со дня рождения академика П.Л. Горчаковского и 70-летию со дня рождения минералога В.О. Полякова, Миасс, 10–14 мая 2020 года. Миасс: Ильменский государственный заповедник, 2020. С. 58–62.
9. Ильичев В.А. Биосферная совместимость — принцип, позволяющий построить парадигму жизни в гармонии с планетой Земля // Научно-технический журнал. — 2013. — № 1. — С. 4.
10. Коляда Н.А. Древесные растения селитебных территорий г. Уссурийска (Приморский край) // Астраханский вестник экологического образования. — 2018. — № 1 (43). — С. 190–199.

11. Коляда Н.А. К уточнению границ вторичных ареалов североамериканских потенциально инвазионных видов древесных растений на юге Дальнего Востока России // Сибирский лесной журнал. — 2021. — № 1. — С. 68–76.
12. Коляда Н.А. Формирование монодоминантных сообществ клена ясенелистного (*Acer negundo* L.) на юге Дальнего Востока России / Н.А. Коляда // Лесной вестник. — 2022. — № 2. — С. 14–23.
13. Костина М.В., Минькова, Н.О., Ясинская, О.И. О биологии клёна ясенелистного в зелёных насаждениях Москвы / М.В. Костина, Н.О. Минькова, О.И. Ясинская // Российский Журнал Биологических Инвазий. — 2013. — № 4. — С. 32–43.
14. Котова Л.А. Эколого-биологические особенности вида клён ясенелистный (*Acer negundo* L.), произрастающего в г. Витебске // Молодежь XXI века: образование, наука, инновации : материалы XI международной конференции аспирантов и молодых ученых, Витебск, 6 декабря 2024 г. / Ви-теб. гос. ун-т; редкол.: Е.Я. Аршанский (гл. ред.) [и др.]. — Витебск: ВГУ имени П.М. Машерова, 2024. — URL: <https://rep.vsu.by/handle/123456789/45577> (дата обращения: 10.03.2025). — Текст: электронный.
15. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Фитоинвазии: остановить нельзя сдаваться / под ред. В.В. Чуб. — М.: Издательство Московского университета, 2022.
16. Панасенко Н.Н. Роль инвазионных растений в современных процессах преобразования растительного покрова: Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук. — Брянск, 2021.
17. Ситников М.А., Онистратенко Н.В. Основные экологически значимые метаболиты клена ясенелистного *Acer negundo* и его аллелопатическая роль в пойменной экосистеме // Антропогенная трансформация геопространства: природа, хозяйство, общество: Материалы V Междунар. науч.-практ. конф. Волгоград, 01–04 октября 2019 г. Волгоград: Изд-во Волгоградского гос. ун-та, 2010. С. 121–126.
18. Стародубцева Е.А., Морозова О.В., Григорьевская А.Я. Материалы к «Черной книге Воронежской области» // Рос. журн. биологических инвазий, 2014. № 2. С. 133–149 [16] Черная книга флоры Сибири / под ред. Ю.К. Виноградовой, А.Н. Куприянова. Новосибирск: Гео, 2016. 439 с
19. Ступникова Т.В., Косицына О.А., Козлова А.Б. Количественное участие представителей арборифлоры в различных типах насаждений Благовещенска (Амурская область) // Электронный научно-производственный журнал «АгроЭкоИнфо».
20. Тупицына Л.С., Иноземцева А.С., Тупицын С.С. Развитие крылаток клена ясенелистного (*Acer negundo* L.) в условиях г. Тюмени // Электронный научно-производственный журнал «АгроЭкоИнфо».
21. Урбоэкосистемы: проблемы и перспективы развития: материалы V научно-практической конференции / отв. ред. Н.Н. Никитина. — Ишим: Изд-во ИГПИ им. П.П. Ершова, 2010. — вып. 5. — 350 с. ISBN-978-5-91307-109-5.
22. Шапилов А.С. Американская белая бабочка и система защитных мероприятий в очагах ее массового размножения: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук. — Москва, 2011.
23. Шамшиев Б.Н., Абсатаров Р.Р., Маметова К.К. Анализ видовового состава древесно-кустарниковых пород, их роль в структуре городских парков г. Ош // Бюллетень науки и практики. — 2024. — Т. 10. — № 8. — С. 123–124. — DOI: 10.33619/2414-2948/105.
24. Экология урбанизированных территорий: материалы российско-китайской конференции. (Брянск, 25–27 мая 2017 г.) / Брян. гос. инженер.-технол. ун-т. — Брянск, 2017. — 191 с.

© Егорова Анна Викторовна (lapatina_anna@mail.ru); Выводцев Николай Васильевич
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

К ИЗУЧЕНИЮ ФАУНЫ ГАМАЗОВЫХ КЛЕЩЕЙ (GAMASOIDEA) МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ ЛЕСОПАРКОВ ГОРОДА КАЗАНИ

TO STUDY THE FAUNA OF GAMASID MITES (GAMASOIDEA) OF SMALL MAMMALS IN THE FOREST PARKS OF THE CITY OF KAZAN

**A. Podvigina
A. Belyaev
A. Bepalov**

Summary. Two forest parks of the city of Kazan were examined. Small mammals (rodents and insectivores) belonging to 5 species were captured. Seven species of gamasid mites were collected from mammals. The largest number of mite species (6 species) was found in the bank vole.

Keywords: gamasid mites, ectoparasites, small mammals, fauna.

Подвигина Анастасия Денисовна

аспирант,

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Беляев Александр Николаевич

заведующий музеем,

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Беспалов Александр Федорович

кандидат биологических наук, доцент,

Казанский (Приволжский) федеральный университет

kerwood@mail.ru

Аннотация. Обследовано два лесопарка города Казани. Видовой состав мелких млекопитающих представлен 5 видами грызунов и насекомоядных. С млекопитающих собраны гамазовые клещи 7 видов. Наибольшее количество видов гамазид (6 видов) было обнаружено на рыжей полевке.

Ключевые слова: гамазовые клещи, эктопаразиты, мелкие млекопитающие, фауна.

Гамазовые клещи (Gamasoidea) — эктопаразиты, которые питаются кровью теплокровных животных, включая мелких млекопитающих, таких как грызуны и насекомоядные. Клещи преимущественно ведут гнездово-норный образ жизни, так как норы и укрытия животных создают для них благоприятные условия для жизни и размножения. Хотя большинство видов гамазид обладают полифагией, то есть могут паразитировать на различных видах хозяев, некоторые из них имеют более узкую специализацию и связаны с определёнными видами млекопитающих [1].

Гамазовые клещи играют значительную роль в эпидемиологической ситуации, так как тесно связаны с мелкими млекопитающими, которые нередко являются переносчиками зоонозных инфекций. Эти клещи могут быть важными носителями возбудителей заболеваний, таких как туляремия, клещевой энцефалит, геморрагическая лихорадка и других опасных болезней. Риск заражения повышается в зонах активного отдыха, например, в лесопарках крупных городов, где контакт человека с потенциально опасными паразитами наиболее вероятен. Поэтому регулярный мониторинг фауны мелких млекопитающих и их эктопаразитов, включая гамазид, является ключевым для оценки эпидемиологической ситуации в таких местах [2].

Первая фаунистическая сводка по гамазовым клещам микромаммалий Республики Татарстан была опубликована Нефедовым В.Н. (1957). В ней содержится

список 40 видов гамазид из 9 семейств [3]. Кулаева Т.М. (1958) сообщила о 10 видах гамазид с рыжих полевок, отловленных в лесах Волжско-Камского государственного заповедника [4]. К 2011 году было описано 26 видов кровососущих гамазид на территории г. Казань [2].

В изучении экологии гамазовых клещей особое внимание привлекает их сезонная активность и особенности паразитирования. Некоторые виды клещей сохраняют активность в течение всего года, в то время как другие достигают пиковых чисел в весенний или осенний периоды. Отмеченные особенности делают гамазид неотъемлемой частью биоценозов, гнездо-норовых паразитов мелких млекопитающих и подчеркивают важность регулярного мониторинга их численности и распространения, что способствует лучшему пониманию их экологии и той роли, которую они играют в экосистемах [5].

Материалы и методы

Исследования проводились в двух лесопарках города Казани: «Дубравная» (2019–2021 гг.) и «Горкинско-Ометьевский» (2020–2022 гг.). Для отлова мелких млекопитающих использовался метод ловушко-линий с 50 ловушками, выставляемых с интервалом 5 метров на две ночи. В качестве приманки использовались кусочки хлеба, обжаренные на подсолнечном масле. Все собранные клещи фиксировались в 70 % спирте. Определение гамазовых клещей осуществлялось по работам Н.Г. Брегетовой, 1956, Н.А. Никулиной, 2004 [1, 6]. Систе-

матика гамазовых клещей приведена по работе Никулиной, 2006 [5].

За 4 года исследований было проведено 1450 ловушко-ночей, из которых было отловлено и осмотрено 339 особей мелких млекопитающих. 257 из них были заражены паразитическими членистоногими. Среди собранных эктопаразитов было 478 гамазовых клещей, а также 599 личинок гамазид.

Лесопарки на юго-востоке Казани играют важную роль в городской экосистеме. Лесопарк «Горкинско-Ометьевский» занимает площадь около 80 гектаров и находится в густо застроенном районе города, в то время как «Дубравная» значительно более обширен, с площадью около 350 гектаров, и располагается на границе города, примыкая к природным территориям.

Основу древесного покрова составляют преимущественно лиственные породы: липа сердцевидная, береза повислая, осина, дуб, вяз и клен остролистный. В подлеске можно встретить подрост липы и клена, а также такие виды, как лещина, бересклет бородавчатый и черемуха. Травяной покров отличается значительным развитием и представлен в основном снытью обыкновенной, осоклой волосистой и пролесником многолетним.

Согласно зональному разделению территории города, изложенному в монографии [2], лесопарк «Горкинско-Ометьевский» относится к импактной зоне, тогда как лесопарк «Дубрава» входит в буферную зону.

Результаты и обсуждение

Фауна мелких млекопитающих, с которых были собраны гамазовые клещи (Gamasoidea) в исследуемых

лесопарках Казани, включала 5 видов: обыкновенная бурозубка (*Sorex araneus* Linnaeus, 1758), европейская рыжая полевка (*Myodes glareolus* Schreber, 1780), малая лесная мышь (*Sylvaemus uralensis* Pallas, 1811), желтогорлая мышь (*Sylvaemus flavicollis* Melchior, 1834) и обыкновенная полевка (*Microtus arvalis sensu lato*).

В лесопарке «Дубравная» рыжая полевка — доминирующий среди мелких млекопитающих вид. В разные годы исследования ее численность составляла 46–85,5 % от всего населения. Это важно, поскольку, вид имеет значительное эпидемиологическое значение в регионе. Малая лесная и желтогорлая мыши составляют от 10 % до 30 % от общей численности пойманных особей. Исключение составил 2020 год, когда у желтогорлой мыши наблюдалась низкая численность и в структуре сообщества мелких млекопитающих она составляла менее 2 %. Численность обыкновенной бурозубки не превышала 3 % от общего числа мелких млекопитающих.

В «Горкинско-Ометьевском» лесопарке основу населения мелких млекопитающих составляли два вида: малая лесная мышь и рыжая полевка. Их численность была близка по уровню, однако, в 2020 году доминировала малая лесная мышь, а в 2021 году — рыжая полевка. Обыкновенная полевка представлена в отловах единичными экземплярами.

Фауна гамазовых клещей мелких млекопитающих обследованных лесопарков, включала 7 видов: *Haemogamasus nidi*, *Haemolaelaps casalis*, *Haemolaelaps glasgowi*, *Laelaps agilis*, *Eulaelaps stabularis*, *Hirstionyssus isabellinus* и *Myonissus rossicus* (таблица 1). Все виды были зарегистрированы как в лесопарке «Дубравная», так и в «Горкинско-Ометьевском» лесопарке, что свидетельствует об их адаптивных способностях и схожести эколо-

Таблица 1.

Фауна и население гамазовых клещей лесопарков Казани

	Лесопарк Дубравная			Лесопарк Горкинско-Ометьевский		
	Полевка рыжая n=160	Мышь малая лесная n=45	Мышь желтогорлая n=35	Полевка рыжая n=59	Мышь малая лесная n=35	Полевка обыкновенная n=2
<i>Haemolaelaps casalis</i>	16 (0,1)	2 (0,04)	5 (0,14)	8 (0,14)	3 (0,09)	1 (0,5)
<i>Laelaps agilis</i>	8 (0,05)	14 (0,31)	59 (1,69)	9 (0,15)	3 (0,09)	37 (18,5)
<i>Eulaelaps stabularis</i>	19 (0,12)			4 (0,07)	4 (0,11)	
<i>Haemolaelaps glasgowi</i>	13 (0,08)	10 (0,22)	11 (0,31)	16 (0,27)	7 (0,2)	
<i>Hirstionyssus isabellinus</i>	2 (0,01)	3 (0,07)		1 (0,02)		
<i>Haemogamasus nidi</i>	126 (0,79)	14 (0,31)	12 (0,34)	35 (0,59)	6 (0,17)	4 (2)
<i>Myonissus rossicus</i>	13 (0,08)	3 (0,07)	6 (0,17)	2 (0,03)	2 (0,06)	

Примечание: в скобках указан индекс обилия; обыкновенная бурозубка не включена в таблицу, ввиду отсутствия на ней гамазид

гических условий двух территорий. Также было собрано 599 личинок гамазид, без определения до вида.

Несмотря на общность видового состава гамазид, их численность и распределение варьировали в зависимости от характеристик местности и видовой структуры сообщества мелких млекопитающих.

Сем. Laelaptidae Berl., 1892

Род *Laelaps* C.L.Koch, 1836

Laelaps agilis Koch, 1836 (130 экз., 27 %) — облигатный гематофаг, неспособный прокалывать кожу млекопитающих, поэтому использует ссадины, ранки или тонкую кожу новорожденных зверьков. *Laelaps agilis* является переносчиком лимфоцитарного хориоменингита и может заражаться туляремией. Распространён в лесной зоне Западной Палеарктики, постепенно проникая в лесостепные регионы и расширяя ареал. Встречается с умеренной частотой, преимущественно на рыжей полевке и малой лесной мыши, реже — на обыкновенной полевке и желтогорлой мыши [5, 7, 8, 9].

В наших сборах заметно преобладает на желтогорлой мыши и обыкновенной полевке. Индекс обилия (далее ИО) на этих видах 1,69 и 18,5 соответственно, экстенсивность инвазии — 51 % и 67 %. Остальные виды грызунов были заражены в меньшем количестве, ИО менее 0.31.

Род *Haemolaelaps* Berlese, 1910

Haemolaelaps glasgowi Ewing, 1925 (57 экз., 11,9 %) — экологически вид тесно связан с гнездовыми биотопами мелких млекопитающих, где достигает высокой численности. Основными прокормителями служат полёвки, но в условиях длительного голода возможны нападения на человека, отличающиеся безболезненностью. Уникальная способность к лимфофагии и лабораторно доказанная векторная роль подчеркивают его медицинскую значимость. Клещ является важным звеном в циркуляции возбудителей туляремии, клещевого энцефалита, геморрагической лихорадки и лихорадки Ку. Его ареал простирается на всю территорию России и сопредельных стран, а в дельте Волги он становится одним из самых массовых видов в гнездах грызунов. [7, 8, 9].

В наших сборах *H. glasgowi* демонстрировал высокую численность в 2021 году, особенно на рыжей полевке. ИО на данном хозяине достиг 1.09, индекс прокормления (далее ИП) — 6.0, а индекс встречаемости (далее ИВ) составил 0.27. В тот же период на желтогорлой мыши значения были еще выше: ИО — 2.0, ИП — 3.4, ИВ — 0.8. В другие годы и на других хозяевах показатели были существенно ниже: ИО не превышал 0.3, ИП — 1.5, а ИВ — 0.2.

Haemolaelaps (A.) casalis Berl., 1887 (35 экз., 7,3 %) — в фауне Татарстана этот вид ассоциирован преимущественно с рыжей и обыкновенной полёвками, чьи гнёзда служат для него основной средой обитания. Реже в роли хозяев выступают лесная и желтогорлая мыши. Вид демонстрирует способность к спонтанному носительству риккетсий, а также патогенов, вызывающих клещевой сыпной тиф. Помимо этого, в организме клеща может персистировать вирус клещевого энцефалита на протяжении трёх суток [7, 8, 9].

В наших сборах *H. casalis* достигал наибольшей численности на рыжей полевке в 2021 году. ИО на данном хозяине составил 1.29, ИП — 2.97, а ИВ — 0.57. На желтогорлой и малой лесной мышах в тот же период показатели были значительно ниже: ИО не превышал 0.67, ИП — 1.02, а ИВ — 0.4. В другие годы зараженность этим видом клеща на всех хозяевах была минимальной, с ИО менее 0.09 и ИВ не более 0.06.

Род *Eulaelaps* Berlese, 1903

Eulaelaps stabularis Koch, 1836 (27 экз., 5,7 %) — факультативный гематофаг, сочетающий кровососание с зоофагией, некрофагией, схизофагией и каннибализмом, а также способный нападать на личинок иксодовых клещей. Вид способен сохранять вирус клещевого энцефалита до 18 дней, также из его суспензии были выделены штаммы риккетсий Бернета. Является широкоспецифичным паразитом, инфицирующим около 60 видов хозяев, среди которых — рыжая, водяная, обыкновенная и узкочерепная полёвки, полёвка-экономка, лесная и домовая мыши, серая крыса, обыкновенная буроzubка. Вид не имеет строгой привязанности к конкретной группе животных, но чаще встречается на массовых грызунах, таких как рыжая и обыкновенная полёвки. Распространён повсеместно в России и сопредельных странах. Переносит туляремию, клещевой энцефалит, лихорадку Ку, лептоспироз и бруцеллёз [5, 7, 8, 9].

В наших сборах *E. stabularis* зарегистрирован преимущественно на рыжей полевке. Пик зараженности пришелся на 2020 год, когда на этом хозяине отмечены максимальные значения индексов: ИО — 0.19, ИП — 1.25, ИВ — 0.15. На малой лесной мыши вид был отмечен лишь эпизодически и в небольших количествах (максимальный ИО — 0.23 в 2020 г. в Горкинско-Ометьевском лесу). На других видах хозяев, таких как желтогорлая мышь, данный вид клеща не зарегистрирован.

Род *Haemogamasus* Berlese, 1889

Haemogamasus nidi Michael, 1892 (197 экз., 41,2 %) — данный вид гамазовых клещей повсеместно доминирует в сообществах европейского региона России. Его трофическая стратегия отличается исключительной пластично-

стью, сочетая факультативный гематофагизм с активной зоофагией, схизофагией, некрофагией и внутривидовым каннибализмом, что определяет его значительную конкурентную роль в межвидовых и межродовых взаимодействиях. В качестве хозяев клещ демонстрирует низкую степень избирательности, паразитируя на различных видах мышевидных грызунов, среди которых доминирующее положение занимают рыжая и обыкновенная полевки, а также лесная и полевая мыши. Медико-эпидемиологическая значимость вида подтверждается его компетентностью как переносчика возбудителей целого ряда природно-очаговых болезней. Экспериментально доказана возможность инфицирования риккетсиями Бернета при питании на лабораторных и диких животных с последующей трансвариальной передачей и инокуляцией патогена. В естественных условиях у клеща зарегистрировано спонтанное носительство вируса клещевого энцефалита, выделены культуры возбудителя туляремии. Существуют научные предпосылки, позволяющие предполагать его участие в циркуляции возбудителей лихорадки Ку и лимфоцитарного хориоменингита. Ареал вида охватывает обширные территории, включая Новгородскую область, регионы Среднего Поволжья и Татарстан, где он занимает положение доминирующего вида в паразитокомплексах. За пределами России его распространение документально подтверждено для территории Беларуси и Молдовы. [5, 7, 8, 9].

В наших сборах *H. nidi* являлся доминирующим видом гамазид на рыжей полевке. Наибольшие значения индексов зафиксированы в 2022 году: ИО — 1.12, ИП — 10.64, ИВ — 0.32. Высокая численность также отмечалась в 2020 году (ИО — 0.83, ИП — 5.48). На других хозяевах, таких как малая лесная и желтогорлая мыши, зараженность была значительно ниже, с ИО не более 0.57 и ИВ в пределах 0.1–0.14.

Род *Myonyssus* Tiraboschi, 1904

Myonyssus rossicus Bregetova, 1956 (26 экз., 5,4 %) — редкий и малочисленный облигатный гематофаг, он способен усваивать как свежую, так и подсохшую кровь, что стало возможным благодаря видоизмененным хелицерам, предназначенным для прокалывания кожных покровов. Вид населяет леса Западной Палеарктики, изредка встречаясь в лесостепных биотопах вплоть до Урала. Его хозяевами выступают различные виды мышевидных грызунов (лесные и серые полевки, водяная полевка, серая крыса, домовая и лесная мыши), однако наибольшая специфичность наблюдается к представителям рода *Sylviaetus*. На территории России ареал вида фрагментирован и включает Среднее Поволжье, Воронежскую область и Северную Осетию; также он регистрировался в Беларуси и Молдове [5, 7, 8, 9].

В наших сборах *M. rossicus* отмечен как малочисленный вид. Наибольшие показатели зараженности

зарегистрированы на желтогорлой мыши в 2019 году: ИО — 0.24, ИП — 0.62, ИВ — 0.24. На рыжей и малой лесной мышах значения индексов были значительно ниже, не превышая ИО — 0.15, ИП — 0.67 и ИВ — 0.15. Большую часть времени и на большинстве хозяев вид встречался единично.

Сем. *Hirstionyssidae* Evans & Till, 1966

Род *Hirstionyssus* Fonseca, 1948

Hirstionyssus isabellinus Oudemans, 1913 (6 экз., 1,2 %) — один из самых многочисленных клещей, распространенных по всей территории России и сопредельных стран, облигатный гематофаг с хелицерами, не способными прокалывать кожу млекопитающих, поэтому питается кровью через ссадины, ранки или нежную кожу новорожденных зверьков. Имеет широкий круг хозяев — преимущественно полевки (особенно рыжая и обыкновенная), реже встречается на мышах, бурозубках, крысах и бурундуках. Может нападать на человека. Экспериментально доказана его способность передавать вирус клещевого энцефалита, а также геморрагическую лихорадку, лимфоцитарный хориоменингит, туляремию, бруцеллез и лептоспироз. Ареал охватывает Голарктику, вероятно, является космополитом [8, 9, 10].

В наших сборах *H. isabellinus* был отмечен как редкий вид. Наибольшие показатели зараженности были зарегистрированы на малой лесной мыши в 2019 году: ИО — 0.14, ИП — 0.4, ИВ — 0.14. На рыжей полевке в тот же период значения индексов были ниже: ИО — 0.05, ИП — 0.27, ИВ — 0.05. В последующие годы сборов данный вид на исследуемой территории не регистрировался.

Исследования фауны гамазовых клещей в лесопарковой зоне Казани выявили их низкую степень специфичности по отношению к хозяевам, что позволяет им паразитировать на широком спектре мелких млекопитающих. Доминирующим прокормителем, с которого было собрано наибольшее число особей, выступает рыжая полевка. Вид является ключевым трофическим ресурсом для многих клещей, в частности для *H. nidi* и личиночных стадий гамазид (до 89 % сборов). Однако, *L. agilis* продемонстрировал необычайно высокую зараженность у желтогорлой мыши, что, вероятно, связано с изменениями её численности в отдельные годы.

Личинки гамазид составили значительную часть всех собранных клещей (599 экземпляров), из которых 535 питались на рыжей полевке. В 2021 году в лесопарке «Дубравная» личинки гамазид составляли 67 % от общего числа собранных клещей, а весной 2022 года уровень зараженности ими достиг 73 %, особенно среди рыжих полевок и лесных мышей. Это подтверждает роль этих млекопитающих в поддержании высокой численности клещей в экосистеме.

В 2021 году в лесопарке Дубравная было зафиксировано преобладание *H. casalis* (53 %) и личинок гамазид (67 %), в основном на рыжей полевке. В Горкинско-Ометьевском лесопарке в 2020 году доминировали *H. nidi* и *E. tabularis*, с зараженностью до 40 % и 30 % соответственно. Весной 2022 года обыкновенная полевка, несмотря на свою низкую численность (3,5 %), стала основным прокормителем для клещей, что связано с высокой зараженностью *L. agilis*.

Заключение

Таким образом, фауна гамазовых клещей в исследуемых лесопарках насчитывает 7 видов. В основном, среди

гамазид преобладали полифаги, способные паразитировать на различных хозяевах, а также виды, тесно связанные с наиболее массовыми видами мелких млекопитающих. Рыжая полевка, доминирующая в населении мелких млекопитающих этих лесопарков, играет ключевую роль главного хозяина-прокормителя для гамазид. Структура паразитарных сообществ гамазид формируется под влиянием комплекса факторов, включая сезонные и многолетние колебания численности как хозяев, так и самих паразитов, а также видовые особенности трофических предпочтений клещей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брегетова Н.Г. Гамазовые клещи (Gamasoidea) // Определители по фауне СССР. Вып. 61. — М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1956. — С. 1–249.
2. Природно-очаговые инфекции в лесах Казани: коллективная монография. — Казань: Медицина, 2011. — 110 с.
3. Нефедов В.Н. К вопросу о фауне гамазовых клещей Татарской АССР // Ученые записки Казанского университета. Естественные науки. — 1957. — Т. 117, вып. 9(2). — С. 273–277.
4. Кулаева Т.М. Материалы к паразитарной фауне рыжих полевок Татарской АССР // Известия КФАН СССР. — 1958. — №6. — С. 137–142.
5. Никулина Н.А. Население гамазовых клещей мелких млекопитающих в природных комплексах России: автореф. дис. Красноярск, 2006. — 29 с.
6. Никулина Н.А. Каталог паразитических гамазовых клещей млекопитающих Северной Евразии (территория России). — Российская академия наук, 2004. — 174 с.
7. Земская А.А. Паразитические гамазовые клещи и их медицинское значение. — М.: Медицина, 1973. — 166 с.
8. Кириллова Н.Ю., Кириллов А.А. Эктопаразиты грызунов (Rodentia) Самарской Луки // Известия Самарского научного центра РАН. — 2008. — Т. 10, № 2. — С. 479–486.
9. Сорокопуд И.А. Фауна гамазовых клещей (Gamasoidea) мелких млекопитающих природно-территориального комплекса «Самарская Лука» // Самарский научный вестник. — 2016. — № 2 (15). — С. 57–63.
10. Ерофеев В.С., Иголкин Н.И., Вершинина Т.А. Изучение роли гамазовых клещей в природной очаговости клещевого энцефалита // Труды Новосибирского мед. института и Новосибирской областной СЭС. — 1961. — № 38. — С. 152–157.

© Подвигина Анастасия Денисовна; Беляев Александр Николаевич;
Беспалов Александр Федорович (kerwood@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПОЛОВОЙ ДИМОРФИЗМ АДАПТАЦИОННЫХ РЕАКЦИЙ НА СОРЕВНОВАТЕЛЬНЫЕ НАГРУЗКИ СПОРТСМЕНОВ- ПОЛИАТЛОНISTОВ НА ЭТАПАХ МНОГОЛЕТНЕЙ ПОДГОТОВКИ

SEXUAL DIMORPHISM OF ADAPTIVE REACTIONS TO COMPETITIVE LOADS IN SPORTSMEN AT THE STAGES OF LONG-TERM TRAINING

D. Romanova

Summary. The article is devoted to the topic of sexual dimorphism of adaptive reactions of polyathlete athletes to competitive loads during long-term training. Special attention is paid to the morphofunctional differences between men and women involved in polyathlon, as well as the phenomenon of morphological masculinization in highly qualified athletes. *The aim of the study* was to quantify the manifestations of sexual dimorphism in the morphofunctional adaptation of the body of polyathletes to specific training and competitive loads. *Methods:* a comprehensive analysis of the morphological, physiological, and psychophysiological parameters of 73 athletes (42 women, 31 men) qualified from the mass categories to the MCMC. Anthropometric measurements, determination of the body weight component according to the J. Matiegka method, calculation of physical development indices, factor analysis and the Wilcoxon criterion were used. *Results:* statistically significant sex differences were found in all the parameters studied. In men, the muscle mass was 50.5 ± 0.5 % versus 48.8 ± 0.7 % in women, and the fat component was 13.4 ± 0.7 % versus 24.5 ± 0.9 %, respectively. Factor analysis revealed the priority importance of the muscle component for both sexes. Highly qualified athletes have a tendency towards morphological masculinization and the formation of an androgynous psychological type. *Conclusions:* the revealed patterns of sexual dimorphism justify the need for a differentiated approach to planning the training process, considering the specifics of the adaptive reactions of athletes of different sexes at all stages of long-term training.

Keywords: sexual dimorphism, polyathlon, adaptive reactions, morphofunctional parameters, body weight component, morphological masculinization, sports specialization, long-term training, competitive loads.

Романова Дина Андреевна

Аспирант, ФГБУ ВО Владимирский государственный
университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых
din.romanova2016@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена теме полового диморфизма адаптивных реакций спортсменов-полиатлонистов на соревновательные нагрузки в процессе многолетней подготовки. Особое внимание уделяется морфофункциональным различиям между мужчинами и женщинами, занимающимися полиатлоном, а также феномену морфологической маскулинизации у спортсменов. *Цель исследования:* количественная оценка проявлений полового диморфизма в морфофункциональной адаптации организма полиатлонистов к специфическим тренировочным и соревновательным нагрузкам. *Методы:* комплексный анализ морфологических, физиологических и психофизиологических показателей 73 спортсменов (42 женщины, 31 мужчина) квалификации от массовых разрядов до МС. Применялись антропометрические измерения, определение компонентного состава массы тела по методике J. Matiegka, расчет индексов физического развития, факторный анализ и критерий Вилкоксона. *Результаты:* установлены статистически значимые половые различия по всем исследованным параметрам. У мужчин мышечная масса составила $50,5 \pm 0,5$ % против $48,8 \pm 0,7$ % у женщин, жировой компонент — $13,4 \pm 0,7$ % против $24,5 \pm 0,9$ % соответственно. Факторный анализ выявил приоритетное значение мышечного компонента для обоих полов. У спортсменов высокой квалификации обнаружена тенденция к морфологической маскулинизации и формированию андрогинного психологического типа. *Выводы:* выявленные закономерности полового диморфизма обосновывают необходимость дифференцированного подхода к планированию тренировочного процесса с учетом специфики адаптационных реакций организма спортсменов разного пола на всех этапах многолетней подготовки.

Ключевые слова: половой диморфизм, полиатлон, адаптационные реакции, морфофункциональные показатели, компонентный состав массы тела, морфологическая маскулинизация, спортивная специализация, многолетняя подготовка, соревновательные нагрузки.

Введение

Половой диморфизм представляет собой фундаментальную биологическую характеристику, определяющую морфофункциональные различия между мужским и женским организмом. В контексте спортивной физиологии данное явление приобретает особое значение, поскольку определяет специфику

адаптационных реакций организма спортсменов на тренировочные и соревновательные нагрузки. Ф.А. Иорданская в своей монографии отмечает: «Проблема полового диморфизма в спорте высших достижений является ключевой для понимания механизмов адаптации и оптимизации тренировочного процесса» [5, с. 56]. М.Г. Ткачук указывает на существование значительных половых различий морфофункциональных показателей у представи-

телей циклических видов спорта, что требует дифференцированного подхода к построению тренировочного процесса [13, с. 105].

Материалы и методы

Исследование базировалось на комплексном анализе морфологических, физиологических и психофизиологических показателей спортсменов-полиатлонистов различного пола и квалификации. Антропометрические измерения включали определение тотальных размеров тела, широтных параметров, обхватных размеров и компонентного состава массы тела по методике по формулам J. Matiegka с использованием компьютерной программы «Компонентный состав массы тела 1.1» [16]. Рассчитывались антропометрические индексы. Статистическая обработка заключалась в сравнении данных по критерию Вилкоксона и в выявлении наиболее значимых факторов с помощью факторного анализа.

Литературный обзор

И.А. Грец в своей докторской диссертации рассматривает рекордные спортивные достижения женщин через призму полового диморфизма, указывая: «Анализ динамики мировых рекордов свидетельствует о существенном сокращении разрыва между результатами мужчин и женщин в ряде видов спорта, что отражает как биологические, так и социокультурные аспекты половой дифференциации» [2, с. 48]. М.А. Коровкин исследовал конституциональные особенности полового диморфизма лиц мужского пола юношеского возраста, выявив значительную вариативность морфологических характеристик в зависимости от этапа полового созревания [6, с. 558]. Т.К. Федотова анализирует этнические аспекты изменчивости полового соматического диморфизма в перипубертатном возрасте, подчеркивая влияние генетических и средовых факторов на формирование половых различий [15, с. 29]. Ю.И. Адам в кандидатской диссертации рассматривает склонность к физическому риску у мужчин в связи с биосоциальной адаптацией, отмечая: «Половой диморфизм проявляется не только в морфофункциональных характеристиках, но и в поведенческих стратегиях адаптации к стрессовым ситуациям».

Е.Ф. Кочеткова и О.Н. Опарина анализируют особенности и проблемы полового диморфизма в спорте, указывая на сглаживание диморфических различий у спортсменок высокой квалификации [8]. С.В. Севодин исследует роль полового диморфизма в физической культуре, формулируя: «Учет половых различий является необходимым условием эффективной организации физкультурно-спортивной деятельности на всех этапах многолетней подготовки» [12, с. 346]. А.В. Лычагин, П.С. Тимашев и Д.А. Погосян рассматривают половой диморфизм как фактор риска остеоартрита коленного

сустава, что имеет важное значение для профилактики травматизма в спорте [9, с. 95].

А.А. Донских исследует факторы, определяющие необходимость сопряженного развития физических качеств и стрельбы в зимнем полиатлоне, констатируя: «Комплексная природа полиатлона требует интегрированного подхода к развитию различных двигательных способностей с учетом половозрастных особенностей спортсменов» [3, с. 122]. А.Н. Павлова разработала методику текущего контроля полиатлонисток на этапе спортивной специализации, подчеркивая необходимость учета овариально-менструального цикла при планировании тренировочных нагрузок [11, с. 339].

Результаты

Исследование проводилось на базе межкафедральной научно-исследовательской лаборатории «Медико-биологическое обеспечение спорта высших достижений». Всего было обследовано 42 женщины и 31 мужчина, занимающихся полиатлоном. Основой послужили результаты Чемпионата Владимирской области, Первенства Владимирской области, Чемпионата России, квалификация от «без разряда» до мастера спорта международного класса; возраст от 18 до 35 лет.

Комплексное морфологическое исследование выявило существенные гендерные различия между спортсменами полиатлонистами. Дифференцированный анализ соматометрических параметров осуществлялся по пяти интегральным блокам: тотальные размеры (длина, масса тела [10, с. 49], окружность грудной клетки), поперечные параметры скелета (плечевой и тазовый диаметры), периметрические характеристики конечностей (обхваты плеча, предплечья, бедра, голени), компонентный состав массы тела (мышечная, жировая, костная фракции) и расчетные индексы физического развития (Эрисмана, Брока, Пинье, Кетле). Полученные данные позволили количественно оценить проявления полового диморфизма в морфофункциональной адаптации организма к систематическим силовым нагрузкам, установив специфические паттерны изменений соматотипа в зависимости от гендерной принадлежности и уровня тренированности испытуемых.

Анализ морфологических характеристик спортсменов полиатлонистов выявил выраженные половые различия в компонентном составе массы тела [7, с. 121]. У мужчин-спортсменов абсолютная мышечная масса составила $40,2 \pm 1,3$ кг ($50,5 \pm 0,5$ % от массы тела), тогда как у женщин данный показатель равнялся $32,0 \pm 1,0$ кг ($48,8 \pm 0,7$ %). М.Г. Ткачук отмечает: «Наиболее значимыми морфологическими показателями для мужчин и женщин являются мышечный компонент массы тела и индексы физического развития, которые определяют функциональные возможности организма» [14, с. 62].

Жировой компонент массы тела демонстрировал противоположную тенденцию: у спортсменов данный показатель составлял $10,9 \pm 0,7$ кг ($13,4 \pm 0,7$ %), у спортсменок — $16,3 \pm 0,9$ кг ($24,5 \pm 0,9$ %). Е.В. Зубарева установила, что у спортсменок наблюдается тенденция к сглаживанию диморфических различий, проявляющаяся в увеличении мышечной массы и индекса маскулинности. Широтные размеры тела также различались: ширина плеч у мужчин достигала $409,9 \pm 2,9$ мм, у женщин — $377,6 \pm 4,2$ мм, при этом спортсменки демонстрировали сближение показателей окружности грудной клетки с мужчинами, не занимающимися спортом.

Факторный анализ морфологических показателей выявил, что первым по значимости фактором у спортсменов обоих полов является мышечный компонент и крепость телосложения. А.А. Донских подчеркивает: «Взаимосвязь характеристик специализированной подготовки полиатлетов определяет необходимость комплексного подхода к развитию различных двигательных способностей» [3, с. 128]. Для женщин вторым по значимости фактором выступает жировой состав тела, тогда как у мужчин — костный компонент массы тела.

Исследование показателей полового диморфизма у полиатлонисток различных специализаций выявило специфические особенности адаптации. Е.В. Зубарева констатирует: «У девушек, занимающихся фемининными видами спорта, обнаружены достоверные признаки морфологической маскулинизации организма, проявляющиеся в увеличении мышечной массы и снижении жирового компонента». Индекс Таннера смещался в сторону мезоморфии, что свидетельствует о невыраженном смещении телосложения в сторону мужского типа.

Индексы физического развития характеризовали особенности телосложения спортсменов-полиатлонистов. Индекс Кетле у спортсменов достигал $450,4 \pm 11,4$ г/см, у спортсменок — $398,7 \pm 11,5$ г/см, что свидетельствовало о повышенной массе тела относительно длины. Е.В. Зубарева констатирует: «Индекс маскулинности у спортсменок имел тенденцию к увеличению, что может считаться признаком морфологической маскулинизации организма». Индекс Эрисмана характеризовал спортсменов как имеющих очень широкую грудную клетку ($14,6 \pm 1,3$ см у мужчин, $11,4 \pm 1,1$ см у женщин).

Толщина кожно-жировых складок различалась в зависимости от пола и специализации спортсменов. А.Н. Павлова подчеркивает: «Динамика жиросложения у полиатлонисток на этапе спортивной специализации требует систематического контроля в рамках морфофункционального мониторинга» [11, с. 345]. У спортсменок величины кожно-жировых складок были больше на задней поверхности плеча ($17,0 \pm 0,8$ мм против $14,8 \pm 0,8$ мм у неспортсменок), на животе ($18,1 \pm 0,9$ мм

против $17,7 \pm 1,1$ мм) и голени ($15,5 \pm 0,8$ мм против $14,8 \pm 0,8$ мм).

Конституциональный анализ выявил преобладание гиперстенического типа телосложения среди полиатлонистов (84 % у мужчин, 69 % у женщин). М.Г. Ткачук отмечает: «Половой диморфизм морфофункциональных особенностей у спортсменов проявляется в специфике распределения конституциональных типов, что определяет индивидуальную стратегию адаптации к тренировочным нагрузкам» [13, с. 162]. Наличие астенического типа среди полиатлонистов объясняется спецификой отдельных видов многоборья, преимущественно гиревого спорта.

Физиологические механизмы адаптации к соревновательным нагрузкам у полиатлонистов различаются в зависимости от пола. Е.В. Зубарева формулирует: «Развитие психоэмоциональной устойчивости в условиях многоборной подготовки требует учета половых особенностей реагирования организма на стрессорные воздействия» [4, с. 32]. Нейродинамические свойства спортсменов демонстрируют половую специфику: мужчины характеризуются более высокой скоростью простой реакции, женщины — лучшей точностью выполнения сложнокоординационных действий.

Морфофункциональные показатели полового диморфизма у спортсменов полиатлонистов отражены в таблице 1.

Таблица 1.

Морфофункциональные показатели полового диморфизма у спортсменов-полиатлонистов

Показатель	Мужчины-спортсмены	Женщины-спортсменки	Коэффициент полового диморфизма
Длина тела, см	$175,6 \pm 7,4$	$164,8 \pm 9,9$	1,065
Масса тела, кг	$79,2 \pm 2,1$	$65,9 \pm 2,1$	1,202
Мышечная масса, %	$50,5 \pm 0,5$	$48,8 \pm 0,7$	1,035
Жировая масса, %	$13,4 \pm 0,7$	$24,5 \pm 0,9$	0,547
Ширина плеч, мм	$409,9 \pm 2,9$	$377,6 \pm 4,2$	1,086
Индекс маскулинности	$1,45 \pm 0,03$	$1,35 \pm 0,02$	1,074

Специфика адаптационных реакций на этапах многолетней подготовки определяется взаимодействием биологических и социальных факторов полового диморфизма. Е.В. Зубарева подчеркивает: «Среди спортсменок гораздо чаще, чем в общей популяции, встречаются девушки с морфологическими признаками маскулинизации организма и маскулинным психологическим типом личности» [4, с. 34]. Сенситивные периоды развития физических качеств различаются у спортсменов разного

пола, что требует дифференцированного подхода к планированию тренировочного процесса.

Интегральная оценка соревновательной деятельности полиатлонистов выявила различия в стратегии формирования результата между мужчинами и женщинами. А.Н. Павлова констатирует: «Методика текущего контроля полиатлонисток должна учитывать фазы овариально-менструального цикла и связанные с ними колебания работоспособности» [11, с. 345]. У женщин наблюдается большая вариативность результатов в различных видах многоборья, что отражает специфику нейрогуморальной регуляции адаптационных процессов.

Выводы

Таким образом, половой диморфизм адаптационных реакций на соревновательные нагрузки у спортсменов полиатлонистов проявляется в комплексе морфологических, физиологических и психологических характеристик. Установлено, что мужчины-спортсмены характеризуются более высокими показателями мышечного компонента массы тела и индексами физического развития, тогда как у женщин-спортсменок наблюдается тенденция к сближению данных параметров с мужскими значениями, что свидетельствует о морфологической маскулинизации. Выявленные половые различия в структуре специализированной подготовленности полиатлонистов обосновывают необходимость дифференцированного подхода к планированию тренировочных нагрузок на различных этапах многолетней подготовки с учетом специфики адаптационных реакций организма спортсменов разного пола.

Обсуждение

Полученные результаты комплексного морфофункционального исследования полиатлонистов различного пола и квалификации раскрывают фундаментальные закономерности проявления полового диморфизма в условиях систематической адаптации к специфическим многокомпонентным нагрузкам.

Установленная диспропорция жирового компонента между спортсменами ($13,4 \pm 0,7\%$) и спортсменками ($24,5 \pm 0,9\%$) отражает эволюционно детерминированные различия в метаболизме липидов, регулируемые половыми стероидными гормонами — тестостероном, обеспечивающим липолитическую активность, и эстрогенами, стимулирующими липогенез в подкожно-жировых депо.

Обнаруженная большая вариативность результатов у женщин в троеборье у полиатлонистов отражает более выраженную гетерохронность развития отдельных двигательных способностей и большую зависимость

функционального состояния от эндогенных биоритмов, связанных с овариально-менструальным циклом. Эта особенность адаптационных реакций женского организма обуславливает необходимость индивидуализации тренировочного процесса полиатлонисток с применением волнообразной периодизации нагрузок, синхронизированной с физиологическими циклами репродуктивной системы, что позволяет минимизировать риск перенапряжения регуляторных механизмов и оптимизировать долгосрочную адаптацию к соревновательным нагрузкам.

Заключение

Проведенное комплексное исследование половых различий морфофункциональных характеристик и адаптационных реакций спортсменов-полиатлонистов различной квалификации позволило установить многоуровневую систему проявления полового диморфизма, включающую морфологический, физиологический и психофизиологический компоненты. Количественная оценка соматометрических параметров выявила статистически значимые различия между мужчинами и женщинами по всем исследованным показателям, при этом систематическая спортивная подготовка индуцирует конвергенцию отдельных морфологических характеристик у спортсменок в направлении мужских значений, что проявляется в увеличении мышечного компонента массы тела, широтных размеров скелета и индексов физического развития. Выявленная морфологическая маскулинизация спортсменок высокой квалификации представляет собой закономерную адаптационную реакцию организма на хроническую гиперфункцию нейромоторного аппарата и сопровождается формированием андрогинного психологического типа половой конституции, обеспечивающего оптимальное сочетание эмоциональной устойчивости и поведенческой гибкости в условиях экстремальных соревновательных нагрузок.

Выявленные особенности нейродинамических характеристик спортсменов разного пола обосновывают необходимость половодифференцированного подхода к технико-тактической подготовке полиатлонистов, предусматривающего акцентированное развитие скоростных качеств и быстроты принятия решений у мужчин при приоритетном совершенствовании координационных способностей и прецизионности движений у женщин. Интегральная подготовка спортсменок должна включать психологическую коррекцию, направленную на формирование адаптивных личностных характеристик, обеспечивающих эффективное преодоление психоэмоциональных стрессоров соревновательной деятельности при сохранении гендерной идентичности и психологического благополучия.

Полученные результаты вносят существенный вклад в понимание физиологических механизмов полового

диморфизма адаптационных реакций в условиях систематической спортивной деятельности и могут быть использованы для оптимизации системы многолетней подготовки спортсменов-полиатлонистов различного пола и квалификации. Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением молекулярно-генетических детерминант половых различий в адаптации

к специфическим тренировочным нагрузкам, анализом динамики нейроэндокринных показателей у спортсменов в различные фазы овариально-менструального цикла и разработкой персонализированных программ подготовки, учитывающих индивидуальный генотип, фенотип и гормональный профиль спортсменов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адам Ю.И. Склонность к физическому риску у мужчин: связь с биосоциальной адаптацией на примере российской выборки: дис. ... канд. ист. наук. М., 2021. 186 с.
2. Грец И.А. Рекордные спортивные достижения женщин в аспекте полового диморфизма: дис. ... доктор пед.наук. СПб, 2012. 229 с.
3. Донских А.А. Факторы, определяющие необходимость сопряжённого развития физических качеств и стрельбы в зимнем полиатлоне // Обзор педагогических исследований. 2021. Т. 3, № 8. С. 122–128.
4. Зубарева Е.В. Изучение показателей полового диморфизма у спортсменов // Научные и образовательные основы в физической культуре и спорте. 2022. Т. 5, № 1. С. 32–37.
5. Иорданская Ф.А. Мужчина и женщина в спорте высших достижений (проблемы полового диморфизма): монография. М.: Советский спорт, 2012–256 с.: ил.
6. Коровкин М.А. Конституциональные особенности полового диморфизма лиц мужского пола юношеского возраста // Мечниковские чтения-2024: Материалы 97-й Всероссийской научно-практической конференции студенческого научного общества с международным участием. СПб.: Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, 2024. С. 558–559.
7. Корягина Ю.В. Компонентный состав массы тела человека № 2008610039 // Программы для ЭВМ... (офиц. бюл.). — 2008. — № 2.
8. Кочеткова Е.Ф., Опарина О.Н. Особенности и проблемы полового диморфизма в спорте // Современные научные исследования и инновации. 2014. № 7 [Электронный ресурс]. Режим доступа:// web.snauka.ru/issues/2014/07/35829.htm: (дата обращения: 04.12.2025).
9. Лычагин А.В., Тимашев П.С., Погосян Д.А. Половой диморфизм как фактор риска остеоартрита коленного сустава (обзор литературы) // Кафедра травматологии и ортопедии. 2022. № 2(48). С. 95–105.
10. Мартиросов Э.Г. Технологии и методы определения состава тела человека. М.: Наука, 2006. 248 с.
11. Павлова А.Н. Методика текущего контроля полиатлонисток на этапе спортивной специализации // Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта. 2021. № 4(194). С. 339–345.
12. Севедин С.В. Роль полового диморфизма в физической культуре // Столица науки. 2020. № 4(21). С. 346–354.
13. Ткачук М.Г. Половой диморфизм морфофункциональных особенностей у спортсменов. СПб.: Национальный государственный университет физической культуры, спорта и здоровья имени П.Ф. Лесгафта, 2021. 223 с.
14. Ткачук М.Г. Половые различия морфофункциональных показателей у представителей циклических видов спорта // Итоговая научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава Национального государственного Университета физической культуры, спорта и здоровья им. П.Ф. Лесгафта. Том Часть 2. СПб.: Национальный государственный Университет физической культуры, спорта и здоровья им. П.Ф. Лесгафта, Санкт-Петербург, 2022. С. 62–65.
15. Федотова Т.К. Этнические аспекты изменчивости полового соматического диморфизма в перипубертатном возрасте // Вестник Московского университета. Серия 23: Антропология. 2025. № 1. С. 29–39.
16. Matiegka J. The testing of physical efficiency // Amer. J. of Phys. Anthropology: 4. 1921. № 3. P. 223–230.

© Романова Дина Андреевна (din.romanova2016@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДИКИ ЦЕЛЕВОЙ КОРРЕКЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛИАТЛОНISTОВ В ИНТЕРВАЛЕ МЕЖДУ ВИДАМИ ПРОГРАММЫ

Романова Дина Андреевна

Аспирант, ФГБУ ВО Владимирский государственный
университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых
din.romanova2016@yandex.ru

PROGNOSTIC SIGNIFICANCE OF MORPHOFUNCTIONAL INDICATORS AND EFFECTIVENESS OF THE TECHNIQUE OF TARGETED CORRECTION OF THE FUNCTIONAL STATE OF POLYATHLETES IN THE INTERVAL BETWEEN PROGRAM TYPES

D. Romanova

Summary. The article is devoted to the study of the prognostic significance of morphofunctional indicators and the development of a methodology for the targeted correction of the functional state of polyathletes in the intervals between the types of the all-around program. Special attention is paid to the analysis of heart rate variability and metabolic changes in the process of competitive activity. *The aim of the study* is to evaluate the prognostic significance of morphofunctional indicators and to determine the effectiveness of the method of targeted correction of the functional state of polyathletes of various qualifications. *Methods:* 135 polyathletes aged 14–30 years participated in the study. The methods of lactometry, heart rate monitoring, spectral analysis of heart rate variability, calculation of the correction efficiency index, and a retrospective analysis of competitive performance were used. *Results:* Age-related dynamics of adaptive changes were revealed, significant correlations were established between the index of correction effectiveness and athletic performance ($r=-0.78$, $P<0.001$). The developed technique provided a reduction in heart rate recovery time by 18.3 % and lactate concentration by 21.7 %. *Conclusions:* Morphofunctional indicators have a high predictive value for assessing athletes' fitness. The technique of targeted correction, considering the individual characteristics of vegetative regulation, helps optimize the functional state of polyathletes.

Keywords: polyathlon, morphofunctional parameters, heart rate variability, lactometry, spectral analysis, target correction, functional state, correction efficiency index, sports physiology, competitive activity.

Аннотация. Статья посвящена исследованию прогностической значимости морфофункциональных показателей и разработке методики целевой коррекции функционального состояния полиатлонистов в интервалах между видами программы многоборья. Особое внимание уделяется анализу вариабельности сердечного ритма и метаболических изменений в процессе соревновательной деятельности. *Цель исследования* — оценить прогностическую значимость морфофункциональных показателей и определить эффективность методики целевой коррекции функционального состояния полиатлонистов различной квалификации. *Методы:* В исследовании приняли участие 135 полиатлонистов в возрасте 14–30 лет. Применялись методы лактатометрии, пульсометрии, спектрального анализа вариабельности сердечного ритма, расчет индекса эффективности коррекции, ретроспективный анализ соревновательной результативности. *Результаты:* Выявлена возрастная динамика адаптационных изменений, установлены достоверные корреляции между индексом эффективности коррекции и спортивной результативностью ($r=-0,78$, $P < 0,001$). Разработанная методика обеспечила снижение времени восстановления ЧСС на 18,3 % и концентрации лактата на 21,7 %. *Выводы:* Морфофункциональные показатели обладают высокой прогностической значимостью для оценки готовности спортсменов. Методика целевой коррекции с учетом индивидуальных особенностей вегетативной регуляции способствует оптимизации функционального состояния полиатлонистов.

Ключевые слова: полиатлон, морфофункциональные показатели, вариабельность сердечного ритма, лактатометрия, спектральный анализ, целевая коррекция, функциональное состояние, индекс эффективности коррекции, спортивная физиология, соревновательная деятельность.

Введение

Прогностическая значимость морфофункциональных показателей в спортивной физиологии заключается в их способности служить объективными маркерами для оценки и контроля адаптационных процессов организма спортсменов в условиях интенсивных тренировочных и соревновательных нагрузок. Исследования Н.А. Агаджаняна [1] и К.В. Судакова [15] показали, что индивидуально-типологические свойства нервной системы, морфометрические параметры тела, пропорции скелетных мышц, тип мышечных волокон и скоростно-силовые возможности обладают относительной стабильностью, что делает их ценными критериями для прогнозирования спортивных достижений. В.Н. Платонов подчеркивал необходимость комплексного подхода в оценке морфофункционального состояния организма, позволяющего более глубоко исследовать различные элементы физиологического статуса, уровень которых на определенном этапе спортивной подготовки может существенно отличаться от средних популяционных значений [13, с. 59].

Полиатлон как многоборный вид спорта предъявляет комплексные требования к различным физиологическим системам организма спортсменов, обусловленные необходимостью последовательного выполнения упражнений различной биоэнергетической направленности в рамках одного соревновательного дня. Специфика соревновательной деятельности характеризуется высокой вариативностью метаболических режимов: от прецизионной координационной деятельности в стрельбе до работы субмаксимальной и максимальной аэробной мощности в плавании и лыжной гонке. Согласно концепции Ю.В. Верхошанского, такое сочетание разнонаправленных физических нагрузок требует от организма спортсменов высокой функциональной мобильности и способности к быстрой перестройке систем энергообеспечения мышечной деятельности в интервалах между видами программы [2, с. 21].

Литературный обзор

Фундаментальные исследования В.Б. Иссурина в области блоковой периодизации тренировочного процесса позволили обосновать необходимость специализированных методик коррекции функционального состояния спортсменов в периоды между тренировочными микроциклами и непосредственно в соревновательной деятельности [5, с. 78]. Работы А.А. Новикова продемонстрировали, что эффективность целевой коррекции функционального состояния может быть количественно оценена с помощью спектрального анализа вариабельности сердечного ритма, который позволяет определить уровень активности парасимпатического и симпатического отделов автономной нервной системы [10, с. 156].

Т.С. Гильмутдинов установил, что индекс эффективности коррекции, рассчитываемый как отношение спектральных плотностей мощности кардиоинтервалограммы на определенных временных интервалах, может служить достоверным критерием реакции регуляторных систем организма на различные виды воздействий [3, с. 35].

Исследования Д.Н. Давиденко выявили важность комплексной оценки морфофункциональных показателей, включающей определение соматометрических параметров, топографических особенностей распределения подкожного жира методом калиперометрии, показателей функционального состояния кардиореспираторной системы и периферической гемодинамики [4, с. 118]. Ю.Н. Кузнецов подчеркивал значение лактатометрии как объективного метода оценки метаболического обеспечения мышечной деятельности различной интенсивности [7, с. 72]. По данным А.С. Мозжухина, концентрация лактата в капиллярной крови позволяет дифференцировать зоны метаболической мощности работы: аэробную (до 2 ммоль/л), смешанную аэробно-анаэробную (2–4 ммоль/л), анаэробно-аэробную (4–8 ммоль/л), гликолитическую анаэробную (8–15 ммоль/л) и максимальную анаэробную (свыше 15 ммоль/л), что критически важно для управления тренировочным процессом полиатлонистов [8, с. 45].

Э.В. Науменко показал, что в спектре кардиоритма различают три главных спектральных компонента: инфранизкочастотный (ULF), низкочастотный (LF) и высокочастотный (HF), распределение мощности и центральная частота которых могут варьировать в связи с изменениями автономной модуляции сердечного ритма под влиянием физических нагрузок [9]. Согласно исследованиям С. Норриса, высокочастотный компонент спектра отражает преимущественно парасимпатические влияния центральной нервной системы, поскольку она более оперативна в регуляторных процессах, тогда как низкочастотный компонент связан с гуморальной регуляцией, осуществляемой за счет транспорта кровотоком продуктов деятельности эндокринных желез, что определяет более длительные циклы регуляции гомеостаза [11, с. 252].

Материалы и методы

Экспериментальная часть исследования проведена на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» и спортивных школ Северо-Западного, Центрального, Уральского, Сибирского и Приволжского федеральных округов. В исследовании приняли участие 135 полиатлонистов различной квалификации в возрасте от 14 до 30 лет, тренирующихся в спортивных клубах

и школах олимпийского резерва, стаж занятий которых варьировал от 3 до 16 лет. Было выделено пять групп спортсменов, соответствующих определенным этапам многолетней спортивной подготовки: группа 1 (возраст 14–16 лет, квалификация КМС и I разряд, этап совершенствования спортивного мастерства с начальной специализацией, $n=38$), группа 2 (17–19 лет, КМС и МС, углубленная специализация, $n=34$), группа 3 (20–23 года, МС, этап высшего спортивного мастерства до 2 лет, $n=35$), группа 4 (24–30 лет, МС и МСМК, этап высшего спортивного мастерства свыше 2 лет, $n=28$).

Исследования проводились в соревновательном периоде годового цикла подготовки во время проведения всероссийских соревнований (Кубок России, Чемпионат России) по полиатлону в спортивных дисциплинах «3-борье с лыжной гонкой» и «3-борье с лыжероллерной гонкой». Концентрацию лактата в капиллярной крови определяли методом электрохимического анализа с использованием портативного лактатометра во временные интервалы: в состоянии относительно покоя (за 30 минут до начала соревновательной нагрузки) и на 3-й, 5-й и 7-й минутах восстановительного периода после завершения каждого соревновательного упражнения. Регистрацию частоты сердечных сокращений проводили с использованием телеметрических систем контроля сердечного ритма в режиме непрерывной записи на протяжении всего периода соревновательной деятельности с частотой дискретизации 1000 Гц, анализируя показатели ЧСС в покое, максимальную и среднюю ЧСС во время нагрузки, продолжительность нахождения в различных зонах интенсивности и время восстановления до фоновых значений.

Спектральный анализ вариабельности сердечного ритма проводился с целью количественной оценки уровня парасимпатических и симпатических влияний у обследуемых полиатлонистов в интервалах между видами программы. Т.С. Шептикина, Н.Н. Сентябрев и С.А. Шептикин разработали методику расчета индекса эффективности коррекции функционального состояния, определяемого как отношение спектральных плотностей

мощности кардиоинтервалограммы до воздействия корректирующих процедур, во время воздействия и после завершения восстановительных мероприятий [16, с. 58]. Ретроспективный анализ результативности соревновательной деятельности полиатлонистов проводился на основе данных официальных протоколов всероссийских соревнований за период 2020–2024 годов с оценкой абсолютных временных результатов в каждом виде многоборья, ранговых мест, процентного соотношения вклада результата в каждом виде и динамики изменения результативности в зависимости от этапа многолетней подготовки и спортивной квалификации.

Результаты и обсуждение

Анализ морфофункциональных показателей полиатлонистов различной квалификации выявил выраженную возрастную динамику адаптационных изменений, проявляющихся в снижении ЧСС покоя от $68 \pm 2,3$ уд/мин в группе 14–16 лет до $58 \pm 1,5$ уд/мин в группе 24–30 лет ($P < 0,001$), что согласуется с концепцией А.Ю. Кейно о формировании экономичности функционирования кардиореспираторной системы по мере роста спортивной квалификации. Максимальная ЧСС при соревновательной нагрузке демонстрировала тенденцию к увеличению от младших возрастных групп к старшим (от $186 \pm 3,1$ до $193 \pm 2,3$ уд/мин), что отражает повышение функциональных возможностей системы кровообращения и способности организма работать в зонах максимальной интенсивности. Концентрация лактата в капиллярной крови после выполнения соревновательных упражнений возрастала от $11,2 \pm 1,8$ ммоль/л у спортсменов группы 1 до $16,2 \pm 2,3$ ммоль/л у представителей группы 4 ($P < 0,01$), что свидетельствует о более высокой толерантности к продуктам анаэробного гликолиза у полиатлонистов высокой квалификации.

Спектральный анализ вариабельности сердечного ритма в интервалах между видами программы полиатлона позволил выявить особенности вегетативной регуляции функционального состояния у спортсменов

Таблица 1.

Морфофункциональные показатели и зоны метаболической мощности работы у полиатлонистов различной квалификации

Группа	Возраст (лет)	ЧССпокой (уд/мин)	ЧССмакс (уд/мин)	Лактат покой (ммоль/л)	Лактат после нагрузки (ммоль/л)	Зона метаболической мощности	ИЭ (усл.ед.)
1	14–16	$68 \pm 2,3$	$186 \pm 3,1$	$1,4 \pm 0,2$	$11,2 \pm 1,8$	Гликолитическая анаэробная	$3,2 \pm 0,4$
2	17–19	$64 \pm 1,9$	$189 \pm 2,8$	$1,3 \pm 0,1$	$13,6 \pm 2,1$	Гликолитическая анаэробная	$3,8 \pm 0,5$
3	20–23	$61 \pm 1,7$	$191 \pm 2,5$	$1,2 \pm 0,1$	$14,8 \pm 1,9$	Гликолитическая анаэробная	$4,3 \pm 0,6$
4	24–30	$58 \pm 1,5$	$193 \pm 2,3$	$1,1 \pm 0,1$	$16,2 \pm 2,3$	Максимальная анаэробная	$4,9 \pm 0,7$

*составлено автором

различной квалификации. О.А. Ревтова установила, что у полиатлонистов младших возрастных групп отмечается преобладание высокочастотного компонента спектра (HF), отражающего активность парасимпатического отдела вегетативной нервной системы, тогда как у представителей старших групп наблюдается смещение вегетативного баланса в сторону симпатических влияний с увеличением мощности низкочастотного компонента (LF) и возрастанием индекса LF/HF. Это объясняется формированием более совершенных механизмов срочной адаптации к быстро меняющимся условиям соревновательной деятельности и необходимостью оперативной мобилизации функциональных резервов организма при переходе от одного вида программы к другому.

Индекс эффективности коррекции функционального состояния, рассчитанный по методике Т.С. Шептикиной, Н.Н. Сентябрева и С.А. Шептикина, продемонстрировал достоверное увеличение от $3,2 \pm 0,4$ условных единиц в группе 1 до $4,9 \pm 0,7$ условных единиц в группе 4 ($P < 0,001$) [16, с. 62]. Данный показатель отражает способность организма спортсменов к быстрой перестройке функциональных систем под влиянием целенаправленных восстановительных воздействий в интервалах между видами программы полиатлона и может служить объективным критерием готовности к выполнению последующего соревновательного упражнения. В.Н. Платонов отмечал, что нетривиальный эффект согласованной перестройки мод спектра кардиоритма под влиянием психоэмоциональной и физиотерапевтической коррекции объясняется процессами самоорганизации гомеостаза при активизации регуляторных систем организма, что выявляет согласованный положительный эффект на вегетативные и гуморальные регуляторы при участии центральной нервной системы [12, с. 135].

Ретроспективный анализ результативности соревновательной деятельности полиатлонистов показал, что коэффициент вариации индивидуальных результатов в серии соревнований одного уровня закономерно снижается от младших возрастных групп к старшим: от $12,3 \pm 1,8$ % в группе 1 до $4,2 \pm 0,9$ % в группе 4 ($P < 0,001$), что свидетельствует о повышении стабильности выступлений по мере роста спортивного мастерства. Лимитирующими видами многоборья для спортсменов младших возрастных групп являлись преимущественно плавание и лыжная гонка, тогда как у представителей высшей квалификации отставание от лидеров соревнований распределялось более равномерно между всеми видами программы, что указывает на формирование гармоничной структуры специальной подготовленности полиатлонистов высокого класса.

Методика целевой коррекции функционального состояния полиатлонистов в интервале между видами программы, разработанная на основе результатов спек-

трального анализа вариабельности сердечного ритма, включала дифференцированное применение средств психофизиологической регуляции в зависимости от индивидуальных особенностей вегетативного статуса спортсменов. У лиц с преобладанием симпатических влияний (индекс LF/HF $> 2,0$) использовались методы релаксационного воздействия: аутогенная тренировка, дыхательные упражнения с удлинённым выдохом, музыкальное сопровождение с темпом 60–70 ударов в минуту, тогда как у спортсменов с исходной ваготонией (индекс LF/HF $< 1,0$) применялись мобилизующие техники, включающие идеомоторную тренировку, ритмическую гимнастику и музыкальное сопровождение активизирующего характера с темпом 120–140 ударов в минуту.

Эффективность разработанной методики целевой коррекции подтверждалась достоверным улучшением показателей функционального состояния полиатлонистов: снижением времени восстановления ЧСС до фоновых значений на $18,3 \pm 3,2$ % ($P < 0,01$), уменьшением концентрации лактата в капиллярной крови на 7-й минуте восстановительного периода на $21,7 \pm 4,1$ % ($P < 0,01$) и оптимизацией показателей вариабельности сердечного ритма со снижением индекса напряжения регуляторных систем на $24,6 \pm 5,3$ % ($P < 0,001$). Согласно данным К.В. Судакова, под влиянием различных факторов стационарно-равновесное состояние организма нарушается, и его дальнейшее состояние зависит от результата взаимодействия условий окружающей среды и внутренних функциональных резервов, что подчеркивает необходимость индивидуализации восстановительных мероприятий с учетом текущего функционального состояния спортсменов.

Корреляционный анализ выявил наличие достоверных взаимосвязей между морфофункциональными показателями и спортивной результативностью полиатлонистов. Обнаружена сильная отрицательная корреляция между индексом эффективности коррекции и временем выполнения соревновательных упражнений ($r = -0,78$, $P < 0,001$), что свидетельствует о высокой прогностической значимости данного показателя для оценки готовности спортсменов к достижению высоких результатов. Выявлена умеренная положительная корреляция между концентрацией лактата после нагрузки и спортивной квалификацией полиатлонистов ($r = 0,64$, $P < 0,01$), отражающая повышение толерантности к метаболическому ацидозу по мере роста тренированности организма.

Заключение

Прогностическая значимость морфофункциональных показателей в системе подготовки полиатлонистов определяется их способностью служить объективными маркерами адаптационных процессов организма к комплексным соревновательным нагрузкам различной био-

энергетической направленности. Комплексный подход в оценке уровня морфофункционального состояния организма с использованием современных методов лактометрии, пульсометрии и спектрального анализа вариабельности сердечного ритма позволяет более глубоко исследовать различные элементы физиологического статуса спортсменов и осуществлять подбор эффективных методик коррекции функционального состояния в интервалах между видами программы полиатлона.

Достоверные оценки эффективности коррекции функционального состояния организма полиатлонистов обеспечивают оперативный контроль интенсивности восстановительных воздействий, качественную дозировку психофизиологических средств регуляции и своевременное исключение возможных неблагоприятных последствий чрезмерного напряжения регуляторных систем. Индекс эффективности коррекции, рассчитываемый как отношение спектральных плотностей мощности кардиоинтервалограммы на определенных временных интервалах соревновательной деятельности, может служить количественным критерием готовности орга-

низма спортсменов к выполнению последующих видов программы многоборья и прогностическим фактором успешности выступления на соревнованиях высокого уровня.

Таким образом, прогностическая значимость морфофункциональных показателей связана с их ролью в оценке и прогнозировании адаптационных процессов организма полиатлонистов, а эффективность методики целевой коррекции функционального состояния определяется возможностью индивидуализации восстановительных программ на основе результатов комплексного физиологического обследования спортсменов в условиях соревновательной деятельности. Разработанная методика целевой коррекции обеспечивает оптимизацию вегетативной регуляции, ускорение процессов восстановления кардиореспираторной системы и повышение толерантности организма к метаболическим сдвигам, что способствует стабилизации спортивных результатов и достижению высокой результативности полиатлонистов на этапах совершенствования спортивного мастерства и высшего спортивного мастерства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адам Ю.И. Склонность к физическому риску у мужчин: связь с биосоциальной адаптацией на примере российской выборки: дис. ... канд. ист. наук. М., 2021. 186 с.
2. Грец И.А. Рекордные спортивные достижения женщин в аспекте полового диморфизма: дис. ... доктор пед. наук. СПб, 2012. 229 с.
3. Донских А.А. Факторы, определяющие необходимость сопряжённого развития физических качеств и стрельбы в зимнем полиатлоне // Обзор педагогических исследований. 2021. Т. 3, № 8. С. 122–128.
4. Зубарева Е.В. Изучение показателей полового диморфизма у спортсменок // Научные и образовательные основы в физической культуре и спорте. 2022. Т. 5, № 1. С. 32–37.
5. Иорданская Ф.А. Мужчина и женщина в спорте высших достижений (проблемы полового диморфизма): монография. М.: Советский спорт, 2012–256 с.: ил.
6. Коровкин М.А. Конституциональные особенности полового диморфизма лиц мужского пола юношеского возраста // Мечниковские чтения-2024: Материалы 97-й Всероссийской научно-практической конференции студенческого научного общества с международным участием. СПб.: Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, 2024. С. 558–559.
7. Корягина Ю.В. Компонентный состав массы тела человека № 2008610039 // Программы для ЭВМ... (офиц. бюл.). — 2008. — № 2.
8. Кочеткова Е.Ф., Опарина О.Н. Особенности и проблемы полового диморфизма в спорте // Современные научные исследования и инновации. 2014. № 7 [Электронный ресурс]. Режим доступа: // web.snauka.ru/issues/2014/07/35829.htm: (дата обращения: 04.12.2025).
9. Лычагин А.В., Тимашев П.С., Погосян Д.А. Половой диморфизм как фактор риска остеоартрита коленного сустава (обзор литературы) // Кафедра травматологии и ортопедии. 2022. № 2(48). С. 95–105.
10. Мартиросов Э.Г. Технологии и методы определения состава тела человека. М.: Наука, 2006. 248 с.
11. Павлова А.Н. Методика текущего контроля полиатлонисток на этапе спортивной специализации // Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта. 2021. № 4(194). С. 339–345.
12. Севодин С.В. Роль полового диморфизма в физической культуре // Столица науки. 2020. № 4(21). С. 346–354.
13. Ткачук М.Г. Половой диморфизм морфофункциональных особенностей у спортсменов. СПб.: Национальный государственный университет физической культуры, спорта и здоровья имени П.Ф. Лесгафта, 2021. 223 с.
14. Ткачук М.Г. Половые различия морфофункциональных показателей у представителей циклических видов спорта // Итоговая научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава Национального государственного Университета физической культуры, спорта и здоровья им. П.Ф. Лесгафта. Том Часть 2. СПб.: Национальный государственный Университет физической культуры, спорта и здоровья им. П.Ф. Лесгафта, Санкт-Петербург, 2022. С. 62–65.
15. Федотова Т.К. Этнические аспекты изменчивости полового соматического диморфизма в перипубертатном возрасте // Вестник Московского университета. Серия 23: Антропология. 2025. № 1. С. 29–39.
16. Matiegka J. The testing of physical efficiency // Amer. J. of Phys. Anthropology: 4. 1921. № 3. P. 223–230.

© Романова Дина Андреевна (din.romanova2016@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ФИТОТОЛЕРАНТНОСТИ К ТОКСИЧЕСКОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ПОЛЛЮТАНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОПОНИКИ

METHODOLOGICAL APPROACH TO DETERMINING PHYTOTOLERANCE TO TOXIC POLLUTANT IMPACT USING HYDROPONICS

A. Kharitonov
A. Makarova

Summary. Technogenic soil pollution with heavy metals (HMS), such as zinc, copper, and cadmium, poses a serious threat to the environment, which necessitates the development of reliable methods for assessing plant phytotolerance. The purpose of this study is to develop a standardized technique based on hydroponics for rapid assessment of plant resistance to polymetallic contamination for further use in the phytoremediation process. In a hydroponic installation under controlled conditions, six species of bioindicator plants were exposed to zinc, copper and cadmium salts in the concentration range from 1 to 200 conditional values of maximum permissible concentrations (MPC). Morphophysiological parameters (germination, growth, biomass) and accumulation of metals in tissues were evaluated using inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). The results revealed a pronounced dose-dependent response in all species. Mustard of the field (*Lat. «Brassica juncea»*) has been identified as the most tolerant species, exhibiting the properties of a hyperaccumulator with an effective concentration value (EC_{50}) of approximately 100 MPDC and accumulating metals up to 1200 mg/kg (Cd) and 265 mg/kg (Zn) in root tissues. Meadow bluegrass (*Latin «Poa pratensis»*) showed extreme sensitivity, reaching EC_{50} already at 5xPDC. A strong negative correlation was also found between the concentration of metals in plant tissues and key growth parameters. The developed hydroponic technique reduces the assessment time of phytotolerance from several years to 1–2 months while maintaining high accuracy (85–90 %). The strong correlation ($r > 0.7$) between the data from the hydroponic experiments and the field results confirms the predictive value of this approach. The data obtained demonstrate that hydroponic screening provides an effective and reliable method of pre-selection of plant species for phytoremediation of soils contaminated with metals, which is of particular interest for practical application. The novelty of the work lies in the development of a comprehensive standardized protocol for rapid assessment of phytotolerance, validated by comparison with field data.

Keywords: hydroponics, heavy metals, phytoremediation, phytotolerance, biomonitoring.

Харитонов Александр Эдуардович

Аспирант, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева
serdiner2016@yandex.ru

Макарова Анна Сергеевна

Доктор технических наук, профессор,
Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева
makarova.a.s@muctr.ru

Аннотация. Техногенное загрязнение почв тяжелыми металлами (ТМ), такими как цинк, медь и кадмий, представляет собой серьезную угрозу для экологии, что обуславливает необходимость разработки надежных методов оценки фитотолерантности растений. Целью данного исследования является разработка стандартизированной методики на основе гидропоники для быстрой оценки устойчивости растений к полиметаллическому загрязнению для дальнейшего использования их в процессе фиторемедиации. В гидропонной установке в контролируемых условиях шесть видов растений-биоиндикаторов подвергали воздействию солей цинка, меди и кадмия в диапазоне концентраций от 1 до 200 условных значений предельно-допустимых концентраций (ПДК). Оценивали морфофизиологические параметры (всхожесть, рост, биомасса) и накопление металлов в тканях с помощью оптической эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES). Результаты выявили выраженную дозозависимую реакцию у всех видов. Горчица полевая (*лат. «Brassica juncea»*) была идентифицирована, как наиболее толерантный вид, проявляющий свойства гипераккумулятора со значением эффективной концентрации (EC_{50}) приблизительно равным 100хПДК и накапливающий металлы до 1200 мг/кг (Cd) и 265 мг/кг (Zn) в корневых тканях. Мятлик луговой (*лат. «Poa pratensis»*) показал крайнюю чувствительность, достигая EC_{50} уже при 5хПДК. Также была обнаружена сильная отрицательная корреляция между концентрацией металлов в тканях растений и ключевыми параметрами роста. Разработанная гидропонная методика сокращает время оценки фитотолерантности с нескольких лет до 1–2 месяцев при сохранении высокой точности (85–90 %). Сильная корреляция ($r > 0,7$) между данными гидропонных экспериментов и полевыми результатами подтверждает прогностическую ценность данного подхода. Полученные данные демонстрируют, что гидропонный скрининг обеспечивает эффективный и надежный метод предварительного отбора видов растений для фиторемедиации почв, загрязненных металлами, что дает особый интерес для практического применения. Новизна работы заключается в разработке комплексного стандартизированного протокола для быстрой оценки фитотолерантности, валидированного путем сравнения с полевыми данными.

Ключевые слова: гидропоника, тяжелые металлы, фиторемедиация, фитотолерантность, биомониторинг.

Введение

Современная экологическая ситуация характеризуется прогрессирующим загрязнением окружающей среды тяжелыми металлами (ТМ), что представляет серьезную угрозу для устойчивого функционирования агроэкосистем и безопасности пищевой продукции. Среди наиболее опасных загрязнителей особое место занимают цинк, медь и кадмий, которые даже в незначительных концентрациях способны оказывать токсическое воздействие на растительные организмы [1]. В России до 20 % сельхозземель в промышленных регионах загрязнены ТМ сверх ПДК [2]. Традиционные методы оценки фитотолерантности, основанные на полевых экспериментах, требуют 2–3 года и не учитывают вариабельность почвенных факторов [3].

Разработка экспресс-методов, позволяющих в сжатые сроки оценивать устойчивость растений, представляет особый научный и практический интерес. Перспективным направлением является использование гидропонных систем как модельной среды, обеспечивающей точный контроль условий и дозирования загрязнителей [4]. Эффективность фиторемедиации — технологии очистки с использованием растений [5] — напрямую зависит от правильного подбора толерантных видов. Однако существующие методики отбора требуют значительных временных и материальных затрат.

Целью эксперимента являлась разработка стандартизированной гидропонной методики для экспресс-оценки фитотолерантности растений к полиметаллическому загрязнению.

Перед нами были поставлены следующие задачи:

1. Разработка и апробация методологии с использованием гидропонной системы.
2. Исследование дозозависимых эффектов действия ТМ на растения-биоиндикаторы.
3. Оценка аккумуляционной способности растений.
4. Определение пороговых значений токсичности (EC_{50}).

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали шесть видов растений-биоиндикаторов, относящихся к различным семействам и экологическим группам: кресс-салат (*лат. «Lepidium sativum»*), горчица полевая (*лат. «Brassica juncea»*), мялик луговой (*лат. «Poa pratensis»*), щавель обыкновенный (*лат. «Rumex acetosa»*), томат (*лат. «Solanum lycopersicum»*) и базилик (*лат. «Ocimum basilicum»*) (Рис. 1). Выбор данных видов обусловлен их широким распространением, скоростью роста и чувствительностью к загрязняющим веществам [6].

Для моделирования загрязнения применяли соли тяжелых металлов:

$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ (ПДК = 23 мг/кг); $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (ПДК = 3 мг/кг);

$Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ (ПДК = 0,5 мг/кг).

Концентрации металлов рассчитаны на основе ПДК для микроэлементов в почве. Диапазон составляет: 1, 5, 10, 50, 100, 200 ПДК.

Схема эксперимента: исследование проводили в регулируемых гидропонных условиях в течение 45 дней (полный вегетационный цикл).



Рис. 1. Стадия проращивания семян растений в чашках Петри

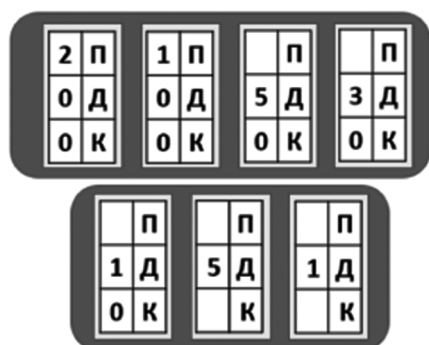


Рис. 2. Расположение матов в установке

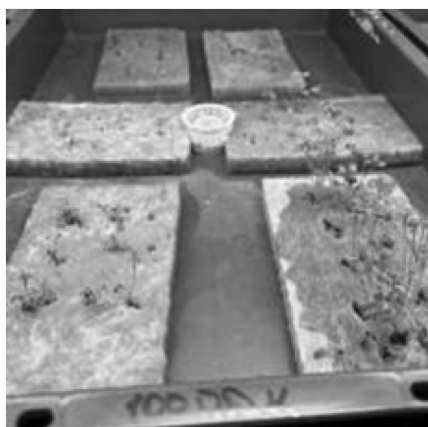


Рис. 3. Расположение субстрата в контейнере

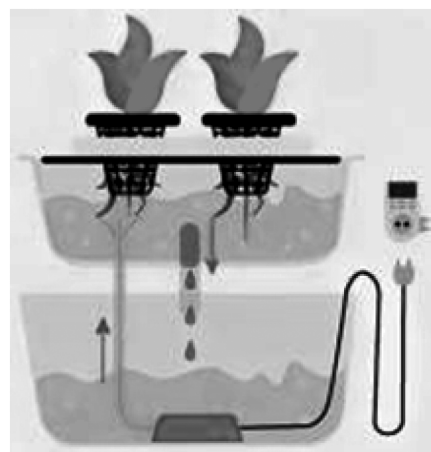


Рис. 4. Схема гидропонной установки

Концентрации ТМ в питательном растворе варьировали от 1 до 200 ПДК для каждой соли. Контрольная группа выращивалась на растворе Хогланда без ТМ. Гидропонная система (Рис. 2–4) обеспечивала контроль pH (5,8–6,2), температуры ($22 \pm 1^\circ\text{C}$), освещенности (~ 400 люкс) и электропроводности. Подача раствора — по принципу периодического затопления.

Методы анализа: накопление металлов в тканях определяли методом ICP-OES (Agilent 5110) по методике US EPA 6010D [8]. Морфофизиологические параметры (всхожесть, длина корней и побегов, биомасса) оценивали по стандартным методикам [9].

Статистическая обработка: использовали дисперсионный анализ (ANOVA), множественный регрессионный и корреляционный анализ. Достоверность различий оценивали при $p < 0,05$. Проведено три повторности эксперимента.

Результаты и обсуждение

Предпосевная обработка семян 0,1 % KMnO_4 повысила всхожесть на 20 %. Наибольшая всхожесть у горчицы (95 ± 3 %), наименьшая — томата (70 ± 5 %).

Динамика роста выявила выраженную дозозависимую реакцию. На 7-е сутки наблюдались уменьшение длины корней, хлороз, снижение тургора. При >50 ПДК у большинства видов — полное прекращение роста и некроз.

Накопление ТМ: Результаты ICP-OES анализа (Табл. 1–4) показали значительные межвидовые различия. Значением «*гибель» указаны растения, которые погибли после внесения определенной концентрации ТМ.

Наибольшей толерантностью характеризовалась горчица ($\text{EC}_{50} \approx 100$ ПДК). Вид проявил свойства гипе-

Таблица 1.
Концентрация металлов в растениях при 1 ПДК (мг/кг)

Растение	Cu	Cd	Zn
Базилик	$54,46 \pm 0,05$	$14,86 \pm 0,04$	$156,83 \pm 0,05$
Томаты	$35,78 \pm 0,05$	$10,59 \pm 0,05$	$139,42 \pm 0,04$
Мятлик луговой	$21,37 \pm 0,03$	$10,61 \pm 0,04$	$179,58 \pm 0,03$
Щавель	$34,13 \pm 0,02$	$10,84 \pm 0,03$	$98,95 \pm 0,05$
Кресс-салат	$42,75 \pm 0,04$	$19,5 \pm 0,01$	$207,68 \pm 0,03$
Горчица	$52,13 \pm 0,05$	$17,61 \pm 0,04$	$164,35 \pm 0,02$

Таблица 2.
Концентрация металлов в растениях при 5 ПДК (мг/кг)

Растение	Cu	Cd	Zn
Базилик	$58,35 \pm 0,02$	$48,71 \pm 0,04$	$409,16 \pm 0,09$
Томаты	$35,78 \pm 0,04$	$95,64 \pm 0,01$	$347,65 \pm 0,04$
Мятлик луговой	*гибель	*гибель	*гибель
Щавель	$46,18 \pm 0,09$	$66,75 \pm 0,04$	$330,9 \pm 0,04$
Кресс-салат	$40,82 \pm 0,03$	$68,09 \pm 0,05$	$489,92 \pm 0,04$
Горчица	$54,55 \pm 0,08$	$58,76 \pm 0,04$	$465,66 \pm 0,05$

Таблица 3.
Концентрация металлов в растениях при 10хПДК (мг/кг)

Растение	Cu	Cd	Zn
Базилик	$335,85 \pm 0,04$	$56,93 \pm 0,06$	$1230,05 \pm 0,02$
Томаты	$147,52 \pm 0,05$	$55,39 \pm 0,04$	$374,35 \pm 0,04$
Мятлик луговой	*гибель	*гибель	*гибель
Щавель	$146,86 \pm 0,03$	$53,59 \pm 0,02$	$589,8 \pm 0,04$
Кресс-салат	*гибель	*гибель	*гибель
Горчица	$282,45 \pm 0,03$	$72,32 \pm 0,05$	$1474,41 \pm 0,04$

Таблица 4.
Концентрация металлов в растениях при 50хПДК (мг/кг)

Растение	Cu	Cd	Zn
Базилик	365,78±0,06	49,05±0,07	970,01±0,03
Томаты	112,92±0,04	38,45±0,03	175,35±0,03
Мятлик луговой	*гибель	*гибель	*гибель
Щавель	*гибель	*гибель	*гибель
Кресс-салат	*гибель	*гибель	*гибель
Горчица	265,54±0,02	52,88±0,02	1134,54±0,03

ракумулятора, накапливая в корнях до 1200 мг/кг Cd и 265 мг/кг Zn. При 10 ПДК наблюдался эффект гормона. Мятлик показал исключительную чувствительность ($EC_{50} = 5$ ПДК) с быстрым развитием оксидативного стресса.

Статистический анализ выявил достоверную отрицательную корреляцию между содержанием ТМ в тканях и ростовыми параметрами (r от -0,75 до -0,89). Наиболее сильная корреляция — для длины корней и биомассы. Дисперсионный анализ подтвердил значительное влияние вида растения и концентрации загрязнителя на все параметры ($p < 0,001$).

Полученные результаты согласуются с литературными данными. Высокая устойчивость горчицы может

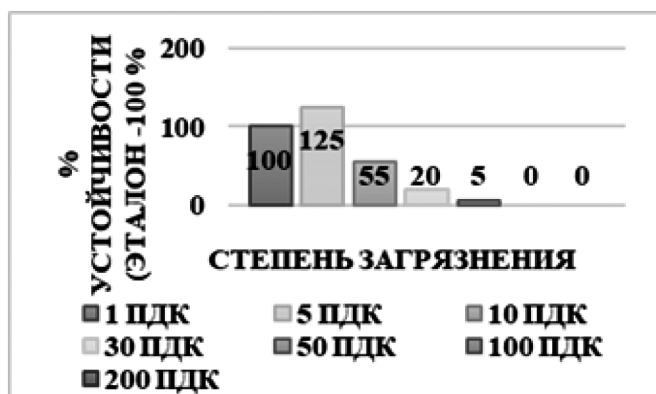


Рис. 5. Коэффициент устойчивости базилика



Рис. 6. Коэффициент устойчивости щавеля

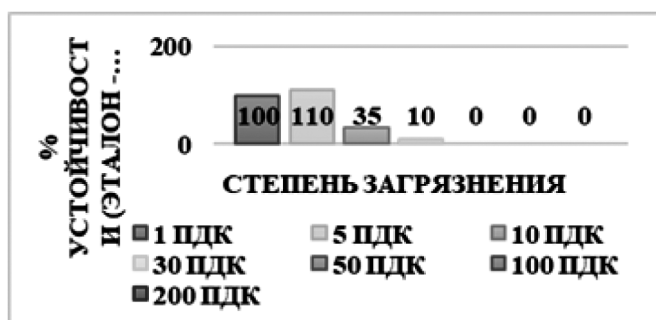


Рис. 7. Коэффициент устойчивости кресс-салата



Рис. 8. Коэффициент устойчивости горчицы

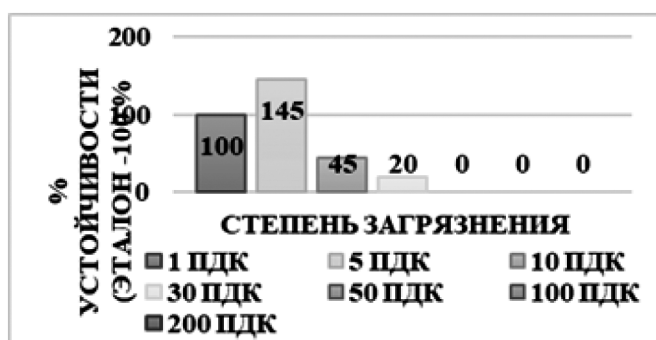


Рис. 9. Коэффициент устойчивости томата



Рис. 10. Коэффициент устойчивости мятлика

быть обусловлена эффективной системой детоксикации, включающей активацию генов HMA3 и HMA4, ответственных за вакуолярную компартментализацию металлов [10]. Чувствительность мятлика связана с недостаточной активностью антиоксидантных ферментов [11].

Разработанная методика показала высокую воспроизводимость и сократила время оценки фитотолерантности с нескольких лет до 1–2 месяцев при точности 85–90%. Валидация путем сравнения с полевыми данными показала сильную корреляцию ($r > 0,7$).

Выводы

1. Разработан комплексный стандартизированный гидропонный протокол для экспресс-оценки фитотолерантности растений к тяжелым металлам. Методика характеризуется высокой воспроизводимостью и значительным сокращением времени анализа.

2. Горчица полевая идентифицирована как наиболее перспективный вид для фиторемедиации Cd/Zn-загрязненных почв благодаря свойствам гипераккумулятора и высокой толерантности ($EC_{50} \approx 100$ ПДК).
3. Мятлик луговой может служить чувствительным биоиндикатором загрязнения на ранних стадиях ($EC_{50} = 5$ ПДК).
4. Методика демонстрирует высокую прогностическую ценность (корреляция с полевыми данными $r > 0,7$), что позволяет рекомендовать её для предварительного скрининга видов при планировании фиторемедиации.

Полученные результаты имеют практическое значение для создания систем экологического мониторинга. Дальнейшие исследования будут направлены на расширение круга изучаемых видов и металлов

ЛИТЕРАТУРА

1. Bhaduri A.M., Fulekar M.H. Antioxidant enzyme responses of plants to heavy metal stress // *Rev Environ Sci Biotechnol*. 2012. Vol.11. P.55–69.
2. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды РФ в 2018 году». М.: Минприроды России, 2019.
3. Yan A. et al. Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land // *Front Plant Sci*. 2020. Vol.11. P.359. DOI:10.3389/fpls.2020.00359
4. Salt D.E. et al. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants // *Nat Biotechnol*. 1995. Vol.13(5). P.468–474. DOI:10.1038/nbt0595-468
5. Salt D.E., Smith R.D., Raskin I. Phytoremediation // *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*. 1998. Vol.49. P.643–668. DOI: 10.1146/annurev.arplant.49.1.643
6. ISO 11269-1:2012. Soil quality — Determination of the effects of pollutants on soil flora — Part 1: Method for the measurement of inhibition of root growth.
7. Gratao P.L. et al. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier // *Funct Plant Biol*. 2005. Vol.32(6). P.481–494. DOI:10.1071/FP05016
8. US EPA Method 6010D (SW-846): Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry. 2007.
9. Burges A. et al. From phytoremediation of soil contaminants to phytomanagement of ecosystem services in metal contaminated sites // *Int J Phytoremediation*. 2017. Vol.20(4). P.384–397. DOI:10.1080/15226514.2017.1365340
10. Yang X. et al. Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation in plants // *J Plant Physiol*. 2018. Vol.225. P.23–35.
11. Smith J. et al. Antioxidant defense systems in grass species under heavy metal stress // *Environ Exp Bot*. 2022. Vol.195. P.104–115.

© Харитонов Александр Эдуардович (serdiner2016@yandex.ru); Макарова Анна Сергеевна (makarova.a.s@muctr.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ МОДЕЛЕЙ ФРАГМЕНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФОВ

SOME APPROACHES TO BUILDING MODELS OF RAILWAY NETWORK FRAGMENTS USING GRAPHS

D. Advolotkin

Summary. The article is dedicated to the creation of mathematical models for analyzing the capacity of railway network segments, taking into account the capacity of such railway infrastructure objects as train stations, bridges, and rail segments. A comparative analysis of known literary sources forming the knowledge base in the field of transport network capacity research is conducted in the article. Original models are then proposed, aimed at identifying critical sections of networks and developing recommendations for their improvement. Various options for constructing graph models with parameters that have both deterministic and stochastic nature are considered. Simplified algorithms for calculating the capacity of railway segments using the described models are provided. The article concludes with findings and recommendations for implementing the models in the practices of military management authorities.

Keywords: graph, capacity, railway network, critical area, route, optimization.

Адволоткин Дмитрий Иванович

кандидат технических наук, Научно-исследовательский
испытательный центр Железнодорожных войск
Министерства обороны РФ, г. Москва
Advolotkin1@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена созданию математических моделей анализа пропускной способности фрагментов железнодорожной сети, учитывающих пропускную способность таких объектов железнодорожной инфраструктуры как железнодорожная станция, мост и перегон. В статье проводится сравнительный анализ известных литературных источников, формирующих базу знаний в области исследования пропускной способности транспортных сетей. Далее предлагаются оригинальные модели, предназначенные для выявления критических участков сетей и разработки предложений по их совершенствованию. Рассматриваются варианты построения графовых моделей, имеющих в своей структуре параметры, имеющие как детерминированную, так и стохастическую природу. Приводятся укрупненные алгоритмы производства расчётов пропускной способности железнодорожных участков с использованием описанных моделей. Завершается статья выводами и рекомендациями по внедрению моделей в практику органов военного управления.

Ключевые слова: граф, пропускная способность, железнодорожная сеть, критический участок, маршрут, оптимизация.

Железнодорожный транспорт играет ключевую роль в обеспечении экономического развития и безопасности страны, позволяя перемещать значительные объемы товаров и пассажиров. Эффективность работы инфраструктуры железнодорожного транспорта зависит от многих факторов, одним из важнейших среди которых является пропускная способность железнодорожных объектов. Современные условия требуют адекватных инструментов для анализа и своевременного реагирования на изменения актуальных параметров объектов железнодорожных сетей, влияющих на их пропускную способность.

Вопросы развития научного аппарата, ориентированного на оптимизацию пропускной способности транспортных сетей, активно изучались различными авторами. Среди них выделяются работы таких исследователей, как Балашевич Н.Н. и Петров Ю.П. [1], которые вводят теоретические основания для анализа транспортных сетей. Также важную роль играет исследование пропускной способности железнодорожных магистралей, проведенное Кириловым А.В. и Кириловым Д.А. [2].

Эти авторы развивают идеи анализа пропускной способности и делают упор на значимость комплексного подхода к управлению железнодорожными системами. Среди учебно-методических изданий особое внимание заслуживает пособие Бабкова В.Ф. и Потаповой Т.М. [3], в котором представлены основные подходы к организации железнодорожных перевозок и управлению транспортным процессом. Более специализированные исследования представлены Каргиным В.И. и Ивановым Е.С. [4], а также работой Фадеева Г.Н. и Костенко Б.Б. [5], которые глубоко погружаются в изучение графовых моделей и их приложений в анализе транспортных сетей.

Несмотря на значительный вклад вышеперечисленных авторов, остается необходимость разработки единой модели, интегрирующей существующие подходы и учитывающей основные параметры отдельных объектов железнодорожной инфраструктуры, оказывающих влияние на ее пропускную способность.

Целью настоящей работы является описание эффективной математической модели, ориентированной

на автоматизированные системы поддержки принятия решения, функционирующие в интересах оперативного анализа текущей пропускной способности железнодорожной сети в границах заданного региона, в интересах выявления объектов оказывающих критическое влияние на пропускную способность, и формирования предложений по ее повышению. В основе решения задачи лежит разработка интегрированной графовой модели, объединяющей основные железнодорожные объекты.

В общем случае фрагмент сети железных дорог в границах выделенной зоны можно представить в виде ненаправленного графа g включающего в себя множество вершин V и множество ребер E . В рассматриваемой модели важно учитывать не только пропускную способность участков (перегонов), но и железнодорожных станций. Введем обозначения для характеристик пропускной способности каждой железнодорожной станции.

Обозначения:

V — множество вершин графа, представляющих железнодорожные станции, каждая вершина $v_i \in V$ имеет дополнительный атрибут — свою пропускную способность p_i .

Тогда каждая вершина будет формально представляется парой: $v_i = (s_i, p_i)$, где s_i — индекс железнодорожной станции, а p_i — ее пропускная способность.

Множество вершин при этом представлено в виде множества пар:

$$V = \{(s_1, p_1), (s_2, p_2), \dots, (s_n, p_n)\},$$

где $n = |V|$ — количество вершин (станций).

E — множество ребер графа, каждый элемент которого представляет связь между двумя станциями. Ребро (v_i, v_j) показывает, что существует путь между станциями s_i и s_j .

Полный граф задается следующей конструкцией:

$$g = (V, E)$$

где:

$$V = \{(s_1, p_1), (s_2, p_2), \dots, (s_n, p_n)\}$$

$$E = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V, i \neq j\}$$

Множество ребер графа состоит из пар вершин, представленных как пары с заданной пропускной способностью:

$$E = \{(s_1, p_1), (s_2, p_2)\}$$

таких, что $i \neq j$.

Имеется три железнодорожные станции, соединенные между собой перегонами с соответствующими пропускными способностями:

Станция A с пропускной способностью 10 пар поездов в час (далее — п.п./ч).

Станция B с пропускной способностью 8 п.п./ч.

Станция C с пропускной способностью 12 п.п./ч.

Тогда множество вершин и ребер будет иметь вид:

$$V = \{(A, 10), (B, 8), (C, 12)\}$$

В том случае если станция B находится на перегоне между станциями A и C , то граф будет иметь вид:

$$E = \{(A, 10), (B, 8)\}, \{(B, 8), (C, 12)\}, \{(A, 10), (C, 12)\}$$

Такой подход позволяет дать полную картину рассматриваемой транспортно-инфраструктурной сети, включая важные показатели пропускной способности каждой железнодорожной станции. Но не будет возможности учитывать пропускную способность железнодорожных мостов, находящихся на рассматриваемой сети. Для устранения того недостатка зададим другой граф, со следующими основными понятиями:

Вершина: каждая вершина представляет собой отдельную станцию и обладает параметром пропускной способности. Формат представления вершин при этом будет оставаться прежним:

$$v_i = (s_i, p_i)$$

где: s_i — индекс железнодорожной станции.

p_i — пропускная способность станции.

А ребра (перегоны между станциями) разделим на два типа:

Межстанционный перегон, на котором находится мост с заданной пропускной способностью:

$$e_{ij}^m = ((v_i, v_j), q_{ij})$$

где: v_1, v_2 — станции, соединяемые железнодорожным мостом.

q_{ij} — пропускная способность железнодорожного моста между станциями.

Перегон без моста с заданной пропускной способностью:

$$e_{ij}^a = ((v_i, v_j), r_{ij})$$

где: v_1, v_2 — станции, соединяемые перегоном.

r_{ij} — пропускная способность перегона между станциями.

В таком случае полное определение графа будет иметь вид:

$$g = (V, E_m, E_a)$$

где: $V = \{(s_1, p_1), (s_2, p_2), \dots, (s_n, p_n)\}$ — множество вершин (станций).

$E_m = \{((v_i, v_j), q_{ij})\}_{i \neq j}$ — множество ребер-мостов с показателями пропускной способности.

$E_a = \{((v_i, v_j), r_{ij})\}_{i \neq j}$ — множество ребер-перегонов, на которых нет железнодорожных мостов с показателями пропускной способности.

Рассмотрим пример такого графа:

$$V = \{(A, 10), (B, 8), (C, 12), (D, 15)\}$$

где:

Станция A с пропускной способностью 10 п.п./ч.

Станция B с пропускной способностью 8 п.п./ч.

Станция C с пропускной способностью 12 п.п./ч.

Станция D с пропускной способностью 15 п.п./ч.

Предположим, что между станциями имеются следующие связи:

Перегоны, на которых расположены железнодорожные мосты:

$$E_m = \{((A, B), 5), ((B, C), 6), ((C, D), 8)\}$$

где:

Мост на перегоне A и B с пропускной способностью 5 п.п./ч.

Мост на перегоне B и C с пропускной способностью 6 п.п./ч.

Мост на перегоне C и D с пропускной способностью 8 п.п./ч.

Перегоны, на которых нет железнодорожных мостов:

$$E_a = \{((A, C), 3), ((B, D), 4)\}$$

где:

Перегон A и C с пропускной способностью 3 п.п./ч.

Перегон B и D с пропускной способностью 4 п.п./ч.

В таком случае граф будет иметь следующий вид

$$g = \left\{ \begin{aligned} & \{((A, 10), (B, 8), (C, 12), (D, 15)), ((A, B), 5), \\ & \{((B, C), 6), ((C, D), 8), ((A, C), 3), ((B, D), 4)\} \end{aligned} \right\}$$

Такое представление железнодорожной сети позволяет определять максимальную пропускную способность маршрутов равную

$$\min\{p_{\text{нач}}, p_{\text{кон}}, a_{\text{пер}}, r_{\text{мост}}\},$$

где:

$p_{\text{нач}}$ — пропускная способность начальной станции.

$p_{\text{кон}}$ — пропускная способность конечной станции.

$a_{\text{пер}}$ — пропускная способность перегонов.

$r_{\text{мост}}$ — пропускная способность мостов.

Так для приведенного примера, при расчёте максимальной пропускной способности на маршруте $A \rightarrow C \rightarrow D$, получим:

Пропускная способность начальной станции A 10 пар поездов в час.

Пропускная способность промежуточной станции C 12 п.п./ч.

Пропускная способность конечной станции D 15 п.п./ч.

Пропускная способность перегона A и C 3 п.п./ч.

Пропускная способность моста между станциями C и D 8 п.п./ч.

$$\min\{10, 15, 12, 3, 8\} = 3$$

Соответственно максимальная пропускная способность на маршруте $A \rightarrow C \rightarrow D$ составляет 3 пары по-

ездов в час, а критическим участком маршрута является перегон $A — C$, имеющий пропускную способность 3 п.п./ч.

Описанная модель не вполне соответствует реальности, в которой пропускная способность железнодорожных объектов есть величина вероятностная, зависящая от множества внешних факторов, и описанная модель не в полной мере соответствует объекту моделирования. При введении вероятностных характеристик пропускных способностей на маршруте возникает задача оценки вероятности достижения заданной пропускной способности. Для этого можно использовать комбинированный подход, основанный на правилах умножения вероятностей для последовательных событий [6].

Такой подход к построению моделей исследован рядом авторов, так в работе Колцовой О.В. и Лобанова К.А. [7] выполнен общий анализ надежности транспортных сетей, с использованием стохастических графовых моделей. В работе основное внимание уделяется оценке отказоустойчивости и рисков на основе вероятностных характеристик. Она содержит общую оценку надежности и устойчивости сети в целом, тогда как наша задача нацелена на анализ пропускной способности и идентификацию критических объектов на заданном участке.

В работе Муратовской Н.С., Семенова М.Ю. [8] ставится задача оптимизации транспортных сетей с использованием стохастических графов. Основная идея — максимизировать эффективность использования ресурсов при учете случайных возмущений. При этом делается акцент на оптимальное распределение ресурсов и решение задач планирования, а не оперативного анализа пропускной способности с целью выявления «узких» мест.

Работа Воробьева Д.К., Макарова и В.Л.Основой [9] посвящена разработке методов анализа стохастически определяемых сетевых структур. Главное внимание уделяется методикам построения и анализа таких сетей. Но в работе в недостаточной мере раскрываются практические рекомендации по приложению стохастических графов для оценки пропускной способности.

Уточним постановку задачи: необходимо оценить вероятность того, что маршрут движения поездов обеспечит требуемую пропускную способность, учитывая случайные вариации пропускных способностей станций, железнодорожных участков и мостов.

Предположим, что на железнодорожном участке необходимо обеспечить минимальную пропускную способность W^* . Соответственно требуется оценить вероятность события $P(W \geq W^*)$.

Рассмотрим простой участок из трех последовательно расположенных станций A, B, C , соединённых перегонами на некоторых из которых есть мосты. Для каждой составляющей маршрута известны вероятностные распределения пропускных способностей.

Общая пропускная способность участка W находится в зависимости от пропускных способностей отдельных объектов на участке:

$$W = \min(P_A, Q_{AB}, P_B, Q_{BC}, P_C)$$

где:

P_A, P_B, P_C — пропускные способности станций A, B, C .

Q_{AB}, Q_{BC} — пропускные способности железнодорожных мостов на перегонах между станциями $A-B$ и $B-C$.

Выполним оценку вероятности $P(W \geq W^*)$:

Используя правило произведения вероятностей независимых событий [6], получаем:

$$P(W \geq W^*) = P(P_A \geq W^*) \cdot P(Q_{AB} \geq W^*) \cdot P(P_B \geq W^*) \cdot P(Q_{BC} \geq W^*) \cdot P(P_C \geq W^*)$$

где: $P(X > Y)$ — вероятность того, что X превышает порог Y .

Особенности анализа пропускной способности железнодорожного участка с использованием описанной модели: если на участке присутствуют перегоны без железнодорожных мостов, их пропускные способности суммируются с соответствующим весом вероятности:

$$P(R_{AC} \geq W^*) = \sum_{r_{ac}} P(r_{ac}) \cdot I(r_{ac} \geq W^*)$$

где $I(x)$ — индикаторная функция, принимающая значение 1, если условие выполнено, и 0 — в противном случае.

В таком случае алгоритм вычисления пропускной способности железнодорожного участка предполагает вычисление соответствующей вероятности для каждой возможной комбинации значений пропускных способностей участка:

$$P(W \geq W^*) = \prod_j P(Z_j \geq W^*)$$

где Z_j — любая составляющая железнодорожного участка (станция, мост, железнодорожный перегон).

Пример построения модели железнодорожного участка. Дано распределение пропускных способностей железнодорожных станций:

$$A : \left\{ 10 : \frac{1}{4}, 12 : \frac{1}{4}, 14 \frac{1}{4}, 16 \frac{1}{4} \right\}$$

$$B : \left\{ 8 : \frac{1}{4}, 10 : \frac{1}{4}, 12 \frac{1}{4}, 14 \frac{1}{4} \right\}$$

$$C : \left\{ 12 : \frac{1}{4}, 14 : \frac{1}{4}, 16 \frac{1}{4}, 18 \frac{1}{4} \right\}$$

Распределение пропускных способностей мостов:

$$AB : \left\{ 5 : \frac{1}{4}, 6 : \frac{1}{4}, 7 \frac{1}{4}, 8 \frac{1}{4} \right\}$$

$$BC : \left\{ 6 : \frac{1}{4}, 7 : \frac{1}{4}, 8 \frac{1}{4}, 9 \frac{1}{4} \right\}$$

Требуется оценить вероятность того, что железнодорожный участок обеспечит пропускную способность $W^* \geq 10$.

Решение:

$$\text{вероятность } P(A \geq 10) = \frac{3}{4}$$

$$\text{вероятность } P(AB \geq 10) = 0$$

$$\text{вероятность } P(B \geq 10) = \frac{1}{2}$$

$$\text{вероятность } P(BC \geq 10) = \frac{1}{4}$$

$$\text{вероятность } P(C \geq 10) = 1$$

Итоговая оценка:

$$P(W \geq 10) = \frac{3}{4} \cdot 0 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} \cdot 1 = 0$$

Достижение пропускной способности 10 невозможно из-за недостаточной пропускной способности моста на перегоне А–В.

Анализ вариантов применения различных типов графовых моделей для определения пропускной способности железнодорожной сети выявил их преимущества и недостатки, в качестве объекта исследования выступали классические и стохастические графы. При этом было определено, что классическая модель подходит для анализа фиксированных параметров пропускной способности, её основное преимущество заключается в прозрачности расчетов и удобстве визуализации. Такая модель полезна для начального этапа анализа и планирования простых транспортных сетей.

Стохастическая модель учитывает вероятностные характеристики, что дает возможность более глубокого исследования нестабильных условий и позволяет снизить риски потерь при принятии управленческих решений. Модель будет предпочтительнее для крупных и сложных транспортных систем, подверженных значительным колебаниям интенсивности движения в условиях воздействия внешних факторов.

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие предложения по практическому применению описанных моделей. При формировании мероприятий направленных на повышение живучести (пропускной способности) железнодорожных участков обе модели позволяют разрабатывать предложения в планы мероприятий направленных на устранение узких мест и повышение общей пропускной способности направлений. В качестве инструмента управления рисками. Стохастическая модель способна снижать риски потери устойчивости железнодорожной сети в границах заданного региона, позволяя заблаговременно предусматривать сбои и формировать рекомендации как по перенаправлению потоков грузоперевозок, так и по первичным (наиболее важным) объектам восстановления пропускной способности.

При автоматизации задач поддержки принятия решений в составе программного обеспечения анализа графов упрощает работу инженерного состава и должностных лиц органов управления, помогая получать оценку пропускной способности на заданных направлениях перевозок. При этом возможна реализация в составе систем мониторинга и прогнозирования, обеспечивающих постоянный контроль состояния инфраструктуры железнодорожного транспорта для своевременного принятия решений по восстановлению (повышению) пропускной способности железнодорожной сети в границах заданного региона.

В качестве одной из подсистем, интегрированных с системами отслеживания места расположения транспортных средств в режиме реального времени дает возможность объединения графовых моделей с современными технологиями слежения за состоянием транспорта и инфраструктуры с обеспечением повышения точности прогнозных оценок и снижения затрат на эксплуатацию.

Выбор подходящей графовой модели зависит от масштаба задачи, характера данных и требований к детализации. Применение таких моделей на практике обеспечит повышение эффективности функционирования подсистемы железнодорожного транспорта в общей транспортной системе региона и позволит вырабатывать обоснованный перечень мероприятий направленных на снижение временных и ресурсных издержек, и рост пропускной способности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балашевич Н.Н., Петров Ю.П. «Транспортные сети и управление ими». Издательство МГУ, 2012.
2. Кирилов А.В., Кирилов Д.А. «Методология исследования пропускной способности железнодорожных магистралей». Издательство Политехнического университета, 2015.
3. Бабков В.Ф., Потапова Т.М. «Организация перевозок и управление транспортом». Инфра-М, 2017.
4. Каргин В.И., Иванов Е.С. «Управление качеством функционирования железнодорожной инфраструктуры». Журнал Московского Университета, 2018.
5. Фадеев Г.Н., Костенко Б.Б. «Теория транспортных сетей». Наука, 2016.
6. Белько, И.В. Теория вероятностей и математическая статистика. Примеры и задачи / И.В. Белько, Г.П. Свирид. — Минск: Новое знание, 2007. — 251 с.
7. Колцова О.В., Лобанов К.А. Стохастические графовые модели для анализа надёжности транспортных сетей // Труды международного семинара «Информационные технологии и математическое моделирование», 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITMM.2015.7341716>.
8. Муратовская Н.С., Семёнов М.Ю. Стохастические графовые модели для решения оптимизационных задач в транспортных сетях // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика, информатика, процессы управления, № 3, 2018. ISSN: 2587–6057.
9. Воробьёв Д.К., Макаров В.Л. Вероятностные методы в стохастически определяемых сетевых структурах // Проблемы современной транспортной логики, т. 8, № 4, 2017. ISSN: 2227–9471.

© Адволоткин Дмитрий Иванович (Advolotkin1@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ДВУХУРОВНЕВАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ГИБРИДНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ: ИНТЕГРАЦИЯ КЛАССИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ И НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ

Аксенов Сергей Геннадьевич

Доктор экономических наук, профессор, ФГБОУ ВО
Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа
beregipilya@mail.ru

TWO-LEVEL INTELLIGENT HYBRID CONTROL SYSTEM: INTEGRATION OF CLASSICAL ALGORITHMS AND FUZZY LOGIC TO ENSURE STABILITY IN THE FACE OF UNCERTAINTY

S. Aksenov

Summary. In conditions of instability of management facilities and dynamic regulatory requirements, traditional methods are often ineffective in the absence of a complete a priori model. The paper proposes an approach to the design of a two-level intelligent hybrid system that combines classical algorithms with fuzzy logic to process uncertainty. A model is proposed that includes an analysis of the applicability of analytical approaches, the formation of an adaptive rule base, decision-making in conditions of partial incompleteness and dynamic correction of impacts. The stages of synthesis and verification are based on the principles of mutual adaptation, discrete series, and transformations. The integration of continuous dynamics and discrete event logic increases the adaptability, reliability, and stability of managing complex objects in a changing environment.

Keywords: hybrid control system, intelligent system, fuzzy logic, two-level architecture, uncertainty, real-time decision-making.

Аннотация. В условиях неустойчивости объектов управления и динамических требований к регулированию традиционные методы часто неэффективны при отсутствии полной априорной модели. В работе предложен подход к проектированию двухуровневой интеллектуальной гибридной системы, объединяющей классические алгоритмы с нечёткой логикой для обработки неопределённости. Предложена модель, включающая анализ применимости аналитических подходов, формирование адаптивной базы правил, принятие решений в условиях частичной неполноты и динамическую коррекцию воздействий. Этапы синтеза и верификации основаны на принципах взаимной адаптации, дискретных рядов и трансформаций. Интеграция непрерывной динамики и дискретно-событийной логики повышает адаптивность, надёжность и устойчивость управления сложными объектами в изменяющейся среде.

Ключевые слова: гибридная система управления, интеллектуальная система, нечёткая логика, двухуровневая архитектура, неопределённость, принятие решений.

Нестабильность характеристик объекта управления и динамически изменяющиеся требования к качеству регулирования ограничивают эффективность традиционных методов, основанных на точных аналитических моделях, построение которых зачастую невозможно, что порождает неопределённость и снижает надёжность управления; для преодоления этих ограничений в работе рассматривается проектирование интеллектуализированных гибридных систем, синергетически объединяющих надёжность классических алгоритмов с адаптивностью методов искусственного интеллекта — подхода, признанного приоритетным в автоматизации сложных систем, в частности энергетических.

Состояние гибридной системы описывается парой: непрерывная динамика — системой ДУ, дискретная — передаточной функцией на конечном множестве состоя-

ний [2]; взаимодействие происходит в дискретные события, когда непрерывная траектория достигает заданных подмножеств. Формальное определение Визенхаузена (1966) сохранено в виде набора:

$$H_w = \langle M, \Omega, f, d, \omega, J \rangle \quad (1)$$

где M, Ω — дискретные состояния и выходы; f — непрерывный переход; d — дискретный переход по $J \subseteq P(R^n)$; ω — отображение состояний в выходы.

Согласно (1), гибридное состояние задаётся парой $(m, x) \in M \times R^n$. Ключевое достоинство модели — способность описывать неоднородное поведение: плавную эволюцию непрерывной части x по дифференциальным уравнениям и резкие дискретные переходы, основанные на теоретико-множественных или экспертных правилах.

В работе [3] рассматривается класс гибридных систем, где дискретная компонента строится на экспертных знаниях. Динамика описывается уравнением:

$$S(t+1) = (\cup F_j(t) \cup \psi(\varphi(S(i), U(i), R_D, R_S))) \quad (2)$$

где \cup — объединение по $j \leq t+1$ и $i \leq t$, $U(i)$ — управляющее воздействие; R_S и R_D — базы правил завершения режимов и переходов; ψ и φ — процедуры применения правил.

R_S содержит знания о среде, R_D — действия исполнительных органов. Функционирование начинается с начального состояния; далее циклически: применение правил R_S до стабилизации ($\psi(S)=S$), затем активация φ для перехода к $S(t+1)$. Цикл повторяется, обеспечивая адаптацию и непрерывное управление.

Ключевое достоинство модели (2) — адаптивность к изменениям среды и устойчивость к неполноте данных, позволяющая описывать динамику как аналитически, так и через экспертные правила; при этом интеллектуальная компонента выступает как семиотическая система распределённого интеллекта, обеспечивающая в реальном времени восприятие, интерпретацию и формирование управляющих воздействий на основе символьных и непрерывных знаний [5].

$$SS = \langle M, R(M), F(M), F(SS) \rangle \quad (3)$$

где $M=\{M_i\}$ — множество логико-лингвистических моделей, реализующих интеллектуальные функции; $R(M)$ — функция выбора необходимой модели (моделей) в текущей ситуации; $F(M)=\{F(M_i)\}$ — множество функций модификации моделей; $F(SS)$ — функция модификации системы SS , её базовых конструкций $M, R(M), F(M)$.

Модель (3) обеспечивает высокую адаптивность, распределённую и параллельную обработку, повышая быстродействие, отказоустойчивость и масштабируемость — свойства, важные для гибридных систем управления сложными объектами, такими как электрокамерные печи [6] или двигатели УПГ-50/6М на Мангышлаке [5,7]. Однако слабая интеграция классических и ИИ-компонентов подчёркивает необходимость разработки гибридных решений с эффективным взаимодействием парадигм.

На основе [7] предложен обобщённый алгоритм проектирования интеллектуальной гибридной системы, включающий:

1. Анализ объекта: оценка сложности, нестационарности и требований к качеству.
2. Синтез модели: схема, интеграция компонентов, алгоритмы и ПО.
3. Формирование базы знаний и экспертных правил с учётом динамики и критериев.

4. Разработка имитационной модели для исследования в различных режимах.
5. Моделирование подсистем — оценка автономности и тиражируемости.
6. Верификация по эталонным или экспериментальным данным.
7. Доработка модели.

Основу гибридизации составляют принципы взаимной адаптации, дискретных рядов и трансформаций; система включает два уровня и функционирует как единый механизм обработки и взаимодействия непрерывных, дискретных и символьных данных (рис. 1).



Рис. 1. Двухуровневая система обработки и взаимодействия данных

Первый уровень — классическое регулирование по моделям, второй — нечёткая логика; их результаты дополняют друг друга, а выходы классического регулятора адаптируют базу правил, чьё качество, определяемое экспертными знаниями, задаёт эффективность системы (рис. 2).

В работах [7] показано, что экспертные знания, используемые в нечёткой логике второго уровня, основаны на ключевых переменных классической теории автоматического управления: отклонении системы θ , скорости изменения отклонения $\dot{\theta}$, интеграле отклонения $\int \theta dt$ и ускорении $\ddot{\theta}$. Суть предложенного алгоритма решения задачи управления, представленная на рисунке 3.

Решение задачи управления основано на комбинации классического метода ($l=1$) и эвристического ($l=0$), с оценкой эффективности $L=1/0$ — это позволяет системе динамически выбирать стратегию по текущему состоянию и результату.

Моделирование гибридной системы включает:

- 1) постановку задачи;
- 2) сбор данных от датчиков;
- 3) предварительную обработку и оценку применимости классического метода;
- 4) формирование базы знаний;

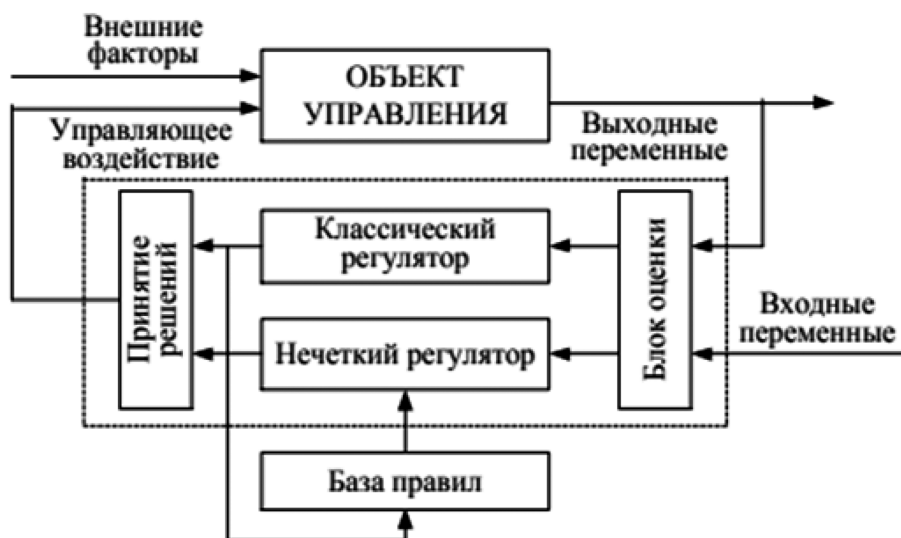


Рис. 2. Блок-схема гибридной системы управления

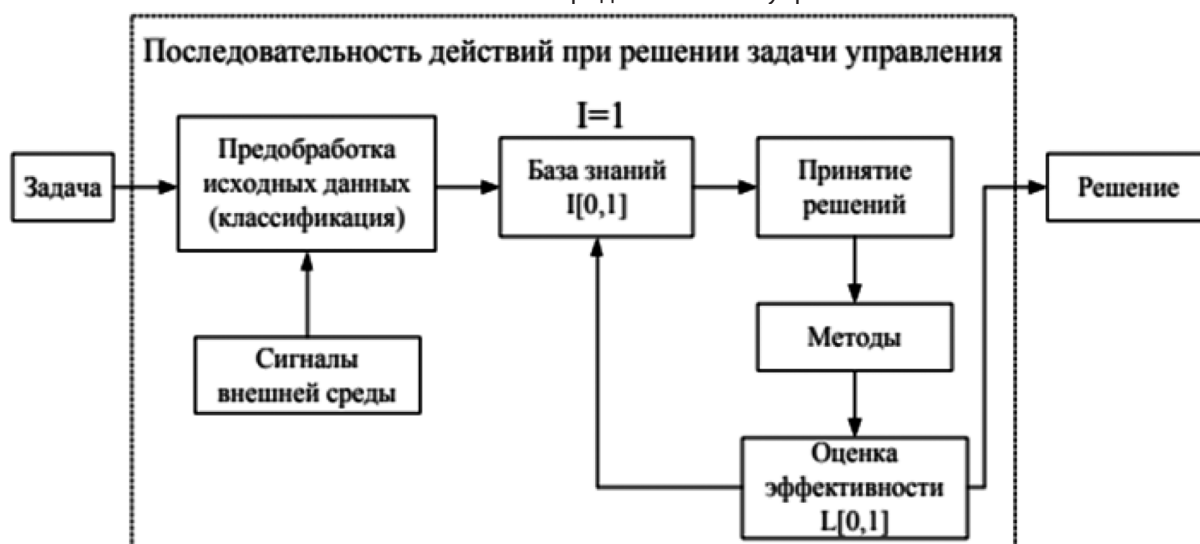


Рис. 3. Последовательность действий при решении задачи управления

- 5) выбор метода управления: при $I=1$ — переход к п.6 (классическое управление), при $I=0$ — к п.7 (нечёткое);
- 6) реализацию классического метода;
- 7) реализацию нечёткого метода;
- 8) оценку эффективности: при $L=1$ — переход к п.10, при $L=0$ — к п.9;
- 9) корректировку решения;
- 10) завершение алгоритма и вывод результата.

Рассмотренные этапы моделирования отражают структуру интеллектуальной гибридной системы управления, соответствуют её общепринятым определениям и формируют гибридный метод решения задач управления в условиях неопределённости.

В ходе исследований предложен структурированный подход к проектированию интеллектуальной гибридной системы управления, ориентированный на работу в условиях неопределённости. Определена двухуровневая архитектура системы, объединяющая обработку непрерывных сигналов на первом уровне и принятие решений на втором уровне. Моделирование реализовано через интеграцию аналитических моделей автоматического управления с эвристическими правилами, что позволяет компенсировать недостаток полной информации о параметрах объекта и среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов С.Г. Управление организационными системами на основе интеллектуальных информационных технологий: методы и алгоритмы решения управленческих задач с применением искусственного интеллекта // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. — 2025. — №2/2. — С.42–47
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. — СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. — 752 с.
3. Medsker L.R. Hybrid Intelligent Systems // International Journal of Computational Intelligence and Organizations. — 1996. — Vol. 1. — P. 10–20.
4. Yan H.H Power system security assessment using a hybrid expert system: neural network architecture / Proc. of IEEE. ISCS. New York. — 1992. — P. 1713–1716.
5. Вагин В.Н., Еремеев А.П. Реализация концепции распределенного ИИ и многоагентности в системах поддержки принятия решений на базе комплекса G2+GDA // Труды Междун. семинара «Распределённый искусственный интеллект и многоагентные системы — DIAMAS 97». — СПб., 1997.
6. Белоусов О.А. Гибридный регулятор для энергосберегающего управления электрокамерными печами // Промышленные контроллеры АСУ. — 2005. — № 7. — С. 29–30.
7. Funabashi M. Fuzzy and neural hybrid expert systems: synergetic AI // AI in Japan; IEEE Expert. — 1995. — P. 32–40.

© Аксенов Сергей Геннадьевич (beregpiya@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЫБОРА УПРАВЛЕНИЯ: ДВУХУРОВНЕВАЯ ИНТЕГРАЦИЯ КЛАССИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ НА ОСНОВЕ БИНАРНЫХ КРИТЕРИЕВ

HYBRID DYNAMIC CONTROL SELECTION ALGORITHM: TWO-LEVEL INTEGRATION OF CLASSICAL MODELS AND FUZZY LOGIC BASED ON BINARY CRITERIA

S. Aksenov

Summary. In conditions of uncertainty and incomplete a priori information, traditional management methods lose their effectiveness. A two-level intelligent hybrid system is proposed that combines classical regulation and fuzzy logic in a single adaptive cycle. The first level provides continuous management based on analytical models; the second level generates control actions based on expert rules under uncertainty. The system dynamically switches between methods based on an assessment of data availability and result quality, forming a closed loop with correction. At the same time, each step of the algorithm captures the state of the system, provides feedback, and allows you to adjust the knowledge base in real time. The approach is implemented through a formalized knowledge base, complies with the laws of hybridization, and ensures stability, fault tolerance and applicability to complex technical facilities.

Keywords: hybrid algorithm, dynamic control selection, fuzzy logic, binary criteria.

Аксенов Сергей Геннадьевич

Доктор экономических наук, профессор, ФГБОУ ВО
Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа
beregpyla@mail.ru

Аннотация. В условиях неопределённости и неполной априорной информации традиционные методы управления теряют эффективность. Предложена двухуровневая интеллектуальная гибридная система, объединяющая классическое регулирование и нечёткую логику в едином адаптивном цикле. Первый уровень обеспечивает непрерывное управление на основе аналитических моделей, второй — генерирует управляющие воздействия на основе экспертных правил при неопределённости. Система динамически переключается между методами на основе оценки доступности данных и качества результата, формируя замкнутый цикл с коррекцией. При этом каждый шаг алгоритма фиксирует состояние системы, обеспечивает обратную связь и позволяет корректировать базу знаний в реальном времени. Подход реализован через формализованную базу знаний, соответствует законам гибридизации и обеспечивает устойчивость, отказоустойчивость и применимость к сложным техническим объектам.

Ключевые слова: гибридный алгоритм, динамический выбор управления, нечёткая логика, бинарные критерии.

Современные требования к автоматизации обусловили развитие гибридных систем, способных описывать сложное непрерывно-дискретное поведение объектов, не поддающееся классическому моделированию; интеграция методов классического управления с нечёткой логикой и искусственным интеллектом позволила создавать адаптивные решения для промышленных и бытовых систем, эффективно сочетающие чёткие и нечёткие знания. Ключевым направлением остаётся повышение адаптивности — способности системы к динамической перестройке под внешние изменения, что реализуется в многокомпонентных архитектурах (комбинированных, интегрированных, объединённых, ассоциативных и распределённых), объединяющих различные методы ИИ и обеспечивающих гибкость, масштабируемость и применимость в условиях неопределённости и распределённых данных [1,5].

Графическое представление указанных архитектурных типов гибридных интеллектуальных систем приведено на рис. 1.

Комбинированные гибридные системы, такие как экспертные системы с нейросетями, интегрируют формализованные правила и неформализованные знания, интегрированные системы используют модуль-интегратор для динамического выбора и объединения выходов, объединённые — обучаемые методы (нейросети, генетические алгоритмы) для адаптации, а ассоциативные — гибко сочетают автономную и координированную работу модулей; ключевым элементом всех таких систем является база знаний, построенная на данных и экспертных правилах, что делает их незаменимыми для управления объектами с неполной априорной информацией [3].

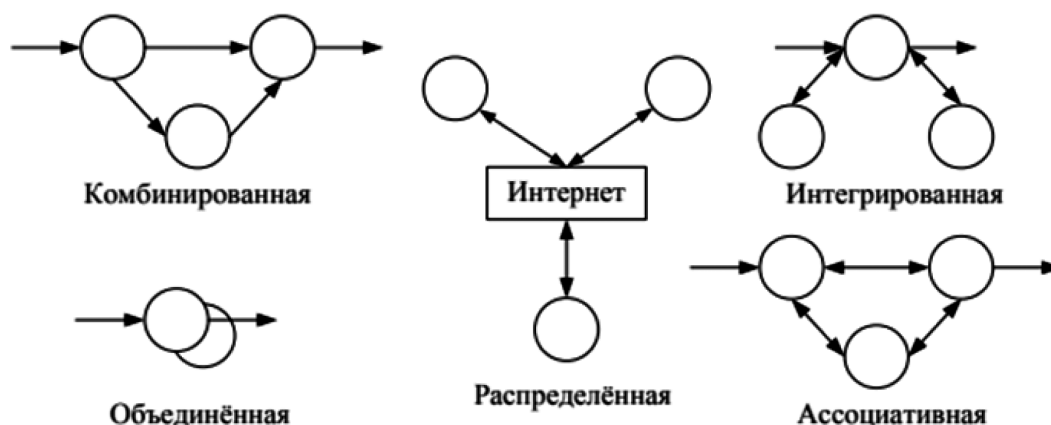


Рис. 1. Архитектуры гибридных интеллектуальных систем

Методика построения адаптивной гибридной системы включает анализ проблемной области, формализацию знаний, синтез взаимодействия классических и нечётких методов, построение модели с формированием базы правил, а также моделирование, верификацию и итеративную корректировку для обеспечения адекватности и устойчивости; основана на трёх законах гибридизации (рис. 2) [2].



Рис. 2. Двухуровневая система обработки данных

Первый уровень системы реализует формально-логическое управление на основе классических методов и программных моделей, второй — нечёткое моделирование для анализа неопределённости; их совместное функционирование позволяет интегрировать точность аналитического подхода. Двухуровневая архитектура обеспечивает информационное взаимодействие компонентов, характерное для современных организационно-технических систем, и основана на сочетании формального вывода и нечёткой логики. Последовательность решения задач управления представлена на рисунке 3 [8].

Алгоритм реализует гибридный подход: на каждой итерации сначала применяется классический метод (1),

затем — нечёткий (2), с выбором между ними на основе оценки достаточности данных [1,8].

Для формализации процесса введены бинарные переменные:

- $I=1$ — метод 1 применим, $I=0$ — нет;
- $L=1$ — решение эффективно, $L=0$ — нет.

Этапы алгоритма:

1. Постановка задачи — чёткое определение целей, входных и выходных параметров.
2. Сбор данных — приём сигналов от внешней среды для последующей обработки.
3. Предобработка — классификация и подготовка входной информации, необходимой для принятия решения о выборе метода.
4. Формирование базы знаний — структурирование априорной информации о системе.
5. Решение о выборе метода — анализ, достаточно ли информации для применения метода 1. При $I=1$ — переход к этапу 7 (нечёткий метод), если $I=0$ — переход к этапу 6 (классический метод).
6. Реализация классического метода — применение формально-логических моделей управления.
7. Реализация нечёткого метода — генерация управляющего воздействия на основе экспертных правил и неопределённых данных.
8. Оценка эффективности — проверка результата по критерию L . При $L=1$ — переход к завершению (этап 10), если $L=0$ — переход к корректировке (этап 9).
9. Корректировка — возврат к предыдущим этапам для уточнения данных или параметров.
10. Завершение — фиксация и вывод окончательного решения.

В процессе работы гибридная система не является заранее заданной статической структурой — она формируется динамически в ходе решения задачи. Гибрид возникает как последовательность взаимосвязанных от-



Рис. 3. Последовательность действий при решении задачи управления

ношений R_i , определяющих порядок и условия перехода между методами. Обязательным условием функционирования гибрида является установление приоритетов между автономными методами, входящими в его состав.

Таким образом, описанная последовательность действий при решении задачи управления представляет собой гибридный метод, что позволяет классифициро-

вать используемый подход как гибридный алгоритм. Интеграция аналитических и статистических моделей с нечёткими системами обосновывает переход к интеллектуальной гибридной системе управления. Такое сочетание обеспечивает многоаспектность анализа и повышает эффективность управления в условиях неопределённости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов С.Г. Управление организационными системами на основе интеллектуальных информационных технологий: методы и алгоритмы решения управленческих задач с применением искусственного интеллекта // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. — 2025. — №2/2. — С 42–47
2. Pacheco R. et al. A hybrid intelligent system applied to financial statement analysis // Proc. of 5th FUZZ IEEE. New Orleans. — 1996. — P. 1007–1012.
3. Herrmann C.A. hybrid fuzzy-neural expert system for diagnosis // Proc. of IJCAI. Montreal. — 1995. — P. 1–10.
4. Froning J.N., Olson M.D., Froelicher V.F. Exercise ECG analysis and measurement using an expert system approach // Proc. of 10th IC. IEEE Engineering in medicine & biology society. — 1988. — P. 1–2.
5. Yan H.H. et al. Power system security assessment using a hybrid expert system/neural network architecture // Proc. of IEEE. ISCS. New York. — 1992. — P. 1713–1716.
6. Sivathanan S., Cecelja F., Balachandran W. ECG Diagnosis using neural network and fuzzy expert system // Proc. of PREP'99. UMIST. Manchester. — 1999. — P. 340–343.
7. El_Fergany A.A., Yousef M.T., El_Ailaly A.A. Fault diagnosis in power systems — substation level — through hybrid artificial neural networks and expert system // IEEE. — 2001. — P. 207–211.
8. Гаврилов А.В. Гибридные интеллектуальные системы: Монография. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. — 142 с.

© Аксенов Сергей Геннадьевич (beregpiya@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.01.05

МЕТОДИКА НАПОЛНЕНИЯ МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО ОБЪЕКТА ИЗ РАЗНОРОДНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ НА ОСНОВЕ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ДАННЫХ

METHODOLOGY FOR POPULATING A DIGITAL OBJECT MODEL FROM HETEROGENEOUS INFORMATION RESOURCES BASED ON QUANTITATIVE ASSESSMENT OF DATA EXTRACTION METHODS EFFICIENCY

A. Artamonov

Summary. The increasing volume of unstructured scientific data requires the development of effective methodologies for automated extraction and structuring of information. The relevance of the study is determined by the need to create holistic models of digital objects for subsequent comprehensive analysis under conditions of data source heterogeneity. The problem lies in the absence of a quantitatively substantiated methodology for selecting optimal approaches to data extraction from various types of documents while ensuring required reliability of results. The purpose of this work is to develop and verify a methodology for populating a digital object model from heterogeneous information resources with quantitative assessment of the effectiveness of applied data extraction methods using scientific publications as an example.

Keywords: data extraction, digital object, scientific publications, NLP, reliability assessment, NoSQL, document-oriented databases.

Артамонов Алексей Анатольевич

Кандидат технических наук,
Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», Москва
aaartamonov@mephi.ru

Аннотация. Возрастающий объем неструктурированных научных данных требует разработки эффективных методик автоматизированного извлечения и структурирования информации. Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания целостных моделей цифровых объектов для последующего многостороннего анализа в условиях гетерогенности источников данных. Проблема заключается в отсутствии количественно обоснованной методологии выбора оптимальных подходов к извлечению данных из различных типов документов при обеспечении требуемой достоверности результатов. Цель работы — разработать и верифицировать методику наполнения модели цифрового объекта из разнородных информационных ресурсов с количественной оценкой эффективности применяемых методов извлечения данных на примере научных публикаций.

Ключевые слова: извлечение данных, цифровой объект, научные публикации, NLP, оценка достоверности, NoSQL, документоориентированные базы данных.

Введение

Стремительное накопление научных данных в цифровой среде создало фундаментальный вызов для современных информационных систем: как эффективно преобразовать разрозненные неструктурированные данные в целостные модели цифровых объектов, пригодные для аналитической обработки. По данным Scopus, количество научных публикаций увеличилось с 2,1 млн в 2010 году до 4,8 млн в 2023 году, что представляет собой рост в 2,3 раза за 13 лет [1]. Этот экспоненциальный рост сопровождается увеличением гетерогенности источников данных: научные публикации представлены в форматах PDF, HTML, XML, DOCX, причем каждый формат требует специфических методов обработки [2, 3].

Актуальность данного исследования обусловлена тем, что существующие подходы к извлечению данных из научных публикаций не предоставляют количественно обоснованной методологии выбора оптимальных методов для различных типов документов. Большинство исследований фокусируются на описании отдельных техник извлечения, не проводя систематического сравнительного анализа их эффективности [4, 5]. Между тем, выбор неоптимального метода может приводить к потере до 30–40 % ценной информации или требовать в 5–10 раз больше вычислительных ресурсов [6]. Проблема усугубляется необходимостью оценки достоверности извлекаемых данных, особенно в контексте критически важных технологических областей. Неверная или недостоверная научная информация может привести к ошибочным решениям на уровне государственной по-

литики в области науки и технологий [7]. Существующие библиометрические показатели (импакт-фактор, индекс Хирша, квартиль журнала) используются разрозненно, отсутствует интегральная метрика, позволяющая автоматизированно оценивать надежность источника с учетом множественных факторов [8, 9].

Таким образом, исследование направлено на разработку комплексной методики, которая не только описывает процесс извлечения и структурирования данных, но и предоставляет количественные критерии выбора оптимальных подходов для различных сценариев обработки, а также инструментарий для автоматизированной оценки достоверности полученной информации. Это позволит повысить качество формируемых баз знаний и эффективность последующего аналитического процесса.

Материалы и методы исследования

В качестве эмпирической базы для настоящего исследования был использован корпус из 2847 научных публикаций, охватывающий период с 2020 по 2024 год и представленный в различных форматах. Распределение документов по форматам составило: PDF — 1423 документа (50,0 %), HTML — 768 документов (27,0 %), структурированный XML (включая JATS) — 456 документов (16,0 %), смешанные и прочие форматы — 200 документов (7,0 %). Публикации были отобраны из баз данных Scopus, Web of Science Core Collection и Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) по тематическим направлениям информационных технологий, системного анализа и обработки данных. Для оценки качества извлечения данных использовалась контрольная выборка из 500 публикаций с ручной разметкой, выполненной экспертами предметной области. Разметка включала выделение всех целевых элементов: заголовков, авторов с аффилиациями, аннотаций, ключевых слов, основного текста, таблиц, изображений, библиографических списков. Метрики качества рассчитывались на основе стандартных показателей: точность (precision), полнота (recall) и F1-мера [10]. Методология исследования носила комплексный экспериментально-аналитический характер. Первым этапом была реализация и тестирование трех основных подходов к извлечению данных:

Rule-based подход — использование регулярных выражений и шаблонов для извлечения структурированных элементов. Реализован на базе библиотек Python (re, BeautifulSoup, lxml). Гибридный подход — комбинация правил с методами машинного обучения для повышения адаптивности. Использовались предобученные модели BERT и RuBERT для классификации разделов и именованного распознавания сущностей (NER).

Векторизованный подход — применение техник word embeddings и трансформеров для семантически-

го анализа и извлечения. Реализован с использованием библиотек transformers и sentence-transformers. Вторым этапом проводился сравнительный анализ производительности и качества работы каждого подхода на различных типах документов. Измерялись следующие параметры: время обработки одного документа, точность извлечения метаданных, полнота извлечения текстового контента, способность к масштабированию (обработка пакетов документов) [11]. Третьим этапом была разработка интегрального показателя достоверности научной публикации на основе библиометрических критериев. Показатель рассчитывался по формуле:

$$D = w_1 Q^{-1} + w_2 H_{\{norm\}} + w_3 C_{\{max\}} + w_4 Aff_{\{max\}}$$

где Q — квартиль журнала (обратное значение: $Q1=4$, $Q2=3$, $Q3=2$, $Q4=1$); $H_{\{norm\}}$ — нормализованный индекс Хирша ведущего автора; $C_{\{max\}}$ — максимальный коэффициент авторитетности страны; $Aff_{\{max\}}$ — максимальный коэффициент престижности организации; w_i — весовые коэффициенты, определяемые методом главных компонент, $\sum_{i=1}^{(4)} w_i = 1$ [12].

Для определения весовых коэффициентов была собрана обучающая выборка из 300 публикаций с экспертными оценками достоверности (шкала 0–100). Применялся метод главных компонент (PCA) с последующей линейной регрессией для минимизации среднеквадратичной ошибки между расчетным показателем и экспертной оценкой.

Организация хранения данных осуществлялась в документоориентированной NoSQL базе данных MongoDB с использованием разработанной JSON-схемы. Схема включала поля для всех типов метаданных, текстового контента, извлеченных сущностей, геолокационных данных и временных меток. Для полнотекстового поиска дополнительно использовалась система Elasticsearch с настроенными анализаторами для русского и английского языков [13].

Результаты и обсуждение

Анализ эффективности различных подходов к извлечению данных требует перехода от качественных описаний к строгим количественным метрикам. Центральным вопросом исследования является определение оптимального метода извлечения для различных типов документов с учетом баланса между точностью, полнотой и производительностью. Интуитивное предположение о превосходстве сложных методов машинного обучения над простыми правилами требует эмпирической верификации на репрезентативной выборке.

Для объективной оценки было проведено систематическое сравнение трех подходов (rule-based, гибридный,

Таблица 1.

Сравнительная эффективность методов извлечения базовых метаданных из документов различных форматов

Тип документа	Rule-based подход		Гибридный подход		Векторизованный подход	
	Точность, %	Полнота, %	Точность, %	Полнота, %	Точность, %	Полнота, %
Структурированный XML (JATS)	94,8	89,3	93,1	92,7	89,4	91,8
HTML с разметкой	87,3	72,5	90,8	88,9	92,1	94,3
PDF с распознаванием текста	76,2	61,8	89,5	85,3	91,7	89,6
PDF отсканированные документы	58,4	45,2	82,6	78,9	87,3	85,1
Средневзвешенное значение	82,1	69,8	89,7	86,7	90,5	90,4

векторизованный) по метрикам точности и полноты извлечения базовых метаданных из документов различных форматов. Гипотеза исследования заключалась в том, что эффективность метода существенно зависит от степени структурированности исходного документа, и не существует универсального оптимального подхода для всех типов данных. Количественные результаты, представленные в таблице 1, призваны верифицировать эту гипотезу.

Анализ данных таблицы 1 выявляет сложную зависимость эффективности извлечения от степени структурированности исходных документов и выбранного метода. Для высокоструктурированных XML-документов rule-based подход демонстрирует максимальную точность (94,8 %), что объясняется наличием четких тегов разметки и стандартизированной структуры JATS XML. Однако полнота извлечения составляет только 89,3 %, поскольку жесткие правила не способны обработать документы с отклонениями от стандарта.

Гибридный подход показывает более сбалансированные результаты: незначительное снижение точности до 93,1 % компенсируется повышением полноты до 92,7 %. Математически это выражается в росте F1-меры с 91,96 до 92,90, что свидетельствует о лучшей общей эффективности. Векторизованный подход демонстрирует снижение точности до 89,4 % из-за вероятностной природы нейросетевых предсказаний, но обеспечивает стабильную полноту 91,8 %. Наиболее драматические различия наблюдаются при обработке слабоструктурированных PDF-документов. Для отсканированных PDF rule-based методы показывают точность всего 58,4 % и полноту 45,2 %, что делает их практически неприменимыми. Гибридный подход повышает метрики до 82,6 % и 78,9 % соответственно, увеличивая F1-меру с 50,98 до 80,69 — рост на 58,3 %. Векторизованный подход достигает максимальных показателей: 87,3 % точности и 85,1 % полноты, что дает F1-меру 86,19. Средневзвешенные значения (с учетом распределения типов документов в выборке) показывают преимущество современных подходов: переход от rule-based к ги-

бридному методу повышает точность на 9,3 % и полноту на 24,2 %, а векторизованный подход обеспечивает дальнейший прирост до 90,5 % и 90,4 % соответственно. Критически важно, что выигрыш сложных методов максимален именно для наиболее проблемных типов документов, что оправдывает их применение в гетерогенных корпусах.

Однако высокая эффективность извлечения данных теряет практическую ценность, если время обработки делает систему неприменимой для работы с большими объемами информации. Поэтому необходимо оценить производительность каждого подхода и выявить зависимость времени обработки от сложности метода и объема обрабатываемых данных (табл. 2).

Таблица 2.

Производительность методов извлечения данных и масштабируемость при обработке корпусов различного объема

Метод извлечения	Время обработки 1 документа, сек	Время обработки пакета (100 док.), сек	Время обработки корпуса (1000 док.), сек	Коэффициент масштабируемости
Rule-based подход	1,3	118,7	1247,3	0,96
Гибридный подход (CPU)	8,7	782,1	8356,8	0,96
Гибридный подход (GPU)	8,7	247,3	1893,4	0,22
Векторизованный (CPU)	12,4	1098,5	11782,9	0,95
Векторизованный (GPU)	12,4	156,2	982,7	0,08

Примечание: коэффициент масштабируемости рассчитан как $(T_{1000} / (T_1 \cdot 1000)) - 1$, где отрицательные значения указывают на сверхлинейное ускорение при пакетной обработке.

Данные таблицы 2 демонстрируют критическую важность выбора вычислительной архитектуры для сложных методов извлечения. Rule-based подход показывает наименьшее время обработки одного документа (1,3 секунды) благодаря простоте операций. Коэффициент масштабируемости 0,96 указывает на практически линейную зависимость времени от объема данных, что является ожидаемым для последовательной обработки. Гибридный подход требует значительно больше времени на один документ (8,7 секунд) из-за применения моделей машинного обучения. При CPU-вычислениях обработка корпуса из 1000 документов занимает 8356,8 секунд (около 2,3 часов), что может быть неприемлемо для оперативных задач. Однако использование GPU-ускорения снижает время до 1893,4 секунд (31,6 минуты) — сокращение в 4,4 раза. Коэффициент масштабируемости 0,22 для GPU-версии показывает существенный выигрыш от пакетной обработки.

Наиболее впечатляющие результаты демонстрирует векторизованный подход при GPU-ускорении. Несмотря на максимальное время обработки одного документа (12,4 секунды), пакетная обработка 1000 документов занимает всего 982,7 секунды (16,4 минуты) благодаря эффективному распараллеливанию матричных операций. Коэффициент масштабируемости 0,08 означает, что обработка корпуса требует менее 8 % времени от наивной оценки T_1 1000, что свидетельствует о почти десятикратном ускорении.

Математический анализ отношения качества к производительности показывает, что оптимальный выбор метода зависит от конкретных требований задачи. Для задач реального времени с высокоструктурированными данными rule-based подход остается конкурентоспособным. Для корпусных исследований с гетерогенными документами векторизованный подход с GPU-ускорением обеспечивает наилучший баланс: максимальное качество ($F1 = 90,45$) при приемлемой производительности (менее 1 секунды на документ в пакетном режиме).

Высокая эффективность извлечения данных создает основу для построения репрезентативных моделей цифровых объектов, однако практическая ценность собранной информации критически зависит от ее достоверности. Особую важность оценка надежности приобретает в контексте научно-технической информации, где ошибочные данные могут привести к неверным исследовательским или управленческим решениям. Разработанный интегральный показатель достоверности требует эмпирической валидации для подтверждения его практической применимости (табл. 3).

Анализ данных таблицы 3 показывает критическую важность правильного выбора весовых коэффициентов для интегрального показателя достоверности. Наивный подход с равными весами ($w_i = 0,25$) демонстрирует корреляцию 0,67 с экспертными оценками и RMSE 18,4, что указывает на недостаточную прогностическую силу такой модели. Среднеквадратичная ошибка 18,4 на шкале 0–100 означает, что предсказания могут отклоняться от экспертной оценки почти на 20 %, что неприемлемо для практического применения.

Подход с весами, предложенными экспертами предметной области ($w_{1=0,40}$, $w_{2=0,35}$), основан на их интуитивном понимании относительной важности критериев. Этот набор повышает корреляцию до 0,79 и снижает RMSE до 12,7, что представляет собой улучшение на 31 % по сравнению с равными весами. Эксперты придают наибольшее значение квартилю журнала и индексу Хирша автора, рассматривая географические и институциональные факторы как второстепенные. Оптимизация весов методом главных компонент с последующей регрессией дает наилучшие результаты: корреляция 0,84 и RMSE 9,3. Математически это означает, что 70,6 % ($R^2 = 0,84^2 = 0,706$) дисперсии экспертных оценок объясняется линейной комбинацией четырех библиометрических критериев. Оптимальные веса ($w_{1=0,38}$, $w_{2=0,42}$, $w_{3=0,12}$, $w_{4=0,08}$) близки к экспертным оценкам, но придают несколько большее значение индексу Хирша (0,42 против 0,35) за счет снижения весов страны и аффилиации.

Таблица 3.

Корреляция интегрального показателя достоверности с экспертными оценками при различных наборах весовых коэффициентов

Набор весов	w_1 (Квартиль)	w_2 (h-индекс)	w_3 (Страна)	w_4 (Аффилиация)	Корреляция Пирсона	RMSE
Равные веса	0,25	0,25	0,25	0,25	0,67	18,4
Экспертная оценка	0,40	0,35	0,15	0,10	0,79	12,7
РСА-оптимизированные	0,38	0,42	0,12	0,08	0,84	9,3
Максимизация h-индекса	0,10	0,70	0,10	0,10	0,71	15,2
Максимизация квартиля	0,70	0,10	0,10	0,10	0,74	14,1

Примечание: корреляция Пирсона рассчитана на тестовой выборке из 150 публикаций; RMSE (Root Mean Square Error) — среднеквадратичная ошибка предсказания экспертной оценки.

Попытки максимизировать вес одного критерия приводят к ухудшению общей точности. Набор с $w_{2=0},70$ (максимизация h-индекса) дает корреляцию 0,71, а набор с $w_{1=0},70$ (максимизация квартиля) — 0,74. Это подтверждает гипотезу о необходимости мультикритериального подхода: ни один показатель в отдельности не является достаточным для надежной оценки достоверности научной публикации.

Дисперсия оптимальных весов невелика: стандартное отклонение составляет 0,15, что свидетельствует об относительно сбалансированном вкладе различных критериев. Тем не менее, доминирование квартиля и h-индекса (совместный вес 0,80) подтверждает их ключевую роль в оценке качества научных работ, что согласуется с результатами предыдущих исследований [14, 15]. Практическая значимость разработанного показателя заключается в возможности автоматизированной фильтрации и ранжирования больших массивов научных публикаций. При пороговом значении D 0,65 достигается точность отбора качественных публикаций 88,3 % при полноте 84,7 % (по сравнению с ручной экспертной оценкой). Это позволяет сократить объем ручной верификации в 5–7 раз, сохраняя высокое качество итогового датасета.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует комплексный подход к решению актуальной задачи построения моделей цифровых объектов из гетерогенных информационных ресурсов с количественно измеримым качеством. Разработанная методика, включающая этапы извлечения, обогащения и оценки достоверности данных, была верифицирована на корпусе из 2847 научных публикаций.

Ключевым результатом является установление количественных зависимостей эффективности методов извлечения от типа исходных документов. Показано,

что для высокоструктурированных XML-документов rule-based подход обеспечивает точность 94,8 % при минимальных вычислительных затратах, в то время как для слабоструктурированных отсканированных PDF векторизованный подход с GPU-ускорением повышает F1-меру с 51 % до 86 % по сравнению с простыми правилами. Это подтверждает отсутствие универсального оптимального решения и необходимость адаптивного выбора метода в зависимости от характеристик данных.

Практическая значимость работы заключается в разработке интегрального показателя достоверности научных публикаций, основанного на оптимизированной комбинации библиометрических критериев. Достигнутая корреляция 0,84 с экспертными оценками при весовых коэффициентах $w_{1=0},38$ (квартиль), $w_{2=0},42$ (h-индекс), $w_{3=0},12$ (страна), $w_{4=0},08$ (аффилиация) позволяет автоматизировать предварительную фильтрацию данных с точностью 88,3%, сокращая объем ручной верификации в 5–7 раз. Ограничения исследования включают зависимость точности извлечения от качества исходных документов (для документов с битыми шрифтами или сильно искаженной структурой показатели снижаются на 15–20 %) и необходимость адаптации весовых коэффициентов показателя достоверности для различных предметных областей. В медицинских науках импакт-факторы журналов значительно выше, чем в математике, что требует нормализации по дисциплине. Дальнейшее развитие исследования связано с интеграцией больших языковых моделей (LLM) для повышения семантической точности извлечения отношений между сущностями, расширением типологии обрабатываемых документов (включая презентации, патенты, технические отчеты), а также разработкой адаптивных алгоритмов автоматического выбора оптимального метода извлечения на основе предварительного анализа структуры документа. Особый интерес представляет исследование применимости подхода к мультимодальным документам, содержащим комплексные визуализации данных и интерактивные элементы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Visser M., van Eck N.J., Waltman L. Large-scale comparison of bibliographic data sources: Scopus, Web of Science, Dimensions, Crossref, and Microsoft Academic // Quantitative Science Studies. 2021. Vol. 2. No. 1. P. 20–41. DOI: 10.1162/qss_a_00018.
2. Сулейманов Р.Р., Бусыгина И.С. Методы и подходы к автоматической обработке текстовой информации при реализации систем извлечения данных // Российский технологический журнал. 2021. Т. 9. № 1. С. 7–17.
3. Барахнин В.Б., Кожемякина О.Ю., Мухамедиев Р.И., Борзилова Ю.С., Якунин К.О. Проектирование структуры программной системы обработки корпусов текстовых документов // Бизнес-информатика. 2019. № 4. С. 60–72. DOI: 10.17323/1998-0663.2019.4.60.72.
4. Zhang R., Meng Z., Wang H., Liu T., Wang G., Zheng L., Wang C. Hyperscale data analysis-oriented optimization mechanisms for higher education management systems platforms with evolutionary intelligence // Applied Soft Computing. 2024. Vol. 155. Article 111460. DOI: 10.1016/j.asoc.2024.111460
5. Жучкова С.В., Ротмистров А.Н. Автоматическое извлечение текстовых и числовых веб-данных для целей социальных наук // Социология: методология, методы, математическое моделирование. 2020. № 50–51. С. 141–183.
6. Lee S.J., Siau K. A review of data mining techniques // Industrial Management & Data Systems. 2001. Vol. 101. No. 1. P. 41–46. DOI: 10.1108/02635570110365989.
7. Inkina V.A., Antonov E.V., Artamonov A.A., Ionkina K.V., Tretyakov E.S., Cherkasskiy A.I. Multiagent information technologies in system analysis // Proceedings of the 27th International Symposium Nuclear Electronics and Computing (NEC'2019). Budva, Montenegro. 2019. P. 195–199. DOI: 10.1109/NEC.2019.00047.

8. Hirsch J.E. An index to quantify an individual's scientific research output // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2005. Vol. 102. No. 46. P. 16569–16572. DOI: 10.1073/pnas.0507655102.
9. Franceschini F., Maisano D., Mastrogiacomio L. The museum of errors/horrors in Scopus // *Journal of Informetrics*. 2016. Vol. 10. No. 1. P. 174–182. DOI: 10.1016/j.joi.2015.11.006.
10. Wu X., Kumar V., Quinlan J.R., Ghosh J., Yang Q., Motoda H., McLachlan G.J., Ng A., Liu B., Yu P.S. Top 10 algorithms in data mining // *Knowledge and Information Systems*. 2008. Vol. 14. No. 1. P. 1–37. DOI: 10.1007/s10115-007-0114-2
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. Egghe L. Theory and practise of the g-index // *Scientometrics*. 2006. Vol. 69. No. 1. P. 131–152. DOI: 10.1007/s11192-006-0144-7.
13. Banker K., Bakkum P., Verch S., Garrett D., Hawkins T. *MongoDB in Action: Covers MongoDB version 3.0. Second Edition*. Manning Publications, 2016. 480 p. ISBN: 978-1-617-29160-9.
14. Bornmann L., Mutz R., Hug S.E., Daniel H.-D. A multilevel meta-analysis of studies reporting correlations between the h index and 37 different h index variants // *Journal of Informetrics*. 2011. Vol. 5. No. 3. P. 346–359. DOI: 10.1016/j.joi.2011.01.006.
15. Waltman L., van Eck N.J. The inconsistency of the h-index // *Journal of the American Society for Information Science and Technology*. 2012. Vol. 63. No. 2. P. 406–415. DOI: 10.1002/asi.21678.

© Артамонов Алексей Анатольевич (aartamonov@mephi.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ ТРЕНАЖЕРА, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО ДОПОЛНЕННУЮ ВИРТУАЛЬНУЮ РЕАЛЬНОСТЬ

A MODEL OF THE RELIABILITY OF THE COMPUTER SYSTEM OF A SIMULATOR USING AUGMENTED VIRTUAL REALITY

**A. Arhangelsky
R. Yukhimuk**

Summary. The article describes the reliability model of the computer part of the simulator equipment. The practical significance of the approach described in the article is to determine the reliability parameters of the computer system of a simulator using a cylindrical screen that allows you to simulate the image of the environment on the ground. The properties of the simulator for the formation of individual effects on the operator are considered. A brief description of virtual and augmented reality technology is provided.

Keywords: simulators, reliability model, virtual reality, augmented reality.

Архангельский Алексей Алексеевич

Кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
arhangelsky@yandex.ru

Юхимук Роман Алексеевич

научный сотрудник,
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
mkpostra@mail.ru

Аннотация. В статье приведено описание модели надежности компьютерной части оборудования тренажера. Практическая значимость подхода, описанного в статье, заключается в определении параметров надежности компьютерной системы тренажера, использующего цилиндрический экран, который позволяет имитировать изображение окружающей обстановки на местности. Рассмотрены свойства тренажера по формированию отдельных воздействий на оператора. Приведено краткое описание технологий виртуальной и дополненной реальности.

Ключевые слова: тренажеры, модель надежности, виртуальная реальность, дополненная реальность.

Введение

При формировании профессиональных навыков, необходимых оператору при работе в реальных условиях, используются тренажеры. Этот способ обучения применяется для операторов (водителей): трейлеров, кранов, погрузчиков и другой специальной техники, которая не может использоваться для обучения, по различным причинам, например, большой расход горючего или электроэнергии, размещение оборудования в местах, где обучение невозможно и т.д.

Для усиления психологического эффекта в процессе обучения используются средства позволяющие воспроизвести элементы окружающей обстановки при работе оператора. Одним из направлений развития таких систем является использование в тренажерах технологии виртуальной реальности.

Данная работа посвящена рассмотрению тренажера, в котором используются элементы систем виртуальной реальности.

Актуальность темы определяется распространением технологий, использующих виртуальную реальность

на тренажерах, и необходимостью дальнейшего развития направления по применению дополненной виртуальной реальности.

Целью статьи является определение вероятностных характеристик надежности компьютерной системы тренажера с использованием технологии виртуальной реальности.

Элементы технологии виртуальной реальности

Виртуальная реальность (VR) — это семейство информационных технологий, основанных на использовании интерактивного интерфейса, человек-машина, оказывающего на систему восприятия оператора воздействие, которое заменяет реальную среду таким образом, что у оператора создается впечатление взаимодействия с искусственной средой, создаваемой техническими средствами [1–3].

При создании эффектов VR могут использоваться следующие устройства [2]:

- индивидуальные системы визуализации — шлемы виртуальной реальности;
- системы трекинга — отслеживания положения глаз и движения тела оператора;

- устройства, имитирующие тактильные, вестибулярные и другие ощущения — поворачивающиеся платформы и кресла; вибрирующие поверхности; генераторы движения воздуха, воды; генераторы запаха, дыма;
- системы интерактивного взаимодействия в виртуальной среде — различные устройства управления виртуальными объектами, а именно, трехмерные координатные указатели, перчатки, джойстики и управляющие устройства, имеющие большое число степеней свободы;
- программное обеспечение, которое по датчикам отслеживания положения глаз и движения тела оператора формирует визуальные и другие воздействия на органы чувств оператора.

Тренажеры с элементами программных средств дополненной реальности

Применение тренажеров при подготовке операторов снижает материальные затраты на их подготовку за счет исключения повреждений реальных технических объектов в процессе обучения.

Уровень детализации структурной схемы тренажера может быть различным. Можно представить тренажер как структуру, включающую рабочее место оператора, компьютерную систему, пульт управления инструктора с периферийными устройствами, систему имитации окружающей обстановки. Такая структура отражает основные элементы тренажеров различного назначения и удобна для анализа способов построения тренажерных систем.

Для имитации окружающей обстановки в тренажерах используется система виртуальной реальности. При массовом использовании тренажеров одним из направлений является применение таких систем, в которых технологии VR используются частично.

Тренажеры, в которых часть оборудования является реальной (кабина, органы управления), относятся к системам дополненной реальности (Augmented reality). Первоначально термин дополненная реальность использовался для определения систем, в которых деятельность оператора дополнялась компьютерными средствами. Впоследствии под термином дополненная реальность подразумевалась возможность на реальную картину, видимую наблюдателем, нанести синтезированное изображение в виде графиков, символов и т. п. [1, 2].

Кабина с органами управления может дополняться следующими элементами:

- система имитации визуальной обстановки;
- звуковое сопровождение (звук работы имитируемого устройства, звук при торможении, сигналы других систем, звуки при аварийных ситуациях);

- имитация воздействий на вестибулярный аппарат оператора (платформа для поворота и наклона кабины).

В описываемом тренажере не используются визуальные стереоэффекты, поскольку специальная техника, для которой готовят операторов, является наземной. В связи с этим сложные устройства вроде коллимационной системы визуализации, основанной на отражении сферического просветного экрана от сферического зеркала, не применяются.

Для имитации изображения окружающей среды на данном тренажере используется цилиндрический проекционный экран с широким углом обзора. Для таких изогнутых панорамных экранов применяется специальная система из 3–4 проекторов, которая создает единое изображение. Рама для экрана является несущей конструкцией для размещения проекторов, что позволяет установить его в любом помещении. Обычно, на цилиндрических панорамных экранах используется фронтальная проекция, поэтому основным материалом для их изготовления являются белое поливинилхлоридное полотно. При проектировании экранов устанавливаются основные углы обзора: 60, 90, 120, 180, 270 градусов. В данном случае при диаметре экрана 9 м, высоте 3 м и угле обзора по горизонтали 270 градусов, поле зрения оператора, находящегося в кабине, охватывается полностью. Четкость и предел зернистости изображения зависит от разрешающих параметров матрицы и удаленности оператора от экрана [4, 5].

При введении системы дополненной реальности для имитации визуальной обстановки в виде изображения на экране отпадает необходимость в части элементов из полного набора устройств VR.

В таком тренажере можно не использовать:

- системы трекинга;
- системы интерактивного взаимодействия в виртуальной среде;
- программное обеспечение, которое по датчикам отслеживает положения глаз оператора.

Изображение, получаемое на основе шлема виртуальной реальности, может вызывать у оператора головокружение, тошноту и другие симптомы «морской болезни». Формирование изображения на проекционном экране не дает таких негативных эффектов и не так сильно влияет на физиологические процессы обучаемых [5].

Параметры надежности управляющего компьютера

В базовую конфигурацию ПК для управления тренажером включаются следующие основные устройства:

- системный блок;
- монитор;
- клавиатура;
- координатный указатель.

Компьютер с точки зрения надежности представляет собой соединение сложных устройств, каждое из которых оказывает влияние на работу других компонентов.

Далее приведен перечень основных элементов ПК в порядке увеличения срока работоспособного состояния:

- видеокарта (3 года);
- блок питания ПК (4 года);
- материнская плата (4 года);
- жесткий диск (5 лет).

Средняя длительность работы ПК без ремонта в нормальных условиях по температуре и влажности составляет от 3 до 5 лет [6].

Из процессоров, управляющих отдельными элементами тренажера, составляется многопроцессорная система.

Тренажер состоит из нескольких модулей, каждый из которых имеет отдельный процессор:

- модуль с рабочим местом водителя на подвижной платформе;
- система с программным обеспечением и устройством согласования, обеспечивающим совместную работу датчиков органов управления тренажера;
- визуально-акустический модуль, состоящий из проекционного экрана, с помощью которого моделируется визуальная информация; из акустических колонок, которые воспроизводят основные шумы, возникающие при движении технических систем (шум работы техники, звук шин при торможении и т.д.), а также акустические характеристики работы различных агрегатов и систем (звук пуска двигателя) [7–10].

Вероятностные характеристики функционирования многопроцессорной системы по надежности

Рассмотрим модель процесса технического обслуживания, в которой учитывается восстановление работоспособности объектов.

В соответствии с обозначениями классификации видов СМО и случайных процессов модель вида $M|M|1$ раскрывается следующим образом [11]:

M — марковский процесс поступления заявок на обслуживание (интервалы времени между приходом заявок распределены по экспоненциальному закону);

M — марковский процесс времени обслуживания заявок (время обслуживания заявок распределено по экспоненциальному закону).

1 — количество ремонтных бригад.

Буферный накопитель, в который помещаются заявки на восстановление работоспособности объектов, находится на сервере системы технического обслуживания.

В данном случае принимается модель потока, в которой заявки на восстановление работоспособности объектов приходят в разные промежутки времени, на бесконечно малом интервале времени появляется не более одной заявки (ординарность потока). Для этого потока существуют характеристики случайного процесса (среднее значение, дисперсия и т.д.), которые не зависят от времени поступления заявок (стационарность потока). Заявки не зависят друг от друга, порядок их поступления не влияет на процесс обслуживания (поток без последовательности).

На рисунке 1 показан граф модели СМО для определения вероятностных характеристик надежности многопроцессорной системы тренажера.

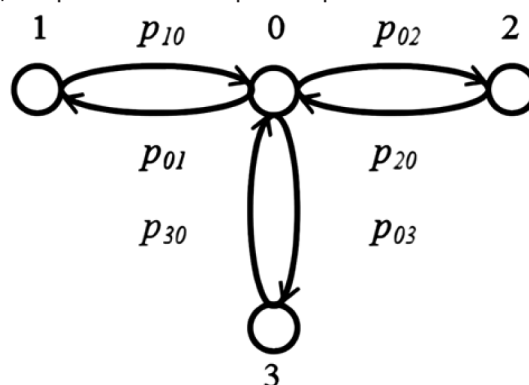


Рис. 1. Граф модели СМО для определения надежности многопроцессорной системы тренажера

В соответствии с графом многопроцессорная система тренажера может находиться в следующих состояниях [11, 12]:

- 0 — система работоспособна;
- 1 — процессор модуля с рабочим местом водителя неработоспособен;
- 2 — процессор модуля согласования неработоспособен;
- 3 — процессор визуально-акустического модуля неработоспособен.

На рисунке 1 переходные вероятности системы обозначены следующим образом:

- p_{01} — вероятность перехода системы из состояния 0 в состояние 1;
- p_{10} — вероятность перехода системы из состояния 1 в состояние 0;

- p_{02} — вероятность перехода системы из состояния 0 в состояние 2;
- p_{20} — вероятность перехода системы из состояния 2 в состояние 0;
- p_{03} — вероятность перехода системы из состояния 0 в состояние 3;
- p_{30} — вероятность перехода системы из состояния 3 в состояние 0.

Финальные состояния системы имеют следующий вид:

- p_0 — вероятность того, что система работоспособна;
- p_1 — процессор модуля с рабочим местом водителя неработоспособен;
- p_2 — вероятность того, что процессор модуля согласования неработоспособен;
- p_3 — вероятность того, что процессор визуально-акустического модуля неработоспособен;
- p — отношение интервала времени, когда система неработоспособна, к интервалу времени, когда система работоспособна.

Вероятности состояний для модели надежности многопроцессорной системы определяются из следующих уравнений:

$$p_1 = p_0 p_1, \quad (1.1)$$

$$p_2 = p_0 p_2, \quad (1.2)$$

$$p_3 = p_0 p_3, \quad (1.3)$$

$$p_0 + p_1 + p_2 + p_3 = 1, \quad (2)$$

после преобразования уравнения (2)

$$p_0 + p_0 p_1 + p_0 p_2 + p_0 p_3 = 1, \text{ находим величину } p_0.$$

Далее приведен пример определения вероятностей p_0, p_1, p_2, p_3 :

$$p_0 = 1 / (1 + p_1 + p_2 + p_3),$$

$$p_1 = 4 \times 10^{-3},$$

$$p_2 = 3 \times 10^{-3},$$

$$p_3 = 2 \times 10^{-3},$$

$$p_0 = 0,991.$$

Значения вероятностей p_0, p_1, p_2, p_3 приведены ниже:

$$p_1 = 0,991 \times 4 \times 10^{-4} = 39,64 \times 10^{-4},$$

$$p_2 = 0,991 \times 3 \times 10^{-4} = 29,73 \times 10^{-4},$$

$$p_3 = 0,991 \times 2 \times 10^{-4} = 19,82 \times 10^{-4}.$$

Значение вероятности того, что оборудование будет работоспособно, численно совпадает со значением коэффициента готовности системы. Полученные значения вероятностей сравниваются с нормативными данными по соответствующим видам оборудования. В приведенном примере расчета, вероятность того, что оборудование будет работоспособно, находится в области значений $p_0 = 0,99$.

Заключение

В статье описана модель многопроцессорной системы и проведено определение вероятностных характеристик надежности компьютерной системы тренажера с использованием технологии виртуальной реальности.

В данном случае направление совершенствования тренажера таково, что исключается использование шлема виртуальной реальности и связанных с этим неприятных для оператора ощущений (признаки «морской болезни»).

При таком подходе к созданию тренажеров основное внимание уделяется использованию водителем реальных органов управления. Также происходит изменение набора и вида специальных устройств, используемых для создания частичных эффектов ВР:

- индивидуальные системы визуализации (шлемы виртуальной реальности) заменяются проекционными экранами за пределами кабины, на которых воспроизводятся видеозаписи реальной обстановки;
- изымаются системы трекинга;
- расширяются возможности использования акустической системы в реальном пространстве;
- применяется платформа для изменения положения рабочего места водителя и имитации поворота, наклона или вибрации;
- упрощается программное обеспечение для реализации взаимодействия основных систем тренажера.

При изменении элементов ВР (изъятие шлемов виртуальной реальности) исключается возможность появления симптомов «морской болезни» и соответствующих физиологических проявлений, что улучшает самочувствие операторов, обучаемых на тренажере.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смолин А.А., Жданов Д.Д., Потемин И.С., Меженин А.В., Богатырев В.А. Системы виртуальной, дополненной и смешанной реальности / Учебное пособие. — Санкт-Петербург: Университет ИТМО. 2018. — 59 с.
2. Бабенко В.С. Виртуальная реальность: Толковый словарь терминов / В.С. Бабенко; ГУАП. — СПб., 2006. — 87 с.
3. Иванов А.А., Петров В.В. Виртуальная реальность в образовании: теория и практика. — М.: Наука, 2023. — 256 с.
4. Иванова Л.Н. Сравнительный анализ экранов для VR-систем // Инженерный вестник. — 2023. — № 4 — С. 45–52.
5. Сидоров П.И. Современные тенденции внедрения VR и AR в России // Технологии будущего. — 2024. — № 3. — С. 12–18.
6. ГОСТ Р 27.301–2021. Надёжность технических систем. Методы расчёта. — М.: Стандартиформ, 2021. — XX с.
7. Роганов В.Р., Михеев М.Ю., Асмолова Е.А., Жашкова Т.В. Имитаторы визуальной обстановки для тренажёров подготовки водителей транспортных средств // Труды Международного симпозиума «Надёжность и качество»; Пензенский государственный технологический университет — Пенза: 2016, том 2 — С. 326–328.
8. Данилов А.М., Лапшин Э.В., Гарькина И.А., Трусов В.А. Информационно-вычислительные системы авиационных тренажёров модульной архитектуры с распараллеливанием вычислительных процессов // Труды Международного симпозиума «Надёжность и качество»; Пензенский государственный технологический университет — Пенза: 2016, том 2 — С. 318–326.
9. А.В. Белякова, Б.В. Савельев Анализ информационных моделей тренажёров для обучения водителей транспортных средств // Вестник СибАДИ 2019, том 16, № 5 (69) — С. 559–571.
10. Кузнецов Д.А. Экономическая эффективность VR-тренажёров в обучении водителей // Экономика и транспорт. — 2023. — № 5 — С. 45–52.
11. Теория надёжности радиотехнических систем (математические основы) / Левин Б.Р. — М.: Сов. радио, 1978. — 264 с.
12. Архангельский А.А., Юхимук Р.А. Тренажёры с использованием отдельных элементов технических средств виртуальной реальности // Высшая школа, научно-практический журнал. — 2024. — № 4 — С. 63–65.

© Архангельский Алексей Алексеевич (arhangelsky@yandex.ru); Юхимук Роман Алексеевич (mkpostra@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В КАНАЛЕ ЭЛЕКТРОМЕМБРАННОЙ СИСТЕМЫ И СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕЁ РАБОТЫ

Батчаев Адурхай Анзорович

Аспирант, Карачаево-Черкесский государственный
университет имени У.Д. Алиева, г. Карачаевск
adurkhai11@gmail.com

MODELING OF FLOWS IN THE CHANNEL OF AN ELECTROMEMBRANE SYSTEM AND A METHOD FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF ITS OPERATION

A. Batchaev

Summary. Freshwater shortage is becoming an increasingly pressing issue for many regions of the world. Seawater desalination using an electromembrane system is now recognized as the most promising solution. A spacer is used in the desalination channel to accelerate the deionization process. Channel flow simulations revealed that a vortex structure similar to a Karman Street forms in the wake of the spacer [1]. The presented paper continues that numerical study of the mentioned flow regime. The physical processes underlying the influence of a coherent vortex structure on the deionization of an aqueous solution in the channel are discussed. It is proposed a method for increasing the throughput of the electromembrane system.

Keywords: electromembrane system, spacer, flow simulation, vortex structures, lattice, turbulent flow.

Аннотация. Для многих регионов мира дефицит пресной воды становится всё более острой проблемой. В настоящее время признано, что наиболее перспективным решением этой задачи является обессоливание морской воды с помощью электромембранной системы. Для ускорения процесса деионизации в канале обессоливания используется спейсер. При моделировании течения в канале было обнаружено, что в следе за спейсером формируется вихревая структура типа дорожки Кармана [1]. В данной работе продолжено численное исследование подобного режима обтекания. Обсуждаются физические процессы, лежащие в основе влияния когерентной вихревой структуры на процесс деионизации водного раствора в канале. Предлагается способ, который позволит увеличить пропускную способность электромембранной системы.

Ключевые слова: электромембранная система, спейсер, моделирование обтекания, вихревые структуры, решетка, турбулентный поток.

Введение

Несмотря на то, что две третьих земной поверхности покрыто водой, дефицит пресной воды испытывает значительная часть населения по всему миру. Существует множество факторов, затрудняющих доступ к чистой воде даже там, где она имеется в достаточном количестве. Природные водные ресурсы Земли, такие как моря, океаны и подземные источники, содержат значительное количество растворённых солей, что делает их непригодными для прямого использования. Обессоливание морской воды рассматривается как основное решение устранения дефицита пресной воды [2]. Главной причиной необходимости обессоливания воды является рост населения. С увеличением его численности возрастает потребление воды как для питьевых нужд, так и для сельскохозяйственных и промышленных целей. В результате запасы пресной воды, особенно в засушливых и густонаселённых регионах, становятся всё более ограниченными.

Наиболее известным, традиционным методом обессоливания является дистилляция, при котором вода

нагревается до кипения, а затем пар конденсируется в отдельной ёмкости, оставляя за собой соли и другие примеси. Это надёжный способ удаления практически всех примесей, включая соли, бактерии и вирусы. Его недостатками являются высокие энергозатраты на нагрев воды и то, что сам процесс дистилляции медленный, что делает его менее подходящим для массового производства чистой воды.

Наиболее перспективным методом из ныне существующих признана электродеионизация [3]. Вода очищается путём воздействия электрического поля, которое перемещает ионы через ионообменные мембраны. Он обеспечивает высокую степень очистки воды и, самое главное, не имеет прямого ограничения в её производстве. Эффективность электрордеионизации зависит от гидродинамических параметров течения в канале. Одним из способов её повышения является применение парямоугольного спейсера, за которым может образоваться периодически изменяющаяся вихревая структура. Схема канала деионизации показана на фиг. 1 в работе [4].

Моделирование обтекания спейсера в канале обессоливания

Проведенное в работе [1] численное моделирование обтекания показало, что при достаточно большом значении Re в спутном следе за препятствием (спейсером), расположенным по центру канала, образуется периодически изменяющийся вихревая структура типа дорожки Кармана.

В случае, когда если расстояние до стенок велико по сравнению с поперечными размерами обтекаемого тела, картина двумерного течения за цилиндром и прямоугольной пластиной качественно одинаковы. Первичное ламинарное обтекание устойчиво при малых значениях числа Рейнольдса $Re = Ud / \nu$, где U — скорость набегающего потока, направленного, скажем, вдоль оси x , d — характерный размер обтекаемого тела вдоль оси y (например, диаметр цилиндра или толщина пластины) и ν — коэффициент кинематической вязкости. При переходе Re через первое критическое значение $Re_{1cr} \sim 1$, первичное течение сменяется вторичным стационарным режимом, при котором за цилиндром образуется пара симметрично расположенных вихрей. По мере увеличения Re вихри растут и, при переходе через второе критическое значение Re_{2cr} , начинается процесс их периодического, чередующегося отрыва. Вниз по течению амплитуда вихревого возмущения постепенно растет, что приводит к обрушению дорожки Кармана и формированию турбулентного следа.

Присутствие жестких границ приводит к существенному возрастанию величины Re_{2cr} и, более того, изменяет картину нестационарного режима обтекания. Течение за спейсером остается двумерным и поле скорости меняется по осям x и y . При его изучении в качестве характерного масштаба здесь вместо d следует выбрать расстояние между стенками канала l и, соответственно, теперь $Re = Ul / \nu$. На рис. 1 показана характерная для небольших значений Re/Re_{2cr} картина двумерного обтекания спейсера с размером $l/3$ в перпендикулярном к стенкам направлении — оси y . Амплитуда вихревого возмущения также растет по мере удаления от обтекаемого тела, но выходит на насыщение уже на расстоянии, сравнимом с длиной волны вихревого возмущения по направлению потока — оси x . Как видно из рисунка, размер возмущения в направлении оси y ограничена шириной канала. Отметим, что наблюдаемая вихревая структура типа дорожки Кармана на фоне среднего течения визуально выглядит как изменяющееся по пространству и по времени волнообразное течение.

В мембранных системах используется поперечная прямоугольная пластина, расположенная в центральной части канала. Под действием электрического поля

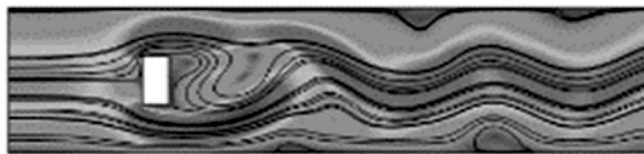


Рис. 1

ионы растворенной в воде поваренной соли, Na^+ и Cl^- движутся в противоположных направлениях. При этом концентрация ионов Na^+ будет минимальной у отрицательно заряженной стенки канала и максимальной у положительно заряженной, а концентрация ионов Cl^- будет симметрично противоположной. Вихревые потоки существенно повышают эффективное значение коэффициента диффузии. Скорость собственного перемещения ионов в электрическом поле не очень велико, поэтому, это будет способствовать более быстрому выравниванию концентрации ионов соли в канале. Напишем известную формулу, связывающую среднее перемещение взвешенной в жидкости частицы \bar{r} , коэффициента диффузии D и времени t :

$$\bar{r}^2 = Dt.$$

Таким образом, для заданного интервала времени при увеличении D величина \bar{r} растет по корневому закону. Следовательно, увеличение эффективного значения величины D ускоряет процесс деионизации раствора в канале обессоливания. Допустимое значение максимальной скорости потока \bar{v}_{max} , при котором достигается требуемая степень её очистки, ограничена и зависит от протяженности канала L . Подразумевается, что время перемещения ионов от одной стенки канала до другой не должно превышать L / \bar{v}_{max} . Ускорение деионизации раствора внутри канала дает возможность увеличить \bar{v}_{max} — т. е. пропускную способность электромембранной системы.

Помимо этого, вихревая структура изменяет профиль среднего по времени значения скорости. Параболический для стационарного режима профиль немного сглаживается в центральной части канала, а в пограничных слоях, наоборот, становится круче. Средние значения скорости в центральной части канала обессоливания возрастают, что приводит к дальнейшему увеличению его пропускной способности при заданном значении \bar{v}_{max} .

Способ повышения эффективности электромембранных систем

Из вышесказанного следует, что увеличение эффективного значения коэффициента диффузии означает повышение эффективности работы электромембранной

системы. Для дальнейшего увеличения пропускной способности канала обессоливания достаточно (при прочих равных значениях параметров установки) заменить спейсер на решетку, за которым вместо вихревой структуры, показанной на рис. 1, будет формироваться турбулентное течение. Начиная с пионерских работ по изучению свойств однородной турбулентности [5] и до настоящего времени, именно решетка использовалась для создания статистически стационарного, однородного турбулентного потока внутри длинного канала с поперечным сечением, имеющем форму квадрата. Исходя из геометрии канала обессоливания, вместо квадратной решетки следует использовать вместо одного систему спейсеров, расположенных в начале канала на равном расстоянии друг от друга — своего рода «интерференционной» решетки, за которым даже при относительно небольших значениях U будет формироваться турбулентный поток. Из сказанного в предыдущем пункте следует, что дополнительное увеличение пропускной способности канала обессоливания будет достигнуто, во-первых ввиду того, что коэффициент турбулентной диффузии почти в 100 раз выше молекулярной и превышает эффективное значение, соответствующее когерентной вихревой структуре. Во-вторых, в турбулентном течении профиль средней скорости практически полностью выравнивается в центральной области канала, площадь которой в данном случае больше.

Заключение

В работе обсуждаются известные способы решения проблемы дефицита пресной воды, актуальный во

многих регионах мира. Рассматривается её наиболее перспективное решение — метод электродеионизации с применением спейсера, расположенного посередине канала обессоливания.

В представленной работе проведено численное моделирование обтекания спейсера в узком канале. Получено, что при переходе числа Рейнольдса через Re_{2cr} в канале обессоливания формируется периодически изменяющаяся вихревая структура типа дорожки Кармана. Отмечены два физических процесса, способные увеличить пропускную способность канала обессоливания — увеличение коэффициента диффузии и выравнивание профиля средней скорости в центральной области канала. Первый из них ускоряет процесс деионизации раствора и позволяет увеличить \bar{v}_{max} , а второй — увеличивает при данном значении \bar{v}_{max} массоперенос через канал.

Предложен способ, дополнительно повышающий эффективность работы электромембранных систем — замена спейсера на решетку. Тогда вместо вихревой структуры типа дорожки Кармана в канале будет формироваться турбулентный поток. Это ещё больше ускорит процесс деионизации раствора и в большей степени выровняет профиль средней скорости течения в канале обессоливания, что приведет к дополнительному увеличению пропускной способности электромембранной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батчаев А.А. О динамике вихревой дорожки кармана в узком канале. Алиевские чтения. Материалы научной сессии преподавателей, научных работников и аспирантов КЧГУ, посвящённой Году педагога и наставника. Карачаевск, 2023
2. Jones E., Qadir M., van Vliet M.T., Smakhtin V., Kang S.M. The state of desalination and brine production: A global outlook. *Sci. Total Environ.* 2019, 657, 1343–1356.
3. Doornbusch G., van der Wal M., Tedesco M., Post J., Nijmeijer K., Borneman Z. Multistage electrodialysis for desalination of natural seawater. *Desalination* 2021, 505, 114973.
4. Aminat Uzdenova, Anna Kovalenko, Evgeniy Prosviryakov, Makhamet Urtenov. Mathematical Modeling of the Influence of the Karman Vortex Street on Mass Transfer in Electromembrane Systems. *Membranes* 2023, 13, 394.
5. G.I. Taylor. Statistical theory of turbulence. (1935) *Proc. R. Soc. London. Ser. A.* 151, 421.

© Батчаев Адурхай Анзорович (adurkhai11@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ МЕТОДОВ СЖАТИЯ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ПО ФАЗЕ ПРИМЕНЕНИЯ И ХАРАКТЕРУ ВОЗДЕЙСТВИЯ

SYSTEMATIZATION OF METHODS FOR COMPRESSING LARGE LANGUAGE MODELS BY APPLICATION PHASE AND IMPACT TYPE

F. Bayazitov

Summary. Relevance. Modern large language models (LLMs) demonstrate high quality across a wide range of tasks, but their scale makes deployment challenging under limited computing resources. Existing reviews of LLM compression methods focus primarily on technical taxonomy — pruning, quantization, distillation — and fail to address either the timing of interventions in the model lifecycle or the nature of modifications. This limits the ability to consciously select a compression strategy based on the available modification stages and the required balance between efficiency and flexibility.

Research Hypothesis. A two-dimensional classification by application phase and intervention type allows us to identify a fundamental tradeoff between structural robustness and contextual adaptability, enabling an informed choice of compression method based on the available intervention stage and the nature of the target constraints.

Results. The proposed classification reveals a consistent trend: a shift from static methods in early phases to dynamic methods at the inference stage. The analysis shows that static methods provide predictable resource reduction but require model modification, while dynamic methods preserve the original weights but are context— and hardware-dependent. The most significant gap is the lack of dynamic methods in early stages. The findings form the basis for an informed choice of LLM compression strategy based on available intervention stages and practical constraints.

Keywords: large language models, model compression, dynamic compression, static compression, life cycle.

Баязитов Фанур Анурович

Уфимский государственный
нефтяной технический университет
fanur-bayazitov@mail.ru

Аннотация: Актуальность. Современные большие языковые модели (LLM) демонстрируют высокое качество в широком спектре задач, однако их масштаб затрудняет развёртывание в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Существующие обзоры методов сжатия LLM фокусируются преимущественно на технической таксономии — прореживание, квантование, дистилляция — и не отражают ни времени вмешательства в жизненный цикл модели, ни природы изменений. Это ограничивает возможность осознанного выбора стратегии сжатия в зависимости от доступных этапов модификации и требуемого баланса между эффективностью и гибкостью.

Гипотеза исследования. Двумерная классификация по фазе применения и типу воздействия позволяет выявить фундаментальный компромисс между структурной устойчивостью и контекстной адаптивностью, что делает возможным обоснованный выбор метода сжатия с учётом доступного этапа вмешательства и природы целевых ограничений.

Результаты. Предложенная классификация выявляет устойчивую тенденцию: смещение от статических методов на ранних фазах к динамическим — на этапе инференса. Анализ показывает, что статические методы обеспечивают предсказуемое сокращение ресурсов, но требуют модификации модели, тогда как динамические сохраняют исходные веса, но зависят от контекста и аппаратуры. Наиболее значимый пробел — отсутствие динамических методов на ранних этапах. Полученные выводы формируют основу для осознанного выбора стратегии сжатия LLM в зависимости от доступных этапов вмешательства и практических ограничений.

Ключевые слова: большие языковые модели, сжатие моделей, динамическое сжатие, статическое сжатие, жизненный цикл модели.

Введение

Рост масштабов больших языковых моделей (Large language models, LLMs) сопровождается увеличением вычислительных, энергетических и инфраструктурных затрат, что ограничивает их развёртывание в ресурсоограниченных средах. В ответ на эту проблему разработано множество методов сжатия, направленных на снижение числа параметров, объёма памяти или вычислительной сложности без существенной потери качества. Существующие обзоры преимущественно клас-

сифицируют такие методы по техническому принципу: прореживание, квантование, дистилляция и другие.

В настоящей работе предлагается альтернативная двумерная систематизация методов сжатия LLM, основанная на двух независимых измерениях: фазе применения и характере воздействия. На основе анализа ключевых работ демонстрируется, что такая классификация выявляет устойчивую эволюционную тенденцию: смещение от статически сжатых моделей к адаптивным стратегиям, активным только на этапе инференса. Кро-

ме того, схема позволяет идентифицировать незаполненные ниши, в частности — отсутствие динамических методов на ранних фазах жизненного цикла. Цель статьи предложить аналитический инструмент для их осмысленного сопоставления и выбора в зависимости от практических ограничений.

Предварительные сведения

Под сжатием LLM понимается совокупность методов, направленных на снижение ресурсоёмкости модели при сохранении её функциональных характеристик. Основные целевые метрики включают: объём памяти, задержку инференса, пропускную способность и качество.

Текущие модели базируются на архитектуре трансформера, включающей слои внимания и полносвязные нейронные сети. Сжатие может затрагивать веса, активации или вычислительный граф. Важным различием является характер изменений: статическое сжатие приводит к созданию новой, фиксированной модели, в то время как динамическое сохраняет исходные параметры и модифицирует вычисления лишь в ходе инференса, в зависимости от входных данных. Далее эти понятия лежат в основе предлагаемой классификации.

Двумерная классификация методов сжатия LLM

Существующие обзоры методов сжатия LLM преимущественно опираются на таксономии, основанные на техническом принципе реализации: квантование, прунинг, дистилляция знаний и т.п. [1, 3]. Такой подход, хотя и обеспечивает удобную категоризацию, зачастую размывает принципиальные различия во времени и характере вмешательства в модель, что ограничивает аналитическую ценность сравнения методов.

В настоящей работе предлагается альтернативная двумерная классификационная схема, позволяющая систематизировать методы сжатия по двум независимым, но взаимодополняющим измерениям, по фазе применения и по характеру воздействия.

Фаза применения — временной этап жизненного цикла модели, на котором осуществляется сжатие. Делится на 4 типа: pre-training — сжатие интегрировано непосредственно в процесс масштабного предобучения; post-training — сжатие применяется к полностью обученной модели без дополнительной адаптации; fine-tuning — сжатие совмещено с адаптацией модели к конкретной задаче или домену; инференс — сжатие реализуется динамически в процессе генерации ответа.

Характер воздействия — природа изменения, вносимого в модель. Можно выделить 2 глобальных способа: статическое воздействие — предполагает постоянное

и необратимое изменение структуры или параметров модели; динамическое воздействие — означает контекстно-зависимое изменение, активное только в ходе отдельного прохода инференса. В первом случае результат сжатия фиксирован и не зависит от входных данных, во втором структура исходной модели остаётся нетронутой.

Предложенная схема превосходит одномерные таксономии, поскольку одновременно раскрывает эволюцию подходов к сжатию, выявляет пробелы в существующих исследованиях и усиливает аналитическую применимость анализа. В частности, она отражает фундаментальный переход от универсального, статического сжатия модели к контекстно-зависимому сжатию по мере приближения к этапу развёртывания. Та же классификационная структура выявляет недостаточную разработанность динамических методов сжатия на ранних этапах жизненного цикла модели — в частности, в pre-training и post-training, что указывает на перспективность разработки архитектур с встроенной адаптивной разрежённостью. Кроме того, классификация связывает выбор метода сжатия не только с целевыми ограничениями, но и с возможностями вмешательства на конкретном этапе эксплуатации модели.

Наглядное представление предложенной классификации дано на рис. 1.

Диаграмма отображает двумерное пространство, в котором горизонтальная ось соответствует последовательности фаз применения — от pre-training к инференсу, а вертикальное разделение обозначает характер воздействия: статическое и динамическое. Такая визуализация подчёркивает эволюционную траекторию методов сжатия и позволяет наглядно идентифицировать структурные пробелы в существующих исследованиях.

Обзор методов сжатия в рамках предложенной классификации

Сжатие на этапе pre-training

На этапе pre-training сжатие интегрируется непосредственно в процесс масштабного обучения модели. Работа [7] представляет подход, в котором разреженность вводится на ранних стадиях предобучения моделей. Такое вмешательство носит статический характер: итоговая модель фиксирована, её структура не меняется в зависимости от входных данных, а улучшения достигаются за счёт сокращения числа параметров и операций на этапе последующего развёртывания.

Post-training сжатие

Данный тип сжатия применяется к полностью обученной модели без какого-либо дополнительного обу-

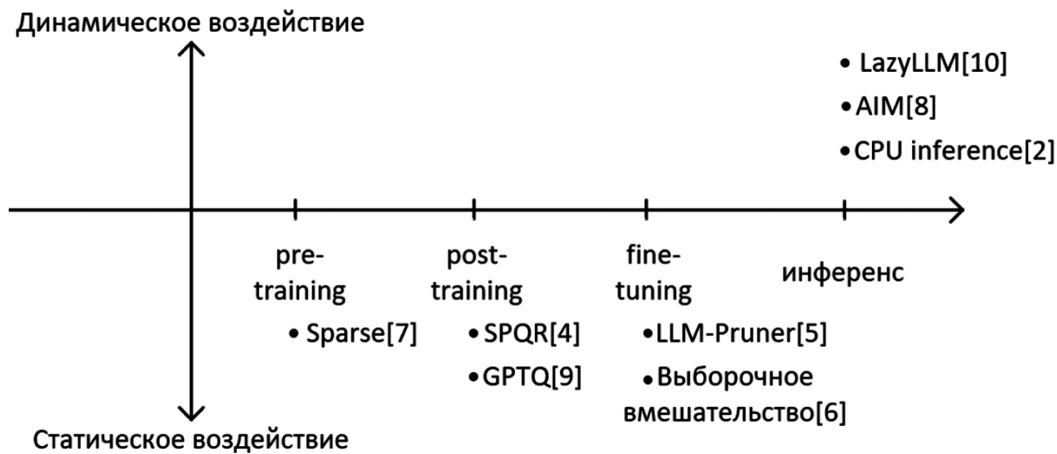


Рис. 1. Классификация методов сжатия LLM

Источник: анализ автора

чения или адаптации. Метод SPQR [4] реализует сжатие весов путём комбинации структурированного разреживания и точного квантования с восстановлением потерь через линейное уравнение. В работе GPTQ [9] реализуют 4-битное квантование с коррекцией ошибок, также вносятся статические изменения в модель. Оба метода позволяют резко сократить объём памяти при минимальной деградации качества, но требуют совместимых инференс-движков.

Сжатие при дообучении

Этап дообучения предоставляет возможность адаптировать сжатие под конкретную задачу или домен. В работе [5] предложен метод LLM-Pruner, который выполняет структурное прореживание на основе градиентной чувствительности модулей модели в ходе fine-tuning. Удаление компонентов происходит итеративно, с сохранением функциональной эквивалентности на уровне представлений, что позволяет минимизировать падение качества. Аналогично, [6] разрабатывают метод дистилляции знаний, в котором процесс обучения меньшей модели модифицируется через выборочное вмешательство, направленное на сохранение ключевых семантических свойств. Оба подхода приводят к созданию новой, компактной, но фиксированной модели, что соответствует статическому типу воздействия.

Сжатие во время инференса

На этапе инференса сжатие реализуется динамически, адаптируясь к каждому конкретному входному запросу без изменения исходных весов модели. В методе [2] предлагается оптимизация инференса LLM на центральных процессорах, в котором комбинируются post-training квантование и runtime-оптимизации, адаптивные к аппаратной архитектуре и структуре входа. В работе [8] вводят метод AIM (Adaptive Inference for Multi-modal LLMs), основанный на слиянии и прорежи-

вании токенов в ходе генерации: малоинформативные или избыточные токены объединяются или исключаются на лету, что сокращает вычислительную нагрузку пропорционально сложности запроса. В LazyLLM [10] реализуют динамическое прореживание токенов на основе их семантической важности. Все три подхода являются динамическими: вычислительная экономия достигается за счёт контекстно-зависимых решений, а исходная модель остаётся нетронутой, что обеспечивает полную обратную совместимость и гибкость развёртывания.

Сравнительный анализ и ограничения

Предложенная классификация позволяет не только систематизировать существующие методы, но и выявить устойчивые паттерны, ограничения и незаполненные пространства исследований. В таблице 1 обобщены ключевые характеристики шести рассмотренных подходов по трём измерениям: фаза применения, тип воздействия и основные практические свойства.

При анализе выявлены три ключевых наблюдения. Во-первых, все статические методы необратимы: они порождают новую, фиксированную модель, что исключает возможность использования исходной полноразмерной версии без хранения двух копий. Во-вторых, динамические методы обеспечивают полную обратную совместимость, поскольку не модифицируют веса, но их выгода проявляется только в инференсе и часто зависит от аппаратной платформы или структуры запроса. В-третьих, фаза применения напрямую коррелирует с гибкостью: чем ближе метод к инференсу, тем выше его адаптивность, но ниже предсказуемость выигрыша.

Наиболее значимый пробел, обнаруживаемый предложенной схемой, — отсутствие динамических методов на этапах pre-training и post-training. Все подходы на этих фазах являются статическими. Это указывает на недостаточную проработанность концепции условно-разрежён-

Таблица 1.

Сравнительные характеристики методов сжатия LLM

Метод	Фаза	Тип	Снижение размера	Падение качества	Аппарат. зависим.	Обратная совм.
Sparse [7]	pre-training	статический	высокое	умеренное	низкая	—
SPQR [4]	post-training	статический	очень высокое	минимальное	средняя	—
GPTQ [9]	post-training	статический	очень высокое	минимальное	высокая	—
LLM-Pruner [5]	fine-tuning	статический	среднее	умеренное	низкая	—
Выбор. вмеш. [6]	fine-tuning	статический	среднее	умеренное	низкая	—
CPU Inference [2]	инференс	динамич.	низко-среднее	минимальное	высокая	полная
AIM [8]	инференс	динамич.	перем.	минимальное	средняя	полная
LazyLLM [10]	инференс	динамич	перем.	минимальное	средняя	полная

Источник: анализ автора

ных архитектур, в которых модель могла бы обучаться с «потенциалом» к динамическому сжатию, активируемому в инференсе.

Примечательно, что в современных исследованиях наблюдается концентрация усилий на поздних этапах жизненного цикла модели: методы, основанные на fine-tuning и инференса, представлены значительно шире, чем подходы, ориентированные на pre-training или post-training сжатие. Это отражает общий сдвиг в прикладных исследованиях в сторону адаптации и оптимизации уже существующих фундаментальных моделей, а не их изначального конструирования с учётом компактности.

В совокупности, выявленные направления — концентрация динамических методов на этапе инференса, отсутствие адаптивных стратегий на ранних фазах, а также противоположные свойства статических и динамических подходов — указывают на компромисс, лежащий в основе современных стратегий сжатия LLM: между структурной устойчивостью и контекстной адаптивностью. Данный компромисс проявляется не только в технических характеристиках методов, но и в их позиционировании вдоль жизненного цикла модели. Двумерная классификация по фазе применения и типу воздействия позволяет систематизировать этот компромисс, делая его явным и поддающимся анализу при проектировании или выборе стратегии сжатия.

Заключение

В статье предложена двумерная классификация методов сжатия больших языковых моделей, основанная на фазе применения и характере воздействия. Анализ ключевых работ в рамках этой схемы выявил устойчивую тенденцию — по мере приближения к этапу раз-

вёртывания наблюдается смещение от фиксированных, структурно модифицированных моделей к адаптивным, контекстно-зависимым стратегиям, не изменяющим исходные параметры. Этот сдвиг отражает эволюцию приоритетов в области — от универсального уменьшения размера модели к гибкой оптимизации её использования под конкретные условия инференса.

Практическая значимость предложенной систематизации заключается в том, что она позволяет соотнести выбор метода сжатия с двумя факторами: доступным этапом вмешательства в жизненный цикл модели и требуемым балансом между предсказуемостью ресурсных характеристик и адаптивностью к входным данным. Например, при отсутствии возможности дообучения или модификации модели после развёртывания предпочтение следует отдавать динамическим методам, несмотря на их аппаратную зависимость. Напротив, при наличии ресурсов на fine-tuning статические подходы обеспечивают более стабильное сокращение вычислительной нагрузки.

Анализ также обнажил существенный пробел: отсутствие динамических методов на этапах pre-training и post-training. Это указывает на потенциал для разработки архитектур, в которых разреженность или сжимаемость закладываются на ранних стадиях, но реализуются адаптивно в инференсе.

Таким образом, систематизация методов сжатия LLM через время и характер вмешательства позволяет выявить структурные закономерности и нерешённые задачи, что может способствовать более осознанному проектированию эффективных и практичных решений в условиях растущих требований к масштабируемости языковых моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Xu C., McAuley J. A survey on model compression and acceleration for pretrained language models // *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. — 2023. — Т. 37. — №. 9. — С. 10566–10575.
2. Shen H., Chang H., Luo Y., [и др.] Efficient llm inference on cpus // *Enhancing LLM Performance: Efficacy, Fine-Tuning, and Inference Techniques*. — Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. — С. 33–46.
3. Chavan A., Magazine R., Kushwaha S., [и др.] Faster and lighter llms: A survey on current challenges and way forward // *arXiv preprint arXiv:2402.01799*. — 2024.
4. Dettmers T., Svirschevski R., Egiazarian V. [и др.] Spqr: A sparse-quantized representation for near-lossless llm weight compression // *arXiv preprint arXiv:2306.03078*. — 2023.
5. Ma X., Fang G., Wang X. Llm-pruner: On the structural pruning of large language models // *Advances in neural information processing systems*. — 2023. — Т. 36. — С. 21702–21720.
6. Татарникова Т.М., Мокрецов Н.С. Метод дистилляции знаний для языковых моделей на основе выборочного вмешательства в обучение // *Программные продукты и системы*. 2025. №2.
7. Agarwalla A., Gupta A., Marques A. [и др.] Enabling high-sparsity foundational llama models with efficient pretraining and deployment // *arXiv preprint arXiv:2405.03594*. — 2024.
8. Zhong Y., Liu Z., Li Y. [и др.] Aim: Adaptive inference of multi-modal llms via token merging and pruning // *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. — 2025. — С. 20180–20192.
9. Frantar E., Ashkboos S., Hoefler T. [и др.] GPTQ: Accurate post-training quantization for generative pre-trained transformers // *arXiv preprint arXiv:2210.17323*. — 2022.
10. Fu Q., Cho M., Merth T. [и др.] Lazyllm: Dynamic token pruning for efficient long context llm inference // *arXiv preprint arXiv:2407.14057*. — 2024.

© Баязитов Фанур Анурович (fanur-bayazitov@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ГИБРИДНЫЕ АЛГОРИТМЫ КОЛЛАБОРАТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ РЕКОМЕНДАЦИИ ТОВАРНЫХ ГРУПП НА ОСНОВЕ НЕОДНОРОДНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ДАННЫХ

HYBRID COLLABORATIVE FILTERING ALGORITHMS FOR PRODUCT GROUP RECOMMENDATIONS BASED ON HETEROGENEOUS USER DATA

**M. Verbova
V. Podolnyy
S. Suvorov**

Summary. With the rapid growth of e-commerce, the ability to hold the user's attention and provide relevant personalized content is becoming an important success factor. The purpose of this work is to develop and experimentally validate a hybrid recommendation system algorithm for a marketplace that solves the problems of incomplete interaction history and disparate metadata. The proposed solution combines two classical approaches: collaborative filtering based on matrix decompositions (Alternating Least Squares) to identify hidden patterns in implicit interactions and a modified popularity-based recommendation method that considers the individual user story.

Keywords: recommendation systems, hybrid algorithm, collaborative filtering, Alternating Least Squares.

Вербова Мария Андреевна

Московский политехнический университет
358maryv@gmail.com

Подольный Владимир Александрович

Московский политехнический университет
nl.podolnyy@vk.com

Суворов Станислав Вадимович

кандидат экономических наук, профессор,
Московский политехнический университет
kafedrapi12@mail.ru

Аннотация. В условиях стремительного роста электронной торговли способность удерживать внимание пользователя и предоставлять релевантный персонализированный контент становится важным фактором успеха. Целью данной работы является разработка и экспериментальная валидация гибридного алгоритма рекомендательной системы для маркетплейса, решающего проблемы неполной истории взаимодействий и разрозненных метаданных. Предлагаемое решение комбинирует два классических подхода: коллаборативную фильтрацию на основе матричных разложений (Alternating Least Squares) для выявления скрытых паттернов в неявных взаимодействиях и модифицированный метод рекомендаций на основе популярности, учитывающий индивидуальную историю пользователя.

Ключевые слова: рекомендательные системы, гибридный алгоритм, коллаборативная фильтрация, Alternating Least Squares.

Введение

В настоящее время наблюдается стремительный рост числа и объема онлайн-платформ электронной торговли. В этих условиях одним из ключевых фактора успеха является способность удерживать внимание пользователя. Персонализация предложений перестала быть дополнительной опцией и стала чем-то привычным и повсеместным. Пользователи ожидают, что система «понимает» их потребности и предлагает релевантные товары, что напрямую влияет на лояльность покупателей и на итоговую выручку.

На практике построение таких персонализированных рекомендаций сталкивается с некоторыми проблемами, например: неполная история взаимодействий, разрозненные метаданные.

Рекомендательные системы применяют методы анализа данных, чтобы помогать пользователям находить товары на платформах электронной коммерции, формируя прогнозы или списки рекомендованных позиций.

Рекомендации могут строиться на основе демографии, популярности товаров или истории покупок пользователя. Наиболее эффективным современным методом является коллаборативная фильтрация (CF), которая предлагает рекомендации или прогнозы, опираясь на оценки и поведение схожих пользователей [4].

Целью данной работы является разработка и экспериментальная валидация гибридного алгоритма рекомендаций, который комбинирует два классических подхода: коллаборативную фильтрацию для выявления паттернов схожести пользователей и товаров на основе их неявных взаимодействий и контентные методы (Content-based) для обогащения моделей признаками из метаданных и учета свойств самих сущностей.

Разработанное решение может обладать прямой практической значимостью и предназначено для внедрения в промышленные рекомендательные системы крупных маркетплейсов, что может позволить: суще-

ственно увеличить конверсию посетителей в покупателей за счет предоставления более точных и разнообразных персонализированных предложений, повысить средний чек за счет кросс-продаж и рекомендации сопутствующих групп товаров.

Методы

В данной работе была разработана двухэтапная гибридная рекомендательная система для предсказания актуальных товарных групп для пользователей маркетплейса. Алгоритм объединяет коллаборативную фильтрацию на основе матричных разложений и контентно-независимые методы, что позволяет учитывать как историю взаимодействий пользователей, так и общую популярность товарных групп.

Система состоит из следующих ключевых компонентов:

1. Модель Alternating Least Squares (ALS).
2. Модифицированный метод рекомендаций на основе популярности, который учитывает индивидуальную историю просмотров каждого пользователя, исключая уже просмотренные товарные группы.
3. Алгоритм объединения рекомендаций от различных методов с весовой схемой, где рекомендациям от ALS присваивается больший вес.

Особенности реализации: используются только контактные события ($is_contact = 1$), исключаются товарные группы, с которыми пользователь уже взаимодействовал, каждый пользователь получает ровно 40 рекомендаций, при отсутствии персонализированных рекомендаций используется глобальная популярность.

Стратегия, на которой фокусируется данная работа, опирается только на прошлое поведение пользователей, не требуя создания явных профилей. Этот подход известен как Коллаборативная фильтрация (Collaborative Filtering, CF). CF анализирует взаимосвязи между пользователями и взаимозависимости между товарами, чтобы выявить новые ассоциации «пользователь-товар». Единственной необходимой информацией является прошлое поведение пользователей, которое может включать их предыдущие транзакции или способ оценки товаров. Главное преимущество CF заключается в том, что она не зависит от предметной области, но при этом может учитывать аспекты данных, которые часто неуловимы и очень сложно описать с помощью контентно-ориентированных методов [1].

Наиболее распространенный подход к CF основан на моделях соседства. Его первоначальная форма, которую использовали практически все ранние системы CF, ориентирована на пользователей. Такие методы, оцени-

вают неизвестные оценки на основе записанных оценок единомышленников. Позже стал популярен аналогичный подход, ориентированный на товары [1].

Центральным для большинства подходов, ориентированных на товары, является мера сходства между товарами, где s_{ij} обозначает сходство i и j . Часто она основана на коэффициенте корреляции Пирсона. Цель — предсказать ненаблюдаемое значение для пользователя u и товара i . Используя меру сходства, мы идентифицируем k товаров, оцененных пользователем u , которые наиболее похожи на i . Этот набор из k соседей обозначается как $S^k(i; u)$. Предсказанное значение принимается как взвешенное среднее оценок для соседних товаров [1]:

$$\hat{p}_{ui} = \frac{\sum_{j \in S^k(i; u)} s_{ij} r_{uj}}{\sum_{j \in S^k(i; u)} s_{ij}} \quad (1)$$

Нужно найти вектор $x_u \in R^f$ для каждого пользователя u и вектор $y_i \in R^f$ для каждого товара i , которые будут факторизовать предпочтения пользователей. Другими словами, предполагается, что предпочтения являются скалярными произведениями: $r_{ui} = x_u^T y_i$. Эти векторы будут известны как пользовательские факторы и товарные факторы соответственно. Это похоже на методы матричной факторизации, популярные для данных с явной обратной связью. Соответственно, факторы вычисляются путем минимизации следующей функции стоимости:

$$\min_{x, y} \sum_{u, i} c_{ui} (r_{ui} - x_u^T y_i)^2 + \lambda (\sum_u \|x_u\|^2 + \sum_i \|y_i\|^2) \quad (2)$$

Оптимальные параметры можно найти с помощью градиентного спуска, но есть более быстрые и надёжные способы. Если мысленно заморозить параметры, соответствующие латентным факторам пользователей, задача оптимизации латентных представлений объектов сведётся к задаче наименьших квадратов, для которой мы знаем точное решение [2].

Итоговый процесс оптимизации функции потерь будет иметь следующий вид.

В цикле до сходимости:

1. Фиксируем матрицу X (скрытые представления пользователей);
2. Решаем задачу L2-регуляризованной регрессии для каждого товара и находим оптимальную матрицу Y ;
3. Фиксируем матрицу Y (скрытые представления объектов);
4. Решаем задачу L2-регуляризованной регрессии для каждого пользователя и находим оптимальную матрицу X .

Решение, получаемое путём попеременного вычисления точных аналитических решений, обычно точнее тех, что получаются с помощью наивного градиентного спуска. Более того, данное решение имеет эффективную реализацию, позволяющую использовать преимущества параллельных вычислений [2].

Преобразуя формулу (2), получим:

$$x_u^* = \left(\sum_{i:(u,i) \in R} y_i y_i^T + \lambda C_i I \right)^{-1} \left(\sum_{j:(i,j) \in R} r_{ij} y_j \right) \quad (3)$$

Таким образом, мы получили аналитическое выражение для вычисления каждого x_u на шаге алгоритма. Отметим, что каждый вектор x_u можно вычислить независимо от других x_v . Данное наблюдение позволяет нам использовать всю мощь параллельных вычислений для эффективного решения оптимизационной задачи. Распределив данные так, что на каждой вычислительной машине хранятся все y_i для некоторого подмножества x_u , на одной итерации алгоритма мы можем параллельно вычислить все x_u . На следующей итерации аналогичным образом вычисляем все y_i [2].

Алгоритм

Поставленная задача представляет собой разработку рекомендательной системы на python для онлайн-платформы, специализирующейся на товарных объявлениях. Платформа функционирует как маркетплейс, где пользователи размещают объявления о продаже различных товаров, а другие пользователи могут просматривать эти объявления и совершать различные действия с ними.

В реализации алгоритма для каждого пользователя $u \in U_{test}$ нужно было построить упорядоченный список из $K=40$ групп товаров $R_u(i_1, i_2, \dots, y_K)$, которые пользователь вероятнее всего просмотрит, при условии $i \notin H_u$, где H_u — история взаимодействий пользователя u .

Для оценки использовалась метрика Recall@K (Recall@40):

$$Recall@K = \frac{1}{|U|} \sum_{u \in U} \frac{(|I_u^{rel} \cap I_u^{pred@K}|)}{(|I_u^{rel}|)} \quad (4)$$

Где: I_u^{rel} — релевантные группы товаров для пользователя u .

$I_u^{pred@K}$ — топ-К предсказанных групп товаров.

Данная метрика измеряет способность системы обнаруживать и показывать пользователю подходящие группы товаров в пределах первых 40 рекомендаций. Выбор именно @40 обусловлен практическими ограничениями пользовательского интерфейса — исследования пока-

зывают, что пользователи редко просматривают больше 40 рекомендаций, особенно на мобильных устройствах.

Для обучения и валидации использовались следующие данные:

1. История взаимодействий — 1,966,247 записей
2. Тестовые пользователи — 92,319 пользователей
3. Уникальных групп товаров — 150,000+

Алгоритм представляет из себя следующие блоки: базовые популярные рекомендации — глобально популярные товарные группы. Персонализированные популярные рекомендации — популярные товары с учетом истории пользователя. Модель коллаборативной фильтрации ALS — для выявления скрытых предпочтений.

Среди необходимых библиотек для работы использовались следующие: Polars для обработки табличных данных, NumPy для численных операций, SciPy для работы с разреженными матрицами и implicit для реализации ALS алгоритма. Важным этапом предобработки данных является фильтрация только контактных событий (просмотры, добавления в корзину, покупки), что повышает релевантность данных для построения рекомендаций.

Для объективной оценки качества модели реализована строгая процедура валидации с временным разделением. Функция выделяет последние 14 дней взаимодействий в качестве тестового набора, исключая при этом пользовательско-товарные пары, присутствовавшие в тренировочных данных, что предотвращает информационную утечку. Основной метрикой качества выбран Recall@40, который измеряет долю релевантных товаров среди 40 рекомендованных. Реализация метрики включает агрегацию по пользователям с последующим усреднением, что обеспечивает устойчивость к разной степени активности пользователей. В процессе оценки система сравнивает три подхода: базовые популярные рекомендации (топ-40 самых популярных товаров для всех пользователей), ALS-рекомендации и предложенный гибридный метод.

Ключевым компонентом системы является модель коллаборативной фильтрации ALS, реализованная через библиотеку implicit. Процесс обучения начинается с преобразования пользовательско-товарных взаимодействий в разреженную матрицу формата CSR, где строки соответствуют пользователям, столбцы — товарам, а значения указывают на факт взаимодействия.

В формате CSR для представления разреженной матрицы используется три массива, Val, Col и Row. Массив Val содержит значения всех ненулевых элементов матрицы, упорядоченных построчно, а в массиве Col хранятся номера столбцов соответствующих элементов. Размер этих массивов равен количеству ненулевых элементов,

nnz. Массив Row размером $n + 1$ содержит смещения от начала матрицы для первых ненулевых элементов в каждой строке, а также общее число ненулевых элементов [3].

Для эффективного маппинга между идентификаторами и индексами создаются словари в обоих направлениях. Модель настраивается с параметрами: 64 латентных фактора, 15 итераций обучения и регуляризация 0.01 для предотвращения переобучения. Алгоритм поочередно оптимизирует пользовательские и товарные эмбединги, минимизируя ошибку реконструкции матрицы взаимодействий.

Рекомендательная система реализует многоэтапный процесс генерации предсказаний. На первом этапе создаются улучшенные популярные рекомендации, которые учитывают индивидуальную историю просмотров каждого пользователя — из общего пула популярных товаров исключаются уже просмотренные пользователем позиции. На втором этапе, при наличии достаточного объема данных (более 10,000 взаимодействий и 100 уникальных пользователей), обучается ALS-модель, которая генерирует персонализированные рекомендации на основе латентных предпочтений. Эти два типа рекомендаций объединяются с весовыми коэффициентами (ALS-рекомендации получают двойной вес), после чего для каждого пользователя выбирается топ-40 товаров с наибольшим суммарным скором.

Финальный этап включает гарантирование корректности выходного формата: для каждого пользователя должно быть ровно 40 рекомендаций. При недостатке персонализированных рекомендаций система подбирает недостающие позиции из глобально популярных товаров, исключая уже рекомендованные.

Результаты

Основной метрикой качества выбрана Recall@40, измеряющая долю релевантных товаров среди 40 рекомендованных позиций. Проведенная оценка на валидационной выборке, выделенной методом временного разделения (последние 14 дней), показала следующие результаты:

1. Базовые популярные рекомендации продемонстрировали значение Recall@40 = 0.1215. Этот результат достигнут благодаря значительному объему тренировочных данных (1,278,625 записей) и валидационной выборке, охватывающей 56,762 уникальных пользователя.
2. Гибридный подход (ALS + популярные) достиг Recall@40 = 0.1286, что на 5.9 % превышает показатель базовых популярных рекомендаций. Улучшенные популярные рекомендации, в отличие от базовых, исключают из рекомендаций уже про-

смотренные пользователем товары, что повышает их релевантность.

Анализ внутренней структуры рекомендаций через визуализацию подтверждает сбалансированность гибридного подхода.

Распределение типов рекомендаций демонстрирует оптимальное соотношение: 56,4 % популярных рекомендаций обеспечивают стабильность и покрытие, а 43,6 % ALS-рекомендаций обеспечивают персонализацию (рисунок 1). Такое распределение минимизирует проблему холодного старта при сохранении индивидуального подхода для активных пользователей.

Распределение типов рекомендаций

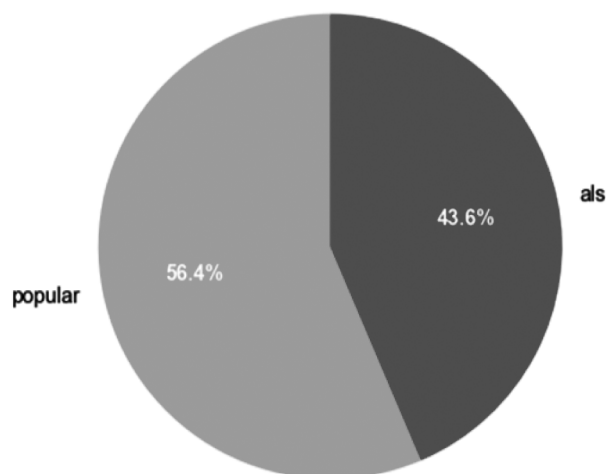


Рис. 1. Распределение типов рекомендаций при генерации

Анализ скоров рекомендаций выявил бимодальное распределение с медианой 1.00 и средним 0.66 (рисунок 2). Выраженный пик на максимальном score (1.0) соответствует фиксированному весу популярных рекомендаций, тогда как более плавное распределение ALS-скоров (0–1) отражает вариативность уверенности модели. Такая структура подтверждает консервативность системы в присвоении высоких скоров, что снижает риск рекомендации нерелевантного контента.

Для понимания достигнутых результатов важно отметить, что в подобных задачах рекомендательных систем для e-commerce типичные значения Recall@40 находятся в диапазоне от 0.05 до 0.20 в зависимости от специфики данных и сложности задачи. Полученное значение 0.1286 соответствует среднему уровню эффективности для подобных систем.

Система успешно обработала 1,966,247 записей взаимодействий и сгенерировала персонализированные рекомендации для 92,319 тестовых пользователей, что

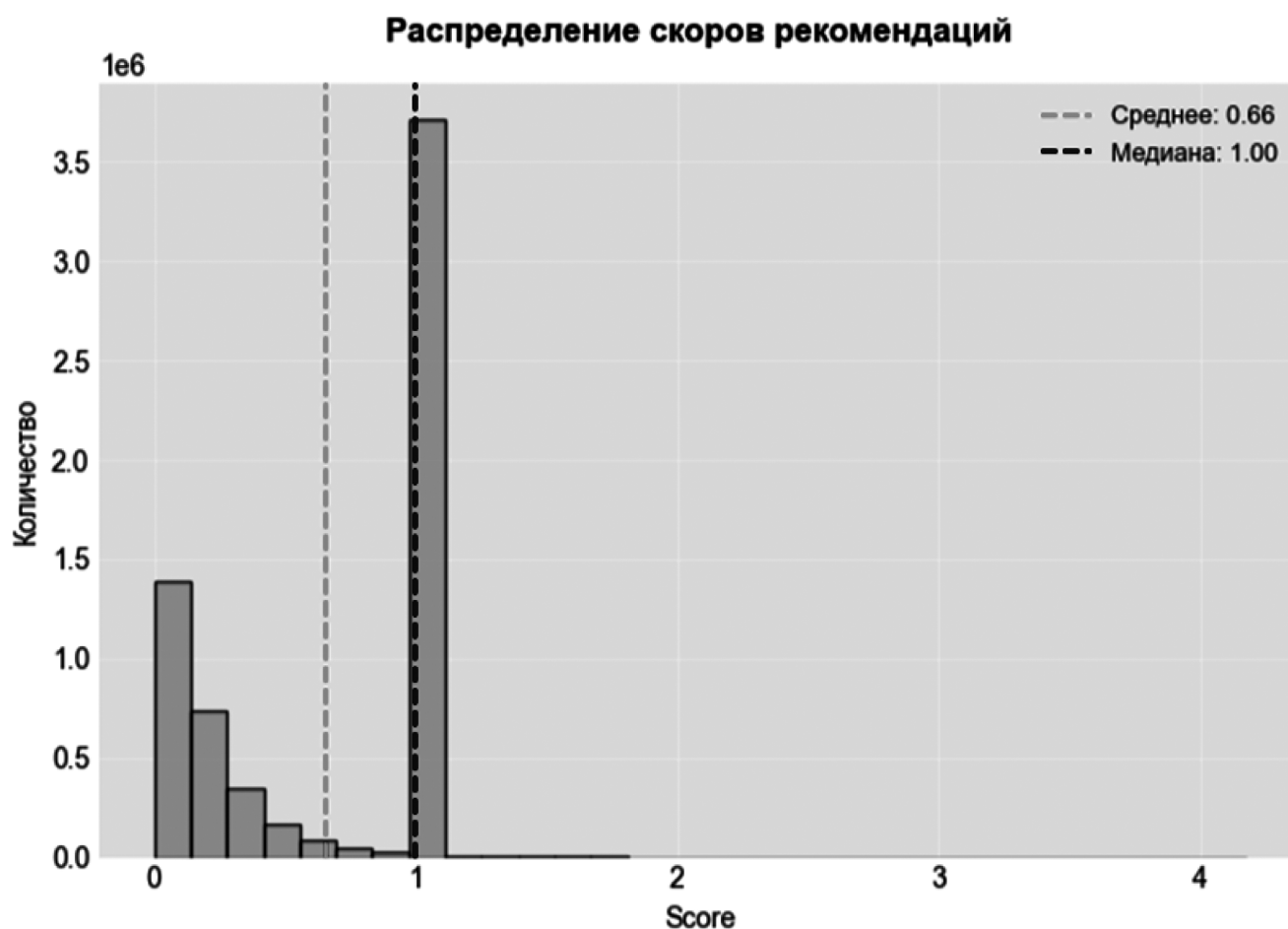


Рис. 2. Распределение скоров рекомендаций при генерации

подтверждает её производственную готовность. Все пользователи получили ровно 40 рекомендаций, соответствующих требуемому формату выходных данных.

Для повышения эффективности системы целесообразно сосредоточиться на следующих аспектах:

1. Устранение проблем обучения ALS-модели и тонкая настройка её гиперпараметров;
2. Эксперименты с альтернативными алгоритмами коллаборативной фильтрации;
3. Интеграция дополнительных признаков товаров и пользователей;
4. Разработка более сложных схем комбинирования различных рекомендательных подходов;
5. Оптимизация весовых коэффициентов при объединении рекомендаций от разных алгоритмов.

Заключение

Разработанная гибридная рекомендательная система представляет собой работоспособное и масштабируемое решение, демонстрирующее стабильную работу на производственных объемах данных. Система успешно сочетает преимущества персонализированных рекомендаций на основе коллаборативной фильтрации с надежностью и простотой популярных рекомендаций.

Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода и его практическую применимость в реальных условиях e-commerce. Дальнейшее развитие системы в указанных направлениях позволит достичь более высоких показателей точности рекомендаций при сохранении ключевых преимуществ текущей реализации: отказоустойчивости, масштабируемости и способности обрабатывать большие объемы данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Y. Hu, Y. Koren and C. Volinsky, «Collaborative Filtering for Implicit Feedback Datasets», 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining, Pisa, Italy, 2008, pp. 263–272, doi: 10.1109/ICDM.2008.22.
2. Рекомендации на основе матричных разложений // Яндекс образование URL: <https://education.yandex.ru/handbook/ml/article/rekomendacii-na-osnove-matrichnyh-razlozhenij#alternating-least-squares-als> (дата обращения: 09.12.2025).
3. Куприй Р.М., Краснопольский Б.И., Жуков К.А. Оценка эффективности различных форматов представления разреженных матриц для вычислений на графических ускорителях // Параллельные вычислительные технологии — XIX всероссийская конференция с международным участием, ПаВТ'2025, г. Москва. — 2025. — С. 172–185.
4. Sarwar Badrul & Karypis George & Konstan Joseph & Riedl John. (2001). Item-based Collaborative Filtering Recommendation Algorithms. Proceedings of ACM World Wide Web Conference. 1. 10.1145/371920.372071.

© Вербова Мария Андреевна (358maryv@gmail.com); Подольный Владимир Александрович (nl.podolnyy@vk.com);

Суворов Станислав Вадимович (kafedrap112@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ЗОН КОГНИТИВНОЙ НАГРУЗКИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ПО ОКУЛОМОТОРНЫМ ДАННЫМ СЕССИЙ ПРОСМОТРА ГРАФИЧЕСКИХ СТРУКТУР

CLUSTERING OF USER COGNITIVE LOAD ZONES BASED ON OCULOMOTOR DATA FROM GRAPHICAL STRUCTURE VIEWING SESSIONS

**B. Goryachkin
A. Savelyev
M. Fonin
D. Lobanov**

Summary. A non-invasive approach to identifying areas of elevated cognitive load based on eye-tracking data was investigated in this paper. Gaze fixation patterns during interaction with graphical structures were analyzed. The DBSCAN density clustering method was applied to automatically detect areas of interest (AOI) without prior labeling. The Cognitive Load Index (CLI), quantifying the intensity of attention within the identified clusters, was calculated. Experiments on visual scenes of varying complexity were conducted, involving the variation of the neighborhood radius and minimum points parameters. The sensitivity of the algorithm to clusterization parameters was evaluated. The effectiveness of the method for the spatial interpretation of mental effort distribution without the use of specialized equipment was confirmed.

Keywords: cognitive load, eye tracking, fixations, attention zones, clustering, visualization.

Горячкин Борис Сергеевич

Кандидат технических наук, доцент,
Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана
bsgor@mail.ru

Савельев Алексей Александрович

Аспирант, Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана
savelevvaa@mail.ru

Фонин Максим Алексеевич

Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана
max.fonin@mail.ru

Лобанов Дмитрий Сергеевич

Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана
citrusbound@mail.ru

Аннотация. Рассмотрен неинвазивный подход к определению областей повышенной когнитивной нагрузки на основе данных айтрекинга. Проанализированы паттерны фиксации взгляда при взаимодействии пользователя с графическими структурами. Применен метод плотностной кластеризации DBSCAN для автоматического выделения зон интереса (AOI) без предварительной разметки. Рассчитан индекс когнитивной нагрузки (CLI), количественно характеризующий интенсивность внимания в выделенных кластерах. Проведены эксперименты на визуальных сценах различной сложности с варьированием параметров радиуса окрестности и минимального числа точек. Оценена чувствительность алгоритма к настройкам алгоритма кластеризации. Подтверждена эффективность метода для пространственной интерпретации распределения умственных усилий без использования специализированного оборудования.

Ключевые слова: когнитивная нагрузка, отслеживание взгляда, фиксации, зоны внимания, кластеризация, визуализация.

Введение

Когнитивная нагрузка отражает количество интеллектуальных ресурсов, которые человек задействует при выполнении задачи или восприятии информации. В сфере взаимодействия человека с цифровыми системами оценка когнитивной нагрузки имеет ключевое значение, поскольку позволяет выявлять элементы интерфейса или содержания, вызывающие наибольшие трудности для пользователя. Полученные сведения используются для совершенствования интерфейсов, учебных материалов, в рекламных целях и других видах визуальной информации. Важным преимуществом является

то, что оценка когнитивной нагрузки может проводиться без применения инвазивных методов, одновременно предоставляя информацию о степени концентрации и степени утомляемости пользователя.

Отслеживание траекторий взгляда и его фиксаций предоставляет собой временные и пространственные данные о распределении внимания [1]. Если пользователь надолго фиксирует взгляд на конкретной области изображения, вероятнее всего это значит, что пользователь испытывает когнитивную нагрузку — либо из-за сложности воспринимаемого элемента, либо из-за его значимости. Анализируя особенности движения глаз,

можно определить участки наибольшей умственной нагрузки при выполнении задачи.

Данная работа посвящена разработке автоматизированного подхода к обнаружению зон повышенной когнитивной нагрузки на основе данных eye-tracking-системы. В статье представлены теоретические основы подхода, описана его реализация, приведены результаты экспериментальных исследований.

Постановка задачи

Во многих практических задачах важно не только определить общий уровень когнитивной нагрузки пользователя, но и выявить локальные элементы интерфейса или фрагменты графического материала, которые вызывают наибольшие трудности. Существующие методы оценки, как правило, предоставляют усреднённый показатель за весь период взаимодействия и не позволяют выявить области, на которые приходилась какая-то часть когнитивной нагрузки и внимания [2].

В рамках данного исследования ставится задача автоматического обнаружения зон повышенной когнитивной нагрузки на основе данных движения глаз. Задача сводится к поиску кластеров точек фиксации взгляда (Area of Interest, AOI), соответствующих областям, где пользователь задерживается дольше или чаще, что указывает на повышение умственных усилий. Реализация задачи включает несколько этапов: сбор данных о движении глаз, выделение фиксаций, их последующую кластеризацию и оценку степени нагрузки для каждой обнаруженной зоны. Необходимо спроектировать и разработать алгоритм определения степени когнитивной нагрузки для зарегистрированных окуломоторных данных, а также способ кластеризации и визуализации анализируемых данных для их наглядного, графического представления.

Реализация поставленной задачи потенциально позволит выявлять объекты и зоны интереса пользователей, или же элементы интерфейса, вызывающие повышенную когнитивную нагрузку для их оценки [3] и улучшения.

Когнитивная нагрузка как базовый индикатор интеллектуальной деятельности пользователя компьютера

В рамках теории когнитивной нагрузки выделяют несколько категорий умственных усилий, которые совместно формируют общий уровень интеллектуальной нагрузки пользователя [4]. Традиционно различают три основные разновидности:

1. Внутренняя когнитивная нагрузка определяется сложностью содержания: объемом информа-

ции, числом взаимосвязей между элементами, абстрактностью и трудностью рассматриваемых концепций. Этот тип нагрузки является неизбежным, поскольку обусловлен самим содержанием материала и не зависит от того, как он представлен.

2. Внешняя когнитивная нагрузка возникает из-за особенностей подачи информации — перегруженного интерфейса, лишних деталей, отвлекающих факторов. Она считается нежелательной, поскольку является следствием внешних факторов и затрудняет восприятие.
3. Смысловая (или продуктивная) когнитивная нагрузка отражает усилия, направленные на понимание, осмысление и усвоение новой информации. Этот тип нагрузки считается полезным, поскольку связан с активным формированием знаний и пониманием материала.

В совокупности эти три компонента определяют общий уровень когнитивной нагрузки, результаты анализа которого можно использовать для оптимизации и улучшения интерфейсов или графических структур, которые в свою очередь используются для обучения или работы, что в конечном итоге приведет к повышению эффективности восприятия.

Также выделяют 3 наиболее распространённые группы методов оценки нагрузки: физиологические, поведенческие и субъективные [5].

1. Физиологические методы основываются на анализе биосигналов, чувствительных к уровню умственного напряжения: частоты сердечного ритма, кожно-гальванической реакции, данных ЭЭГ, диаметра зрачков, частоты моргания и других параметров. Эти методы обеспечивают объективные данные, но требуют специализированного оборудования и часто оказываются неудобными в применении.
2. Поведенческие методы оценивают нагрузку по особенностям выполнения задачи и по параметрам движений глаз. Увеличение длительности выполнения, рост количества ошибок, особенно фиксации и саккад, а также повторные возвраты взгляда могут указывать на рост когнитивной нагрузки. Поскольку этот подход не требует вмешательства в деятельность пользователя и может быть реализован с помощью трекаera взгляда, он является основой разработанного в данной работе подхода.
3. Субъективные методы предполагают самооценку пользователем своего состояния через опросы и шкалы, такие как NASA TLX. Они просты в применении, но субъективны и не позволяют отслеживать динамику нагрузки в реальном времени, поскольку обычно применяются после выполнения задания.

В данном исследовании основное внимание уделяется поведенческому подходу, в частности анализу глазодвигательных данных, который является неинвазивным, обладает высокой временной и пространственной точностью.

Обработка данных трекера взгляда и реализация метода автоматического выделения зон внимания с уровнем умственной нагрузки

В исследовании применяется самописный трекер взгляда [6] и его различные модули для визуализации данных поведения взгляда. Схема работы системы представлена на рисунке 1 и функционирует следующим образом: изображение пользователя захватывается веб-камерой компьютера, после чего происходит анализ лица, определяется положение зрачков. На основе изменений положения зрачков относительно калибровочных точек вычисляется зона взгляда на экране.

Система отслеживания взгляда предоставляет исходные окуломоторные данные для анализа, а именно координаты точек взгляда на экране и его фиксации. На основе этих данных формируются различные визуализации, представленные на рисунке 2, среди которых диаграммы разброса регистрируемых покадрово точек

взгляда и тепловые карты, отражающие насыщенностью цвета интенсивность и продолжительность фиксации.

В нашей работе мы автоматически выделяем зоны визуального интереса пользователя (AOI), не прибегая к их предварительной ручной разметке, которая не всегда может быть объективна. Мы используем собранные глазодвигательные данные для выявления истинных зон интереса пользователя на конкретном изображении в конкретной сессии отслеживания взгляда. Для этого применяется алгоритм DBSCAN — метод выделения плотностных структур, способный формировать кластеры произвольной формы без необходимости заранее задавать их количество [7]. Его параметрами являются радиус окрестности ϵ , определяющий зону поиска соседних точек, и минимальное число точек MinPts, необходимое для формирования кластера. Варьирование этих параметров позволяет определять различные зоны интереса на разном уровне масштабирования: глобальные и локальные. Диапазон для эффективного поиска кластеров у окрестности ϵ от 10 до 100 пикселей, у MinPts от 5 до 30 штук. В таблице 1 приведены примеры вариации параметров алгоритма с описаниями ожидаемых результатов его работы с окуломоторными данными, используемыми в данной работе.

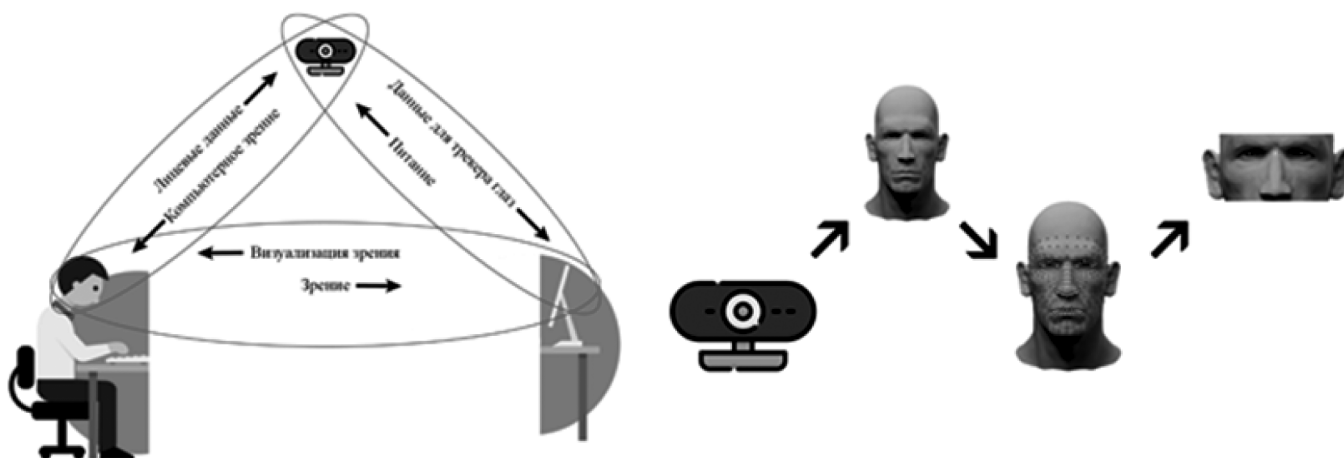


Рис. 1. Общий алгоритм работы системы

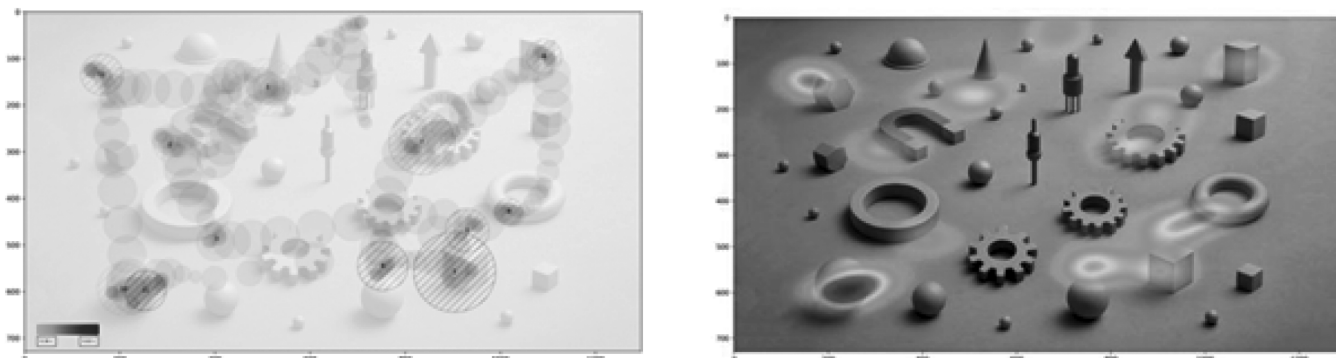


Рис. 2. Диаграмма рассеивания и тепловая карта точек взгляда

Таблица 1.
Варьирование значений параметров DBSCAN

Значения параметров	Результат
$< \epsilon, < \text{MinPts}$	Алгоритм ищет небольшие скопления. Получаем много мелких, дробных кластеров
$< \epsilon, > \text{MinPts}$	Алгоритм ищет точки с высокой с высокой пространственной плотностью.
$> \epsilon, < \text{MinPts}$	Алгоритм строит кластеры по далеким точкам с низкой пространственной плотностью
$> \epsilon, > \text{MinPts}$	Алгоритм объединяет широкие области, но требует, чтобы в них было большое количество точек. Получаем крупные зоны общего интереса

После выделения кластеров необходимо определить, как именно взаимодействовал пользователь с визуальными объектами под ними. Инструментарий, используемый для сбора данных, неинвазивный, поэтому мы не можем использовать нейрофизиологические методы для определения уровня умственных усилий. Было принято решение использовать композитный индекс когнитивной нагрузки (Cognitive Load Index, CLI), представляющий собой взвешенную линейную комбинацию двух параметров, извлекаемых из данных фиксации взгляда в пределах кластера (уравнение 1).

$$CLI = \omega_1 \cdot DwellK_i + \omega_2 \cdot AvgFK_i \quad (1)$$

В основе рассматриваемого метода лежит гипотеза «Глаз-Разум» (Eye-Mind Hypothesis [8]), сформулированная Джастом и Карпентером в 1980 году, согласно которой существует тесная временная и пространственная корреляция между поведением взгляда и обрабатываемой мозгом информацией. Предложенная формула 1 решает задачу определения умственной нагрузки через интеграцию двух параметров: суммарного времени фиксации и средней продолжительности фиксации для соответствующих кластеров.

Параметр ***DwellK_i*** (**мера распределения внимания**) — нормированное суммарное время фиксации в *i*-ом кластере, представляющее собой долю общего времени просмотра, затраченного на анализ данной области. Вычисляется как отношение суммарной длительности всех фиксации, попавших в кластер, к общему времени всех фиксации в сессии. Данный параметр отражает относительную значимость области для пользователя и служит базовым индикатором распределения внимания.

Параметр ***AvgFK_i*** (**мера глубины обработки**) — среднее время одиночной фиксации в кластере, характеризующее глубину (интенсивность) когнитивной

обработки информации. Вычисляется как среднее арифметическое длительностей всех фиксации, принадлежащих кластеру. Это позволяет различать ситуации с одинаковым суммарным временем, но разной природой взаимодействия. Зона, просмотренная бегло с множеством коротких фиксации, будет иметь меньший CLI, чем зона, изученная пристально, с несколькими, но длинными фиксациями, даже если суммарное время одинаково. Это критически важно для выявления именно нагрузки, а не просто интереса.

Вопрос определения весовых коэффициентов является центральным для валидности модели. Были выбраны значения $\omega_1 = 0.6$, $\omega_2 = 0.4$, с приоритетом у первого параметра, и вот почему:

1. Суммарное время фиксации является характеристикой, которая более устойчива к шуму, чем среднее значение. Если дать ему меньший вес, индекс CLI станет слишком чувствительным к коротким эпизодам «задумчивости» в неважных зонах.
2. Средняя длительность фиксации является метрикой с высокой дисперсией. Так одна случайная длинная фиксация, например, когда пользователь отвлекся, глядя в точку, может резко завysить среднее.
3. В многокритериальном анализе часто используется разбиение 60/40 для баланса между «Количеством» (общее время) и «Качеством» (интенсивность фиксации) [9].

В итоге мы получаем карту когнитивной нагрузки, на которой кластеры, у которых значение CLI больше, чем у других, идентифицируются как зоны, потребовавшие больших интеллектуальных усилий при визуальном взаимодействии, что может быть обусловлено как высокой информационной значимостью элементов, так и сложностью их обработки. Таким образом описанный подход обеспечивает автоматизированное измерение когнитивной нагрузки на основе поведенческих данных, доступных при использовании неинвазивной системы айтрекинга.

Экспериментальная часть

Для тестирования расчета CLI и влияния параметров кластеризации на выделение зон интереса, был проведен ряд экспериментов, выполненных на различных визуальных сценах. В каждом случае параметры алгоритма DBSCAN изменялись, что позволило получить различающиеся по структуре и детализации результаты кластеризации и оценить чувствительность метода к выбираемым настройкам.

Первый эксперимент с высоко-детализированными объектами представлен на рисунке 3. В верхнем ряду приводятся зарегистрированные данные взгляда, ниж-

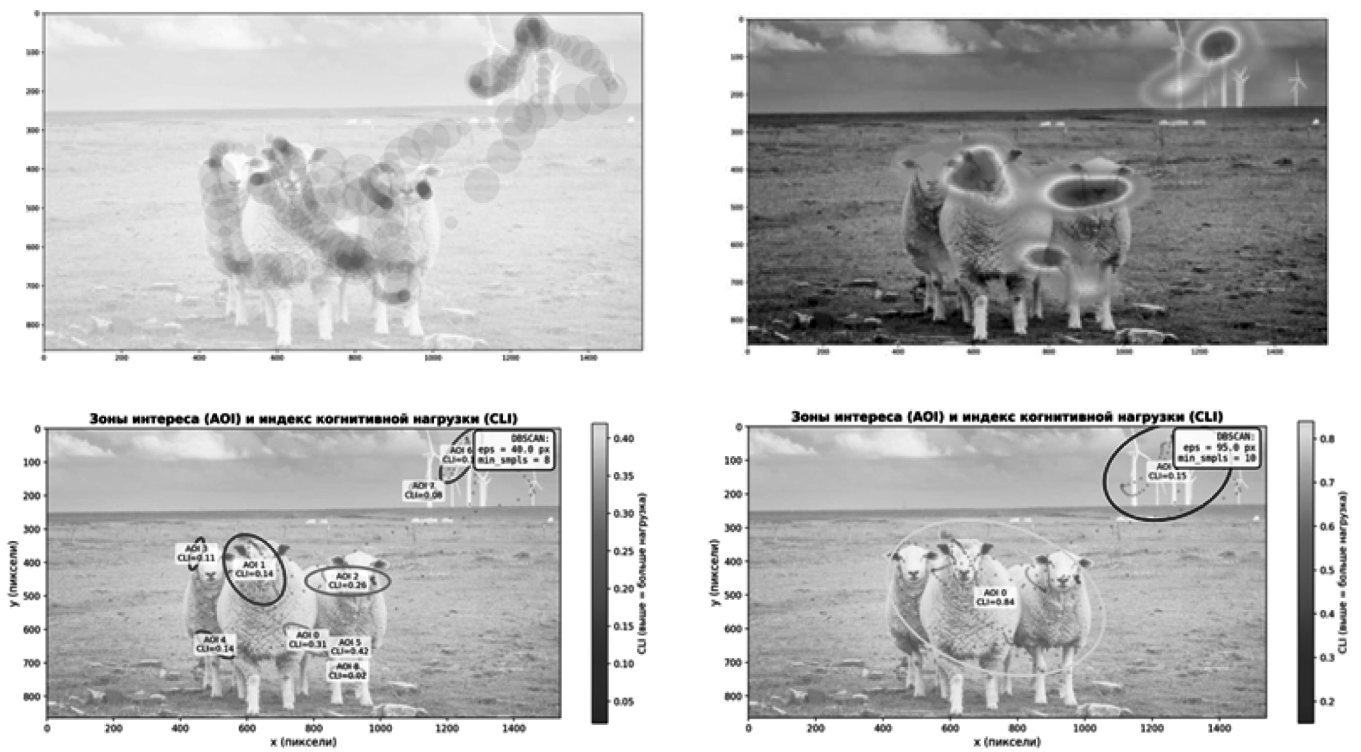


Рис. 3. Первая сцена с высоко-детализированными объектами

няя часть в свою очередь демонстрирует выявленные зоны внимания с когнитивной нагрузкой при разных параметрах алгоритма кластеризации. Полученные значения когнитивной нагрузки приведены в таблице 2.

Таблица 2.

CLI для зон интереса высоко-детализированных объектов

CLI зон интереса с параметрами DBSCAN eps=40, min_samples=8								
AOI ₀	AOI ₁	AOI ₂	AOI ₃	AOI ₄	AOI ₅	AOI ₆	AOI ₇	AOI ₈
0.31	0.14	0.26	0.11	0.14	0.42	0.10	0.08	0.02
CLI зон интереса с параметрами DBSCAN eps=95, min_samples=10								
AOI ₀				AOI ₁				
0.84				0.15				

Во втором эксперименте пользователь смотрел на изображение с несколькими геометрическими объектами (см. рисунок 4), на которые примерно в равной мере было распределено его внимание. Результаты произведенных расчетов при различных параметрах кластеризации представлены в таблице 3.

В третьем эксперименте, представленном на рисунке 5, пользователю демонстрировалось изображение с одним монотонным рисунком (паттерном), не содержащим явно выраженных семантических объектов. По сути, это визуальный шум, не имеющий явных смысловых акцентов. Данные окулomotorной активности демонстри-

руют, что фиксации взгляда распределены достаточно разрозненно, а выраженные кластеры интереса отсутствуют. Несмотря на попытку алгоритма DBSCAN сформировать зоны внимания, полученные кластеры не сопоставляются с конкретными смысловыми объектами под ними, за неимением таковых, а значения индекса CLI оказываются низкими и близкими друг к другу.

Наконец в рамках четвертого эксперимента (см. рисунок 6), пользователю предлагалось визуально изучить сложную композицию, сформированную из набора разнообразных паттернов. Алгоритм определения зон интереса и индекса когнитивной нагрузки в данном случае позволяет оценить распределение пользовательского внимания и демонстрирует то, что в случае с набором различных паттернов пользователь проявляет повышенную умственную деятельность, выражающуюся в поведении взгляда.

Обсуждение результатов

Анализ результатов четырех экспериментов позволяет выявить ключевые закономерности работы предложенного подхода оценки когнитивной нагрузки. Результаты подтверждают, что интеграция алгоритма DBSCAN с композитным индексом CLI формируют гибкую модель определения визуального внимания, чувствительную к пространственной составляющей исходных данных.

Первый и второй эксперименты ярко демонстрирует выраженную зависимость детализации карт когнитив-

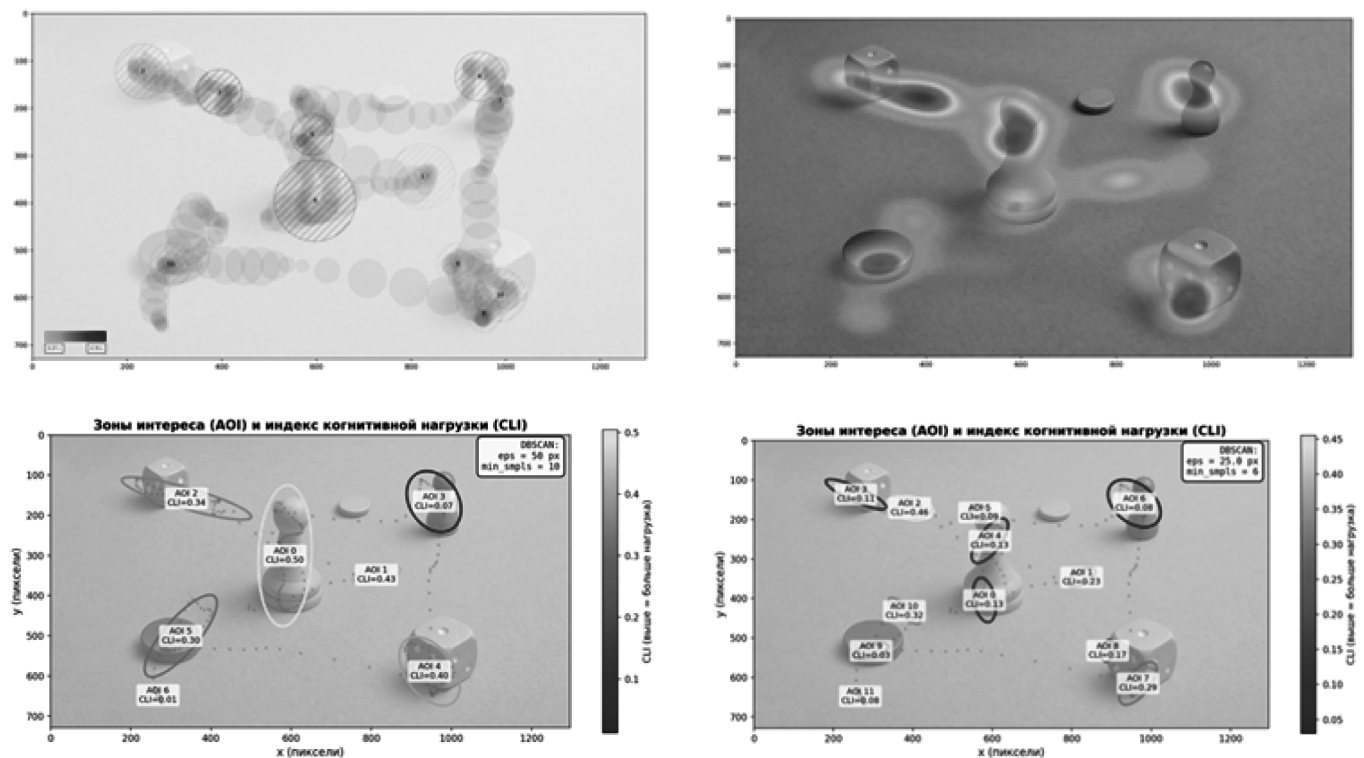


Рис. 4. Вторая сцена с различными геометрическими объектами

Таблица 3.
CLI для зон интереса геометрических фигур

CLI зон интереса с параметрами DBSCAN eps=95, min_samples=10						
AOI ₀	AOI ₁	AOI ₂	AOI ₃	AOI ₄	AOI ₅	AOI ₆
0.5	0.43	0.34	0.07	0.4	0.3	0.01

CLI зон интереса с параметрами DBSCAN eps=25, min_samples=10											
AOI ₀	AOI ₁	AOI ₂	AOI ₃	AOI ₄	AOI ₅	AOI ₆	AOI ₇	AOI ₈	AOI ₉	AOI ₁₀	AOI ₁₁
0.13	0.23	0.46	0.11	0.13	0.09	0.08	0.29	0.17	0.03	0.32	0.08

ной нагрузки от настроек радиуса окрестности и плотности точек кластеров. Малые значения параметров способствуют выявлению локальных зон интереса, позволяя определять небольшие события когнитивной обработки, связанные с отдельными элементами сцены. Увеличение значений параметров приводит к обобщению зон, объединяя разрозненные фиксации в большие кластеры. Свойство масштабируемости позволяет применять данное ПО как на уровне детального изучения элементов интерфейсов, так и для оценки общей композиционной структуры сцены.

В условиях отсутствия семантической структуры в третьем эксперименте распределение фиксаций носит стохастический характер, что приводит к формированию случайных кластеров с низким значением значений

CLI, что отражено в таблице 4. Напротив, наличие выраженной смысловой нагрузки в четвертом эксперименте, в котором пользователь изучал разнообразные паттерны, сопоставляя между собой, выступает катализатором когнитивной активности, значения которой приведены в таблице 5. Реализованный подход подтвердил свою валидность в задачах по исследованию взаимодействия человека с графическими материалами.

Заключение

В ходе выполненного исследования был разработан и экспериментально протестирован подход автоматического обнаружения областей повышенной когнитивной нагрузки на основе данных движения глаз. Мы использовали самописный трекер взгляда для сбора данных окулomotorной активности пользователя во время изучения разнообразных изображений. Основой подхода стала кластеризация фиксаций с использованием алгоритма DBSCAN и вычисление композитного показателя CLI, позволяющего количественно оценивать степень вовлеченности пользователя в анализ различных частей визуальной сцены. Результаты экспериментов подтвердили эффективность предложенного решения при наличии достаточного объема данных и показали пригодность использования в подобных исследованиях. Реализованная программа обеспечивает пространственную интерпретацию распределения внимания, что делает его полезным инструментом при изучении интерфейсов и визуальных материалов для их оптимизации

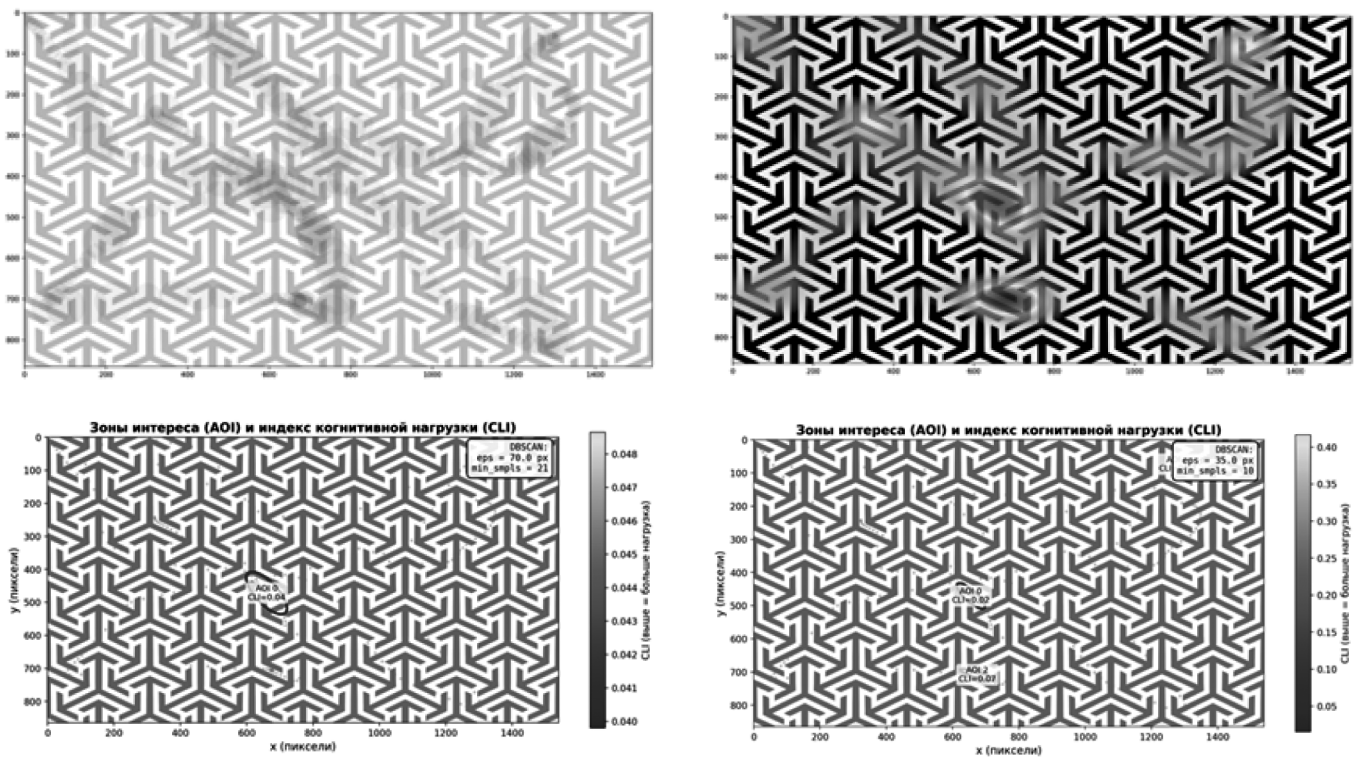


Рис. 5. Третья сцена с одним паттерном

Таблица 4.

CLI для зон интереса одного паттерна

CLI зон интереса с параметрами DBSCAN eps=70, min_samples=21	
AOI ₀	
0.04	
CLI зон интереса с параметрами DBSCAN eps=35, min_samples=10	
AOI ₀	AOI ₁
0.02	0.07

ЛИТЕРАТУРА

1. Lai M.L., et al., A review of using eye-tracking technology in exploring learning from 2000 to 2012. Educational Research Review, 2013, vol. 10, pp. 90–115. DOI: 10.1016/J.EDUREV.2013.10.001.

2. Paas F, Van Merriënboer, J.J.G., Cognitive architecture and instructional design: 20 years later. Educational Psychology Review, 2019, vol. 32, pp. 261–292. DOI: 10.1007/s10648-019-09465-5.

3. Методика оценки удобства интерфейса веб-приложения на основе количественных критериев / С.А. Соловьев, С.С. Гончаров, А.А. Мартынова, Б.С. Горячкин // Естественные и технические науки. — 2022. — № 4(167). — С. 199–205. — DOI 10.25633/ETN.2022.04.17. — EDN XAMDYR.

4. Sweller J., Ayres P., Kalyuga S., Cognitive Load Theory. Springer, 2011. DOI: 10.1007/978-1-4419-8126-4.

5. Paas F.G.W.C., Van Merriënboer, J.J.G., Instructional control of cognitive load in the training of complex cognitive tasks. Educational Psychology Review, 1994, vol. 6, no. 4, pp. 351–371. DOI: 10.1007/BF02213420.

6. Горячкин Б.С. Определение акцентов внимания с помощью интеллектуального самописного трекера глаз / Б.С. Горячкин, А.А. Савельев // Computational Nanotechnology. — 2024. — Т. 11, № 4. — С. 35–44. — DOI 10.33693/2313-223X-2024-11-4-35-44. — EDN FYRWAJ.

7. Ester M. et al., A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise // kdd. — 1996. — V. 96. — №. 34. — P. 226–231.

8. Just M.A., Carpenter P.A., A theory of reading: From eye fixations to comprehension. Psychological Review, 1980, 329–354. DOI:10.1037/0033-295X.87.4.329

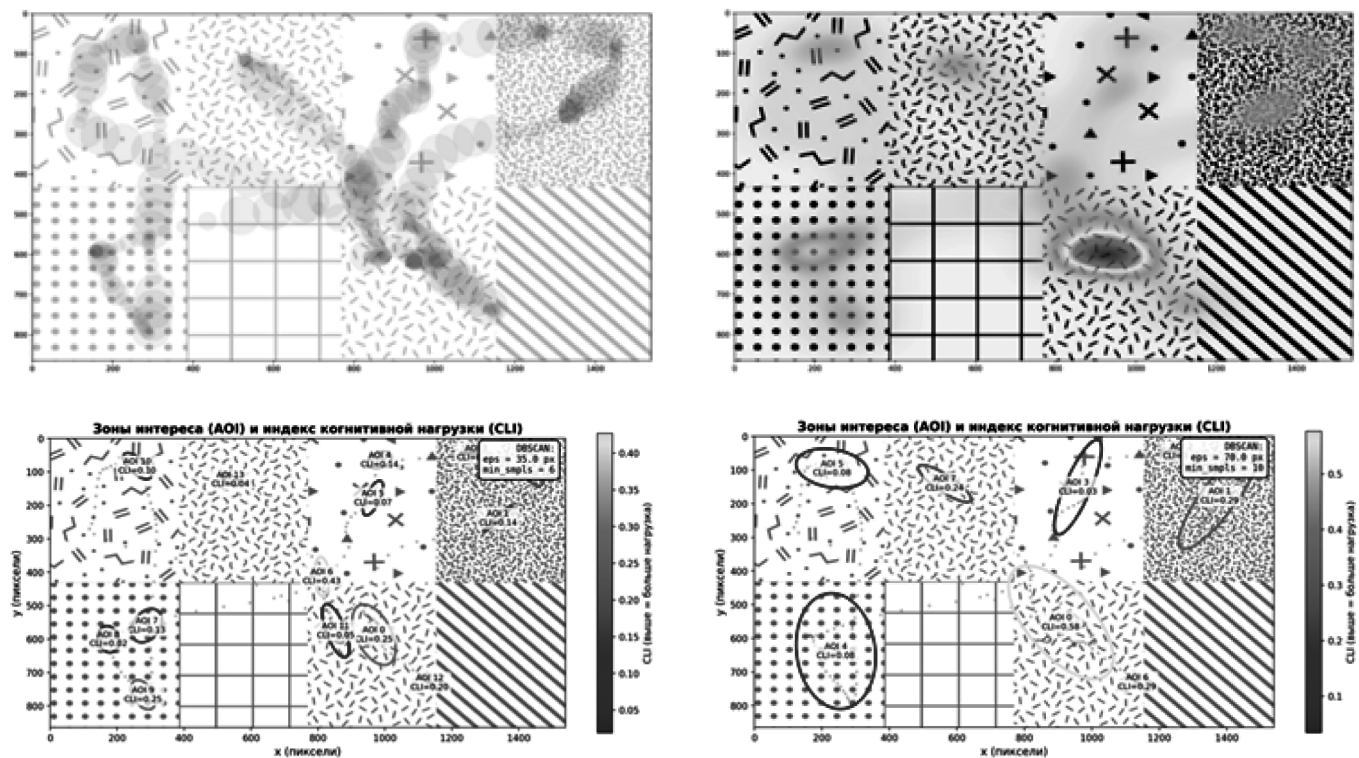


Рис. 6. Четвертая сцена с композицией паттернов

Таблица 5.

CLI для зон интереса композиции паттернов

CLI зон интереса с параметрами DBSCAN eps=35, min_samples=6													
AOI ₀	AOI ₁	AOI ₂	AOI ₃	AOI ₄	AOI ₅	AOI ₆	AOI ₇	AOI ₈	AOI ₉	AOI ₁₀	AOI ₁₁	AOI ₁₂	AOI ₁₃
0.25	0.14	0.18	0.16	0.14	0.07	0.43	0.13	0.02	0.25	0.1	0.05	0.2	0.04

CLI зон интереса с параметрами DBSCAN eps=70, min_samples=10							
AOI ₀	AOI ₁	AOI ₂	AOI ₃	AOI ₄	AOI ₅	AOI ₆	AOI ₇
0.58	0.29	0.28	0.31	0.03	0.08	0.29	0.24

9. Meghanathan R.N., et al. Fixation duration surpasses pupil size as a measure of memory load. *Frontiers in Psychology*, 2015, vol. 6, article 1063. DOI: 10.3389/fpsyg.2015.01063.
10. Горячкин Б.С. Эффективность принципов адаптивной верстки при разработке пользовательских интерфейсов / Б.С. Горячкин, Д.В. Бобров // *Динамика сложных систем* — XXI век. — 2023. — Т. 17, № 1. — С. 55–62. — DOI 10.18127/j19997493-202301-04. — EDN SEJPOZ.

© Горячкин Борис Сергеевич (bsgor@mail.ru); Савельев Алексей Александрович (savelevvaa@mail.ru);
Фонин Максим Алексеевич (max.fonin@mail.ru); Лобанов Дмитрий Сергеевич (citrusbound@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МЕТОД ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ АНОМАЛИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ МОДЕЛЕЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

A HYBRID DEEP LEARNING METHOD FOR ANOMALY DETECTION IN VISUAL DATA OF ROBOTIC PRODUCTION SYSTEMS

V. Dyomin
O. Romashkova

Summary. The paper addresses the problem of anomaly detection in visual data of robotic production systems. A hybrid method combining convolutional networks, a transformer module, and reconstruction-based analysis is proposed. The approach enables robust detection of both local and global defects and operates without anomaly labels. Experiments demonstrate improved accuracy and robustness to domain shifts compared to existing methods, confirming its applicability to industrial quality control.

Keywords: anomaly detection, machine vision, robotic systems, hybrid models, convolutional networks, transformers; reconstruction, quality control.

Дёмин Владислав Дмитриевич

Аспирант, ГАОУ ВО Московский городской
педагогический университет
neyronich@sofa-invest.ru

Ромашкова Оксана Николаевна

Доктор технических наук, профессор,
Российская академия народного хозяйства
и государственной службы при Президенте РФ, г. Москва
ox-rom@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматривается задача детектирования аномалий в визуальных данных роботизированных производственных систем. Предложен гибридный метод, объединяющий сверточные сети, трансформерный модуль и реконструкционный анализ. Метод обеспечивает устойчивое выделение локальных и глобальных дефектов и работает при отсутствии разметки. Эксперименты показывают повышение точности и устойчивости к доменным смещениям по сравнению с существующими подходами, что подтверждает его применимость в промышленном контроле качества.

Ключевые слова: детектирование аномалий, техническое зрение, роботизированные системы, гибридные модели; сверточные сети, трансформеры, реконструкция, контроль качества.

Введение

Задачи детектирования аномалий в визуальных данных роботизированных производственных систем осложняются высокой вариативностью технологических условий, шумами сенсоров и отсутствием достаточного числа размеченных примеров дефектов [1, 2]. Классические статистические методы и отдельные нейросетевые подходы демонстрируют ограниченную эффективность при работе с изображениями высокой размерности и нестабильных условий съёмки [3, 4]. Это определяет необходимость разработки методов, способных объединять локальные и глобальные признаки, обеспечивать устойчивость к доменному смещению и сохранять высокую точность при отсутствии разметки. В настоящей работе предлагается гибридная модель, сочетающая элементы сверточных нейронных сетей, трансформерных архитектур и реконструкционного анализа. Статья включает аналитический обзор существующих методов, формальную постановку задачи, описание предлагаемой архитектуры и результаты экспериментальной оценки на данных, моделирующих реальные условия промышленного производства.

1. Анализ современных методов детектирования аномалий в производственных данных

Классические статистические методы детектирования

Классические статистические методы применяются в задачах промышленного контроля благодаря простоте реализации и интерпретируемости. Они хорошо работают при анализе низкоразмерных данных, однако их эффективность существенно снижается при обработке изображений высокой размерности из-за нелинейной структуры признаков и сильной чувствительности к шумам [3, 5].

Одним из наиболее распространённых критериев статистического отклонения является расстояние Махаланобиса [6]

$$D_M(x) = \sqrt{(x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu)}. \quad (1)$$

где x — вектор наблюдения размерности d ;

μ — вектор средних значений распределения нормальных данных;

Σ — ковариационная матрица нормального режима;

Σ^{-1} — обратная ковариационная матрица;

$D_M(x)$ — расстояние Махаланобиса, характеризующее степень отклонения наблюдения от нормы.

При наличии линейной структуры нормальных данных применяется метод главных компонент (PCA) [3], позволяющий выделять подпространство максимальной дисперсии. Разложение матрицы наблюдений задаётся выражением

$$X = USV^T, \quad (2)$$

где X — матрица данных размерности $n \times d$;

U, S, V — матрицы сингулярного разложения.

Восстановление наблюдения через подпространство основных компонент осуществляется по формуле

$$\hat{x} = V_k V_k^T x, \quad (3)$$

где \hat{x} — восстановленное наблюдение;

V_k — матрица первых k главных собственных векторов;

x — исходное наблюдение,

а метрика отклонения вычисляется как

$$e = \|x - \hat{x}\|_2. \quad (4)$$

где e — величина ошибки восстановления;

x — исходное наблюдение;

\hat{x} — восстановленное наблюдение, полученное через подпространство PCA;

$\|\cdot\|$ — евклидова норма.

С целью лучшего разделения нормальных и аномальных данных был предложен One-Class SVM [4]. Оптимизационная задача формулируется как

$$\min_{w, p, \xi} \left(\frac{1}{2} \|w\|^2 + \frac{1}{vn} \sum_{i=1}^n \xi_i - p \right), \quad (5)$$

где w — вектор весов гиперплоскости в пространстве признаков;

p — пороговое значение функции решения;

ξ_i — slack-переменные, допускающие ошибки классификации;

v — параметр, определяющий долю допускаемых ошибок;

n — количество обучающих наблюдений

при ограничениях

$$w^T \phi(x_i) \geq p - \xi_i, \xi_i \geq 0. \quad (6)$$

где $\phi(x_i)$ — отображение признаков в скрытое пространство (обычно RBF-ядро);

x_i — наблюдение из обучающей выборки;

ξ_i — slack-переменные;

p — пороговая величина решения;

w — параметр разделяющей поверхности.

Ещё одно направление применения классических методов — оценка плотности распределения вероятностей (KDE). Плотность определяется выражением

$$p(x) = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right), \quad (7)$$

где $p(x)$ — оценённая плотность распределения вероятностей в точке x ;

n — число наблюдений;

h — ширина ядра;

d — размерность пространства признаков;

$K(\cdot)$ — ядровая функция (чаще всего — гауссово ядро);

x_i — наблюдение обучающей выборки.

Однако уже при $d > 20$ модель становится практически неработоспособной (проклятие размерности), а в задачах компьютерного зрения размерность данных достигает $10^5 - 10^6$, что делает KDE неприменимым.

Сравнительные исследования [7, 8] показывают, что традиционные методы работают удовлетворительно только на данных с низкой размерностью и стабильным распределением. Практические исследования показывают, что их качество существенно ниже, чем у современных нейросетевых моделей: на наборах дефектов AUC редко превышает 0,70–0,75, что ограничивает их использование в задачах промышленного визуального контроля.

Глубокие модели сегментации и их роль в задачах детектирования аномалий

Современные методы глубокого обучения позволяют эффективно анализировать изображения высокой размерности и учитывать как локальные, так и глобальные особенности объектов. Сверточные нейронные сети (CNN) обеспечивают извлечение локальных признаков и устойчивы к вариациям мелких структур, тогда как трансформерные архитектуры способны моделировать дальние зависимости за счёт механизма самовнимания [7–9].

Одной из наиболее применимых архитектур сегментации является U-Net, формирующая бинарную карту принадлежности пикселей классу [10]

$$f_{\theta} : R^H \times W \times C \rightarrow \{0,1\}^{H \times W}, \quad (8)$$

где H, W — размеры изображения;

C — число каналов входных данных;

f_{θ} — параметризуемая глубокая модель;

$\{0,1\}^{H \times W}$ — бинарная карта сегментации.

Функция потерь для задач бинарной сегментации часто задаётся через бинарную кросс-энтропию

$$L = -\frac{1}{HW} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W [y_{ij} \ln p_{ij} + (1 - y_{ij}) \ln (1 - p_{ij})]. \quad (9)$$

где y_{ij} — истинная метка пикселя;

p_{ij} — предсказанная вероятность принадлежности классу;

L — функция ошибки, минимизируемая в процессе обучения.

При отсутствии аннотированных данных широко используются реконструкционные модели — автоэнкодеры (AE), вариационные автоэнкодеры (VAE) и их модификации. Они определяют аномалии по величине расхождения между входным и восстановленным изображением (4). В VAE минимизация осуществляется через дивергенцию распределений в скрытом пространстве

$$L_{VAE} = D_{KL}(q_{\phi}(z|x) \| p(z)) + E_{q_{\phi}(z|x)} [\|x - \hat{x}\|_2^2]. \quad (10)$$

где $q_{\phi}(z|x)$ — аппроксимация апостериорного распределения;

$p(z)$ — априорное распределение;

D_{KL} — дивергенция Кульбака–Лейблера.

Появление Vision Transformer (ViT) позволило моделировать изображение как последовательность патчей фиксированного размера [7] $x \rightarrow \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$. При этом глобальные зависимости описываются механизмом внимания

$$A = \text{softmax}\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d}}\right), \quad (11)$$

где Q, K — матрицы запросов и ключей;

d — размерность скрытого пространства;

A — матрица внимания, определяющая взаимосвязи между патчами.

Сравнительные исследования [7, 8] показывают, что CNN-архитектуры превосходят трансформеры в поиске мелких локальных дефектов (царапины, поры, включения), тогда как трансформеры лучше выявляют крупные структурные изменения и глобальные нарушения формы.

Поэтому глубокие модели сегментации рассматриваются как ключевой компонент в построении гибридных методов детектирования аномалий, которые объединяют локальный анализ CNN, глобальный контекст трансформеров и устойчивость реконструкционных моделей для повышения точности контроля качества в условиях высокой вариативности производственных данных.

2. Проблемы и ограничения существующих решений на роботизированных линиях производства

Применение существующих методов детектирования аномалий в роботизированных производственных системах осложняется высокой вариативностью условий съёмки, технологическими шумами и нестабильностью распределений данных [7, 8]. Наблюдаемое изображение можно представить в виде

$$x_t = x_t^* + \eta_t, \quad (12)$$

где x_t^* — идеальное (шумосвободное) изображение;

η_t — совокупный технологический шум.

Шум η_t имеет сложную структуру и включает несколько компонент

$$\eta_t = \eta_t^{illum} + \eta_t^{motion} + \eta_t^{sensor}, \quad (13)$$

где η_t^{illum} — шумы освещения;

η_t^{motion} — смещения и размытость из-за вибраций;

η_t^{sensor} — шумы сенсора видеокамеры.

Такой тип шумов существенно затрудняет применение моделей, предполагающих стационарность распределения данных (как в статистических методах) или чистоту входа (как в реконструкционных моделях).

Ещё одним важным ограничением является редкость аномалий. В реальных производственных условиях соотношение «аномалия/норма» часто составляет менее 1 %: $\frac{|A|}{|N|} < 0.01$. Такой дисбаланс приводит к переобучению нейросетевых моделей на нормальные паттерны и снижению чувствительности к редким видам дефектов.

Значительное влияние оказывает и смещение распределения данных (domain shift), возникающее при изменении типа сырья, условий освещения, конфигурации оборудования и других параметров производственного процесса. В таких условиях выполняется

$$p_t(x) \neq p_{t+1}(x), \quad (14)$$

где $p_t(x)$ — распределение данных в момент времени t ;

$p_{t+1}(x)$ — распределение данных после изменения технологических условий.

Большинство моделей глубокого обучения чувствительны к таким смещениям и требуют дополнительного дообучения, что затруднительно в условиях ограниченных вычислительных ресурсов промышленного оборудования.

В совокупности эти факторы приводят к тому, что существующие методы детектирования аномалий недостаточно устойчивы к производственным шумам, плохо адаптируются к изменениям технологических условий и не обеспечивают требуемой скорости обработки. Это делает необходимым создание гибридных подходов, объединяющих локальный анализ CNN, глобальный контекст трансформеров и устойчивость реконструкционных моделей.

3. Постановка задачи и разработка гибридного метода

Рассматривается множество визуальных наблюдений $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, тогда каждое наблюдение может относиться либо к нормальному классу, либо к классу аномалий

$$x_i \in \begin{cases} N, \text{нормальный режим,} \\ A, \text{аномалия.} \end{cases}$$

При этом для производственных данных характерна сильная несбалансированность классов: $|A| \ll |N|$, что

затрудняет использование традиционных идеологий обучения. Наблюдение подвержено технологическим шумам, структура которых ранее была представлена в формуле (12), что приводит к вариативности распределений данных и усложняет выявление дефектов.

Задача заключается в построении функции отклонения $D(x)$, обеспечивающей разделение классов

$$D(x) > \tau \Rightarrow x \in A, \quad (15)$$

где $D(x)$ — функция отклонения, формируемая моделью;

τ — порог детектирования, определяемый статистически или на основе реконструкционной ошибки.

Для оценки качества работы метода используются стандартные метрики бинарной классификации

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}, Recall = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (16)$$

где TP — число истинно положительных срабатываний;

FP — ложноположительные срабатывания;

FN — ложноотрицательные решения.

Таким образом, требуется построить устойчивую метрику отклонения $D(x)$, учитывающую шумы, нестационарность и ограниченность разметки.

Архитектура предлагаемой гибридной модели

Предлагаемая архитектура объединяет локальные признаки, извлекаемые CNN, глобальные зависимости, моделируемые трансформером, и реконструкционный модуль для восстановления нормального состояния изображения. CNN-encoder обеспечивает обработку мелких локальных структур, тогда как трансформер формирует представление на уровне патчей, взаимодействие которых определяется матрицей внимания, приведённой ранее (11).

Для объединения скрытых представлений используется взвешенное смешивание

$$z = \alpha z_{cnn} + (1 - \alpha) z_{tr}, \quad (17)$$

где z_{cnn} — локальные признаки, извлечённые CNN;

z_{tr} — глобальные признаки трансформера;

α — коэффициент, определяющий вклад локального и глобального анализа.

Реконструкционный модуль восстанавливает \hat{x} , а отклонение определяется через ошибку реконструкции (см. формулу (4)). Такая схема обеспечивает устойчивость к шумам и доменным смещениям, а также чувствительность к локальным и глобальным дефектам.

Функция потерь и критерии оптимизации

Для повышения точности детектирования используется комбинированная функция потерь, включающая реконструкционную и признаковую составляющие. Ошибка в пространстве признаков задаётся следующим выражением

$$L_{emb} = \|z_{cnn} - \hat{z}_{cnn}\|_2^2 + \|z_{tr} - \hat{z}_{tr}\|_2^2, \quad (18)$$

где z_{cnn}, z_{tr} — локальные и глобальные признаки исходного изображения;

$\hat{z}_{cnn}, \hat{z}_{tr}$ — признаки реконструкции;

$\|\cdot\|$ — евклидова норма.

Итоговая функция потерь имеет вид

$$L = \lambda_1 L_{rec} + \lambda_2 L_{emb}, \quad (19)$$

где L_{rec} — реконструкционная ошибка (4);

L_{emb} — ошибка в пространстве признаков (18);

λ_1, λ_2 — коэффициенты, регулирующие вклад каждого компонента.

Выбор коэффициентов позволяет регулировать чувствительность модели к локальным или глобальным искажениям.

Практическая интеграция в производственный цикл

При внедрении метода в промышленные системы учитываются ограничения по времени обработки, нестабильность условий съёмки и ограниченность ресурсов встраиваемого оборудования. Для обеспечения работы в режиме, близком к реальному времени, применяются методы оптимизации: квантование параметров, уменьшение размерности признаков и упрощение операций самовнимания.

Для компенсации доменных смещений используются адаптивные обновления статистики нормального режима и периодическое дообучение отдельных блоков. Решения модели интегрируются в систему управления производством, где требуется минимизация ложных срабатываний и обеспечение интерпретируемости.

4. Экспериментальная оценка метода

Эксперименты проводились на данных, моделирующих условия функционирования роботизированных производственных линий. Использовались изображения поверхностей металлических и композиционных материалов, содержащие нормальные образцы и аномалии различных типов. Набор данных включал как реальные производственные снимки, так и синтетически добавленные дефекты для контроля структуры аномальных событий.

Обучение модели выполнялось только на нормальных изображениях, что соответствует промышленному сценарию с редкими аномалиями. Для оценки точности использовались метрики AUC-ROC, Precision, Recall и F1 (16). Перед обучением выполнялась нормализация интенсивности, масштабирование изображений и разбиение на обучающую и тестовую части. Для повышения объективности результатов проводилась перекрёстная проверка с несколькими разбиениями данных.

Такой экспериментальный протокол позволяет достоверно оценить способность модели работать в условиях реального производственного процесса при наличии технологических шумов, вариативности освещения и доменных смещений.

Сравнение с существующими методами

Для сравнения эффективности гибридной модели были использованы статистические методы (PCA, One-Class SVM, KDE), реконструкционные нейросетевые модели (AE, VAE), а также сегментационные и трансформерные архитектуры [3, 7, 8]. Классические методы демонстрируют низкую устойчивость к дефектам малой площади и заметно уступают современным нейросетям. Реконструкционные архитектуры обеспечивают более высокую точность, но склонны сглаживать мелкие аномалии. Трансформерные модели хорошо выявляют крупные структурные нарушения, однако имеют высокую вычислительную сложность и недостаточную устойчивость к шумам.

Для количественного сравнения использовались метрики AUC-ROC, Precision, Recall и F1-мера. Результаты приведены в таблице 1.

Предложенная архитектура демонстрирует лучшие результаты по основным метрикам, что подтверждает преимущества объединения локальных и глобальных признаков.

Результаты и анализ эффективности

Для детального анализа оценивалась эффективность выявления различных типов аномалий: мелких поверх-

Таблица 1.
Результаты сравнительного анализа методов

Метод	AUC-ROC	Precision	Recall	F1
PCA	0,71	0,52	0,48	0,50
One-Class SVM	0,74	0,55	0,57	0,56
KDE	0,63	0,49	0,41	0,45
AE	0,85	0,71	0,66	0,68
VAE	0,88	0,74	0,69	0,71
U-Net (без разметки аномалий)	0,82	0,69	0,61	0,65
ViT	0,90	0,78	0,72	0,75
Гибридная модель	0,95	0,86	0,83	0,84

ностных повреждений, текстурных искажений, разрывов структуры и крупных деформаций. В таблице ниже приведены значения F1-меры для различных классов дефектов. Таблица 2 отражает сравнительные значения F1-меры для различных типов дефектов.

Таблица 2.
Точность выявления различных типов аномалий (F1-мера)

Тип дефекта	PCA	AE	VAE	ViT	Гибридная модель
Мелкие поверхностные дефекты	0,42	0,61	0,64	0,68	0,81
Локальные разрывы / царапины	0,47	0,66	0,69	0,72	0,85
Сложные текстурные отклонения	0,50	0,58	0,62	0,71	0,84
Крупные геометрические деформации	0,67	0,78	0,80	0,89	0,92
Шумы/артефакты освещения	0,39	0,55	0,60	0,74	0,88

Дополнительно проведён анализ зависимости времени обработки кадра от размера входного изображения. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3.
Среднее время обработки одного кадра (мс)

Метод	256×256	512×512	768×768
AE	4,1	7,8	12,4
VAE	5,3	9,6	15,7
ViT	18,5	34,1	61,3
Гибридная модель	9,4	16,8	28,9

Таким образом, гибридная архитектура достигает оптимального баланса между точностью, устойчивостью и вычислительной производительностью, что делает её особенно подходящей для внедрения в роботизированные линии промышленного контроля качества.

Несмотря на высокую точность, гибридный метод остаётся чувствительным к изменению статистики нормального режима и требует периодического обновления эталонных данных при существенном доменном смещении. При неправильной настройке коэффициентов функции потерь (19) возможны как пропуски слабовыраженных дефектов, так и избыточные ложные срабатывания, особенно при нестабильном освещении и шуме сенсора. В условиях ограниченных ресурсов скорость обработки зависит от степени оптимизации трансформерного модуля и реконструкционного блока, однако даже при этих ограничениях метод демонстрирует устойчивость к технологическим шумам и вариативности структуры поверхности, что позволяет применять его в реальных роботизированных системах контроля качества.

Заключение

В работе предложен гибридный метод детектирования аномалий, объединяющий сверточные сети, трансформерный модуль и реконструкционный анализ. Использование локальных и глобальных признаков позволило повысить точность и устойчивость к шумам и доменным смещениям по сравнению с классическими и современными нейросетевыми подходами. Экспериментальная оценка подтвердила эффективность модели при работе с визуальными данными производственных систем и показала, что метод обеспечивает требуемое время обработки для применения в роботизированных линиях контроля качества. Дальнейшее развитие связано с улучшением адаптации к изменяющимся условиям и внедрением методов самообучения в условиях дефицита размеченных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group. Acatech — National Academy of Science and Engineering, 2013. 78 p.
2. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 2015, vol. 3, pp. 18–23.
3. Jolliffe I.T. *Principal Component Analysis*. Springer Series in Statistics. 2nd ed. New York: Springer, 2002. 488 p.
4. Новикова А.С., Ромашкова О.Н. Интеграция нейросетей в информационные системы розничных торговых сетей: прогнозирование и управление распределением ресурсов // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики*. Серия: Естественные и технические науки. 2024. № 1-2. С. 49–52.
5. Mahalanobis P.C. On the generalized distance in statistics. *Proceedings of the National Institute of Sciences of India*, 1936, vol. 2(1), pp. 49–55.
6. Гурарий С.А. Методы анализа изображений в автоматизированных системах контроля качества. М.: Машиностроение, 2013. 248 с.
7. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *MICCAI 2015, LNCS*, vol. 9351, Springer, pp. 234–241.
8. Dosovitskiy A. et al. An image is worth 16×16 words: Transformers for image recognition at scale. *ICLR 2021*. arXiv:2010.11929.
9. Ломовцев Р.С., Ромашкова О.Н., Пономарева Л.А. Алгоритм интеллектуальной поддержки управленческих решений для региональной образовательной системы // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2018. № 10 (71). С. 35–43.
10. Çiçek Ö., Abdulkadir A., Lienkamp S.S., Brox T., Ronneberger O. 3D U-Net: Learning dense volumetric segmentation from sparse annotation. *MICCAI 2016, LNCS*, vol. 9901, Springer, pp. 424–432.

© Дёмин Владислав Дмитриевич (neyronich@sofa-invest.ru); Ромашкова Оксана Николаевна (ox-rom@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРЕДПОДГОТОВКИ ДАННЫХ ДЛЯ ПОДСИСТЕМЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ АНОМАЛИЙ

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR DATA PRE-PREPARATION FOR THE ANOMALY DETECTION SUBSYSTEM

V. Eliseeva
N. Kosyura

Summary. The aim of the study is to develop an algorithm for data pre-preparation for the anomaly detection subsystem, aimed at increasing the stability and accuracy of intelligent analysis in conditions of noisy and heterogeneous input streams. An algorithm proposed that combines the stages of purification, adaptive normalization, feature selection, and nonlinear data transformation into a single processing sequence. The algorithm considers the specifics of streaming and high-dimensional data typical for cybersecurity tasks, industrial monitoring, and network telemetry analysis. The analysis of the principles of the algorithm structure carried out and the choice of the pre-training methods used is justified. It shown that the proposed approach makes it possible to reduce the impact of noise and emissions, increase the information content of the feature space, and create conditions for more stable operation of anomaly detection models. The results obtained can used in the design of analytical subsystems and data processing pipelines as part of modern monitoring and security systems.

Keywords: data pre-preparation, data processing algorithm, anomaly detection, data purification, normalization, recognition selection, machine learning.

Елисеева Виктория Денисовна
ФГБОУ ВО Волгоградский государственный
технический университет
viktoriya.eliseeva.2002@mail.ru
Косюра Надежда Александровна
ФГБОУ ВО Волгоградский государственный
технический университет
nadejdakna2002@gmail.com

Аннотация. Целью исследования является разработка алгоритма предподготовки данных для подсистемы детектирования аномалий, ориентированной на повышение устойчивости и точности интеллектуального анализа в условиях шумных и неоднородных входных потоков. В работе предложен алгоритм, объединяющий этапы очистки, адаптивной нормализации, отбора признаков и нелинейной трансформации данных в единую последовательность обработки. Алгоритм учитывает специфику потоковых и высокоразмерных данных, характерных для задач кибербезопасности, промышленного мониторинга и анализа сетевой телеметрии. Проведён анализ принципов построения алгоритма и обоснован выбор используемых методов предподготовки. Показано, что предложенный подход позволяет снизить влияние шумов и выбросов, повысить информативность признакового пространства и создать условия для более стабильной работы моделей детектирования аномалий. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании аналитических подсистем и конвейеров обработки данных в составе современных систем мониторинга и безопасности.

Ключевые слова: предподготовка данных, алгоритм обработки данных, детектирование аномалий, очистка данных, нормализация, отбор признаков, машинное обучение.

Введение

Современные системы детектирования аномалий широко применяются в задачах кибербезопасности, промышленного мониторинга, анализа сетевого трафика и технической диагностики. В условиях роста объёмов данных и усложнения их структуры ключевым фактором эффективности таких систем становится не столько выбор модели машинного обучения, сколько качество и согласованность предподготовки входных данных. Практика показывает, что значительная часть ошибок классификации и ложных срабатываний обусловлена недостаточно формализованными или фрагментарными процедурами очистки, нормализации и формирования признакового пространства. Несмотря на большое количество исследований, посвящённых отдельным методам предподготовки данных, в большинстве прикладных решений данный этап реализуется в виде набора разрозненных процедур, не объединён-

ных в единый алгоритм. Отсутствие формализованного алгоритма предподготовки приводит к снижению воспроизводимости результатов, усложняет интеграцию аналитических моделей в автоматизированные конвейеры и ограничивает адаптацию систем детектирования аномалий к изменяющимся условиям среды и характеристикам входных потоков данных.

В этой связи актуальной является задача разработки алгоритма предподготовки данных, ориентированного на использование в подсистемах детектирования аномалий и учитывающего специфику многомерных, потоковых и зашумлённых данных. Такой алгоритм должен обеспечивать последовательную обработку входной информации, включающую устранение шумов и выбросов, приведение данных к сопоставимым масштабам, отбор информативных признаков и снижение размерности при сохранении значимых закономерностей. Целью настоящей работы является разработка алгоритма пред-

подготовки данных для подсистемы детектирования аномалий и обоснование его структуры с позиции повышения устойчивости и эффективности аналитических моделей. В рамках исследования формируется логика алгоритма, определяются ключевые этапы обработки данных и их взаимосвязь, а также обозначаются направления практического применения предложенного решения в системах мониторинга и безопасности.

Результаты и обсуждение

Вопросы предподготовки данных и отбора признаков в задачах детектирования аномалий рассматриваются в современных исследованиях как один из ключевых факторов эффективности интеллектуального анализа данных и машинного обучения. По мнению А.Н. Линдигрина (2021), корректность предварительной обработки сетевых данных, включающей фильтрацию шумов, устранение выбросов и балансировку классов, в значительной мере определяет предельные возможности аналитических моделей [1]. Автор подчёркивает, что неочищенные и слабо структурированные журналы событий приводят к росту ложных срабатываний и снижению надёжности систем обнаружения аномалий. Как отмечает В.С. Никулин (2020), сложность предподготовки существенно возрастает при работе с большими и неоднородными потоками данных, характерными для распределённых вычислительных систем [2]. В таких условиях требуется системный подход, включающий многоступенчатую фильтрацию, нормализацию и адаптивное преобразование признаков. По результатам его исследований можно полагать, что внедрение интеллектуальных методов на этапе предподготовки позволяет повысить достоверность диагностики и снизить количество ложных отклонений.

По результатам работы П.Ю. Гусева и А.В. Таволжанского (2024), процесс подготовки данных для задач предиктивной аналитики целесообразно рассматривать как итеративный алгоритм, в котором все этапы от очистки до масштабирования и балансировки должны быть формализованы и автоматизированы [3]. Авторы подчёркивают значимость гибридных подходов, сочетающих статистические методы и алгоритмы машинного обучения. Сходной позиции придерживается И.А. Попова (2022), указывая, что обучаемые модели могут использоваться не только для анализа, но и для коррекции пропусков и шумов в исходных данных, формируя основу самонастраивающихся систем предподготовки [4]. Исследование А. Boukerche, L. Zheng и O. Alfandi (2020) показывает, что методы обнаружения выбросов являются фундаментальным элементом предподготовки данных в системах детектирования аномалий [5]. Авторы предлагают таксономию стратегий обнаружения выбросов и отмечают ограниченность классических методов при работе с потоковыми и высокоразмерными данными. В этой связи

особое внимание уделяется применению нейронных сетей и кластерных моделей для автоматической фильтрации шумов и выбросов.

В работах, посвящённых сетевой безопасности, подчёркивается необходимость учёта адверсариальных воздействий уже на этапе предподготовки данных. Так, E. Alhajjar, P. Maxwell и N. Bastian (2021) демонстрируют, что специально модифицированные входные данные способны снижать эффективность моделей NIDS, несмотря на использование сложных алгоритмов машинного обучения [6]. Авторы обосновывают целесообразность применения устойчивых методов предподготовки, включая стохастическое сглаживание и обучение с добавлением шумовых примеров. Широкий обзор методов обнаружения сетевых аномалий представлен и в работе M. Ahmed, A.N. Mahmood и J. Hu (2016), где этап предподготовки данных рассматривается как определяющий для корректной классификации [7]. Авторы выделяют классификационные, статистические, информационно-теоретические и кластеризационные подходы, указывая на проблему отсутствия стандартизированных процедур подготовки данных, что затрудняет сопоставимость результатов различных систем.

Проблема избыточных и нерелевантных признаков подробно рассмотрена М.А. Ambusaidi и соавторами (2016), которые предлагают алгоритм фильтрационного отбора признаков на основе взаимной информации [8]. Эксперименты на наборах данных KDD Cup 99 и NSL-KDD показывают, что применение метода FMIFS позволяет повысить точность классификации и сократить вычислительные затраты без потери качества анализа. Пример интеграции предподготовки данных в архитектуру реального времени представлен в работе Y. Dong, R. Wang и J. He (2019), где очистка, кодирование и нормализация данных выполняются в потоковом режиме с использованием Flume и Flink [9]. Использование автоэнкодеров для снижения размерности позволило достичь точности детектирования 94,32 %, однако авторы отмечают высокие вычислительные затраты и сложность обучения моделей.

Проблемы качества обучающих данных также подчёркнуты в исследовании M. Ring, S. Wunderlich и коллег (2019), где проведён анализ 34 сетевых датасетов [10]. Авторы показывают, что несбалансированность классов и недостаточное описание реальных сценариев атак существенно ограничивают эффективность моделей. Аналогичные выводы делают H. Hadian Jazi и соавторы (2017), указывая, что корректная выборка данных критична для обнаружения DoS-атак на уровне приложений [11]. Для задач снижения размерности Y. Hamid и M. Sugumaran (2020) предлагают использовать метод t-SNE, который позволяет выявлять сложные взаимосвязи между признаками и повышать эффективность класси-

фикаторов типа SVM [12]. Несмотря на рост точности, авторы отмечают значительные вычислительные затраты данного подхода.

Так, анализ представленных источников показывает, что развитие систем детектирования аномалий тесно связано с совершенствованием методов предподготовки данных. Современные тенденции направлены на переход от разрозненных процедур к формализованным и автоматизированным алгоритмам, интегрированным в аналитические конвейеры и MLOps-процессы. Данные выводы формируют основу для разработки алгоритма предподготовки данных, ориентированного на универсальное применение в подсистемах детектирования аномалий с возможностью адаптации под специфику конкретных задач. На следующем этапе исследования, опираясь на результаты проведённого анализа научных источников, осуществляется разработка алгоритма предподготовки данных для подсистемы детектирования аномалий. В основу алгоритма закладываются методы очистки, нормализации, отбора и трансформации признаков, выбор которых обосновывается с точки зрения их вычислительной эффективности, устойчивости к шумам и способности сохранять информативность данных.

В рамках исследования проводится сравнительный анализ производительности отдельных методов предподготовки, по результатам которого формируется универсальная модель алгоритма, допускающая адаптацию к различным прикладным задачам за счёт параметрических и структурных корректировок. Разработка такого алгоритма представляет собой основной результат работы и направлена на обеспечение воспроизводимости, масштабируемости и практической применимости подсистем детектирования аномалий в условиях разнородных и динамически изменяющихся входных данных. Итак, на основе проведённого анализа современных методов предподготовки данных целесообразным является переход от разрозненных процедур очистки и трансформации к формализованному алгоритму, ориентированному на использование в подсистемах детектирования аномалий. Разрабатываемый алгоритм должен обеспечивать последовательную обработку данных, учитывать специфику высокоразмерных и потоковых входных массивов, а также допускать адаптацию под различные прикладные области при сохранении общей структуры. В данном разделе предлагается алгоритм предподготовки данных, объединяющий ключевые этапы обработки в единую логическую схему и ориентированный на повышение устойчивости и воспроизводимости результатов детектирования аномалий (рисунок 1).

Входные данные:

- 1) сырые данные D , поступающие из журналов событий, телеметрии, датчиков или сетевых потоков.

Выходные данные:

- 2) подготовленный набор данных D' , пригодный для обучения и функционирования подсистемы детектирования аномалий.

Работа разработанного алгоритма предподготовки данных начинается с приёма входных массивов и их первичной валидации, в ходе которой анализируется структурная целостность данных, корректность форматов и наличие обязательных атрибутов. На этом этапе формируется базовое представление о качестве входного потока и принимается решение о необходимости углублённой очистки. Далее алгоритм последовательно выполняет очистку данных от дублирующихся и некорректных записей, а также обработку пропусков с использованием статистических или обучаемых методов восстановления, что позволяет сохранить объём и информативность данных. После стабилизации структуры данных осуществляется выявление и обработка выбросов, способных исказить обучение моделей детектирования аномалий; в зависимости от плотности и размерности данных применяются статистические или кластерные подходы с возможностью адаптивной перенастройки порогов. На следующем этапе признаки приводятся к сопоставимым масштабам путём нормализации или стандартизации, что обеспечивает корректную работу алгоритмов машинного обучения и устойчивость модели при изменении распределений входных данных. Завершающая часть алгоритма направлена на формирование информативного признакового пространства за счёт отбора релевантных атрибутов и, при необходимости, нелинейной трансформации данных, после чего формируется итоговый набор данных, готовый для обучения и эксплуатации подсистемы детектирования аномалий.

Для формального описания задачи разработки алгоритма предподготовки данных в подсистеме детектирования аномалий целесообразно представить процесс обработки входной информации в виде отображения исходного пространства данных в преобразованное признаковое пространство, обеспечивающее повышение устойчивости и точности аналитических моделей. Формализация позволяет определить цель предподготовки данных, критерии качества и ограничения, накладываемые на процесс обработки.

Пусть исходный набор данных представляется в виде матрицы наблюдений:

$$X = \{x_{ij}\}, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M,$$

где N — количество наблюдений, а

M — число исходных признаков, характеризующих состояние анализируемой системы.

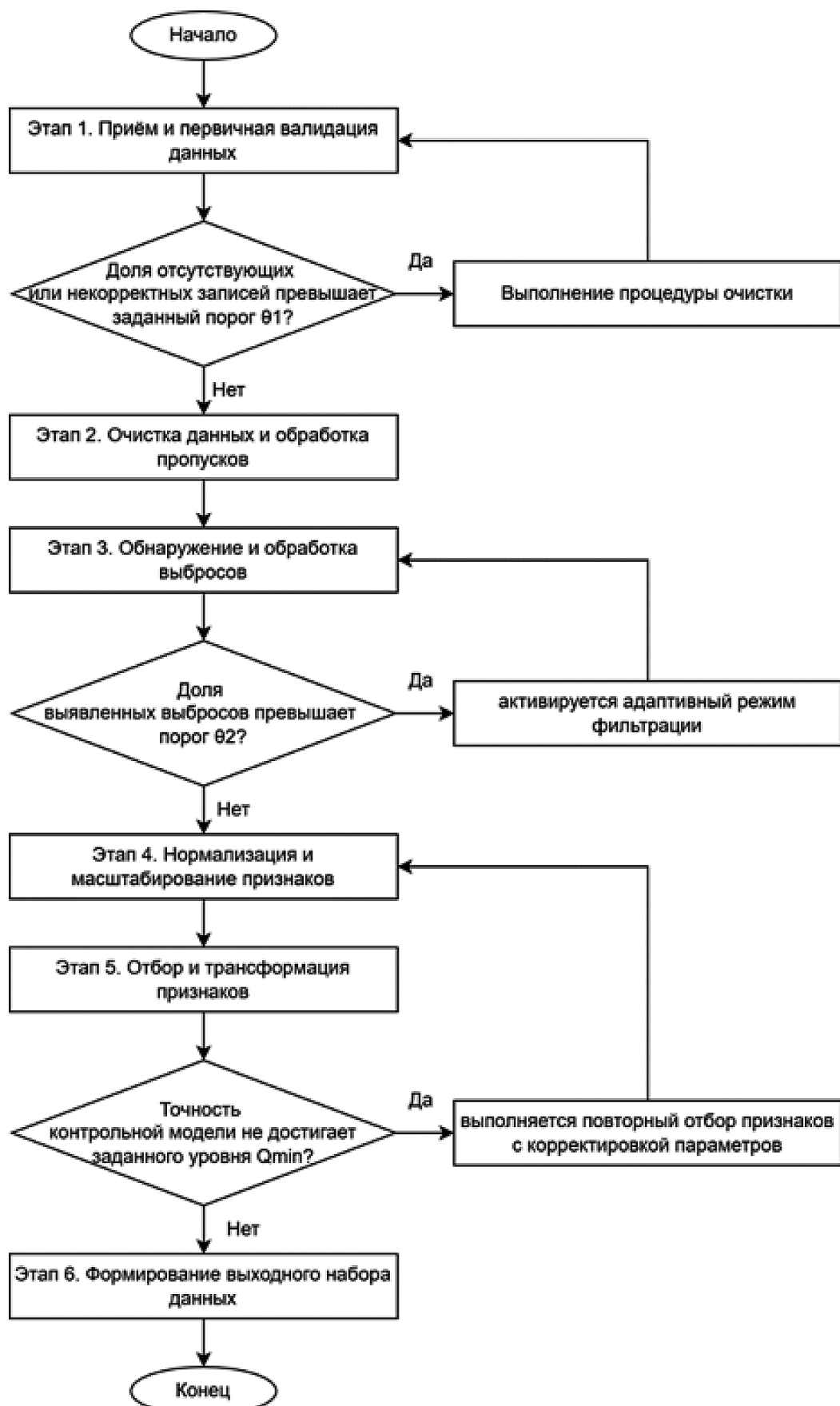


Рис. 1. Алгоритм предподготовки данных для подсистемы детектирования аномалий

Входные данные могут содержать шумы, выбросы и пропуски, что снижает эффективность алгоритмов детектирования аномалий. Процесс предподготовки данных задаётся в виде композиции последовательных преобразований:

$$X' = F_k \circ F_{k-1} \circ \dots \circ F_1(X),$$

где F_1 — оператор очистки и обработки пропусков,

F_2 — оператор обнаружения и фильтрации выбросов,

F_k — оператор нормализации, отбора и трансформации признаков.

Результатом применения данных преобразований является набор данных X' , обладающий улучшенными статистическими и структурными свойствами. Цель предподготовки данных формализуется как задача оптимизации качества детектирования аномалий:

$$\max_Q Q(A(X')),$$

где A — алгоритм детектирования аномалий,

$Q(\cdot)$ — функция качества, характеризующая точность, устойчивость или полноту обнаружения аномальных событий.

Так, алгоритм предподготовки данных рассматривается как самостоятельный объект оптимизации, обеспечивающий повышение эффективности последующего анализа за счёт формирования устойчивого и информативного признакового пространства. Для практической реализации разработанного алгоритма предподготовки данных необходимо выбрать конкретные методы обработки, соответствующие каждому этапу алгоритма. Выбор методов осуществлялся на основе анализа их вычислительной эффективности, устойчивости к шумам и выбросам, а также влияния на качество детектирования аномалий. С целью обоснования выбора был проведён сравнительный анализ наиболее распространённых и показательных методов предподготовки данных, применяемых в задачах обнаружения аномалий.

1. Выбор методов для этапов алгоритма.

На этапе очистки данных и обработки пропусков для анализа были выбраны методы удаления записей с пропусками, статистической аппроксимации (среднее и медиана) и обучаемой реконструкции на основе k -ближайших соседей (kNN). Данные методы различаются по вычислительной сложности и степени сохранения структуры данных.

Для этапа обнаружения и обработки выбросов рассматривались статистический метод на основе межквартильного размаха (IQR), алгоритм Local Outlier Factor (LOF) и кластерный подход на основе DBSCAN. Данные

методы позволяют оценить устойчивость алгоритма при работе с выбросами различной природы.

На этапе нормализации и масштабирования признаков анализировались методы Min-Max-нормализации, Z-нормализации и робастного масштабирования, устойчивого к выбросам.

Для этапа отбора и трансформации признаков рассматривались корреляционный фильтр, метод отбора на основе взаимной информации (MI) и нелинейное снижение размерности с использованием автоэнкодеров.

2. Методика проведения эксперимента.

Экспериментальная оценка проводилась на основе стандартных наборов данных, применяемых в задачах детектирования аномалий, включая NSL-KDD и синтетические выборки с контролируемым уровнем шума и выбросов. Для оценки влияния методов предподготовки использовалась фиксированная модель детектирования аномалий (изолирующий лес), что позволило исключить влияние архитектуры модели на результаты эксперимента.

В качестве количественного показателя использовалась метрика F1-score, отражающая баланс между точностью и полнотой обнаружения аномалий, а также среднее время обработки одного пакета данных. Каждый эксперимент повторялся несколько раз с последующим усреднением результатов. Результаты количественного анализа методов предподготовки данных представлены в таблице 1.

Таблица 1.
Сравнительная оценка методов предподготовки данных

Этап алгоритма	Метод	F1-score	Время обработки, мс
Обработка пропусков	Удаление записей	0,78	12
	Среднее значение	0,82	15
	kNN-реконструкция	0,86	41
Обнаружение выбросов	IQR	0,81	18
	LOF	0,87	56
	DBSCAN	0,85	63
Нормализация	Min-Max	0,83	9
	Z-нормализация	0,85	11
	Робастное масштабирование	0,86	14
Отбор признаков	Корреляционный фильтр	0,84	7
	Взаимная информация	0,88	19
	Автоэнкодер	0,89	74

Для комплексной оценки эффективности выбранных методов предподготовки данных выполнена совмещённая визуализация результатов экспериментального анализа, отражающая как качество детектирования аномалий, так и вычислительные затраты применяемых подходов. На рисунке 2 представлены значения показателя F1-score (рис. 2, а) и среднего времени обработки данных (рис. 2, б), что позволяет наглядно сопоставить точностные и временные характеристики методов и выявить компромиссные решения, наиболее подходящие для использования в составе универсального алгоритма предподготовки данных.

Анализ данных, представленных на рисунке 2а, показывает, что наибольшие значения показателя F1-score достигаются при использовании интеллектуальных методов предподготовки данных, таких как автоэнкодеры, методы отбора признаков на основе взаимной информации и алгоритм LOF. В то же время рисунок 2б. демонстрирует, что указанные методы характеризуются повышенными вычислительными затратами по сравнению с простыми статистическими и фильтрационными подходами. Минимальное время обработки обеспечивают корреляционный фильтр и методы линейной нормализации, однако их применение сопровождается умеренным снижением качества детектирования аномалий.

Итак, результаты эксперимента показывают, что более простые методы предподготовки обладают высокой вычислительной эффективностью, однако уступают по качеству детектирования аномалий более сложным интеллектуальным подходам. В частности, kNN-реконструкция и LOF демонстрируют наилучшие значения F1-score, но сопровождаются ростом вычислительных затрат. Аналогичная тенденция наблюдается при использовании автоэнкодеров для отбора и трансформации признаков. С учётом необходимости универсальности и масштабируемости алгоритма в качестве базовых были выбраны методы, обеспечивающие компромисс между точностью и вычислительной сложностью, с возможностью их замены на более сложные при повышенных требованиях к качеству анализа.

3. Итоговые рекомендации по выбору методов предподготовки данных.

По результатам работы были сформированы следующие рекомендации для их применения в разработанном алгоритме предподготовки данных для подсистемы детектирования аномалий (таблица 2):

Проведённый анализ и экспериментальная оценка методов предподготовки данных позволили обосновать выбор конкретных методов для каждого этапа разработанного алгоритма. Полученные результаты подтверждают, что оптимальная предподготовка данных должна строиться на компромиссе между вычислительной эф-

Таблица 2.
Рекомендуемые методы для этапов алгоритма предподготовки данных

Этап алгоритма	Базовый метод	Альтернативный метод
Обработка пропусков	Статистическая аппроксимация	kNN-реконструкция
Обнаружение выбросов	IQR	LOF
Нормализация признаков	Z-нормализация	Робастное масштабирование
Отбор признаков	Взаимная информация	Автоэнкодер
Снижение размерности	Корреляционный фильтр	Нелинейные методы

фективностью и качеством детектирования аномалий. Сформированная совокупность методов обеспечивает универсальность алгоритма и допускает его адаптацию под различные прикладные задачи за счёт параметрической настройки и замены отдельных этапов обработки. Это позволяет рассматривать предложенный алгоритм как практическую основу для построения подсистем детектирования аномалий в условиях разнородных и динамически изменяющихся данных.

Заключение

В работе рассмотрена и решена задача повышения эффективности систем детектирования аномалий за счёт разработки алгоритма предподготовки данных, ориентированного на обработку разнородных, зашумлённых и высокоразмерных входных потоков. На основе анализа современных научных исследований показано, что этап предподготовки данных является критически значимым для устойчивости и точности интеллектуальных моделей, при этом в большинстве существующих решений он реализуется фрагментарно и без формализованного алгоритмического описания. В рамках исследования предложен структурированный алгоритм предподготовки данных, включающий этапы валидации, очистки, обработки выбросов, нормализации и отбора признаков, а также обоснован выбор методов для каждого этапа на основе сравнительного анализа точности и вычислительных затрат. Полученные результаты подтверждают, что формализованный и адаптивный подход к предподготовке данных позволяет обеспечить воспроизводимость, масштабируемость и практическую применимость подсистем детектирования аномалий в различных предметных областях. Выводы по результатам работы:

- разработан алгоритм предподготовки данных для подсистемы детектирования аномалий, обладающий модульной структурой и допускающий адаптацию к различным типам данных и условиям эксплуатации;

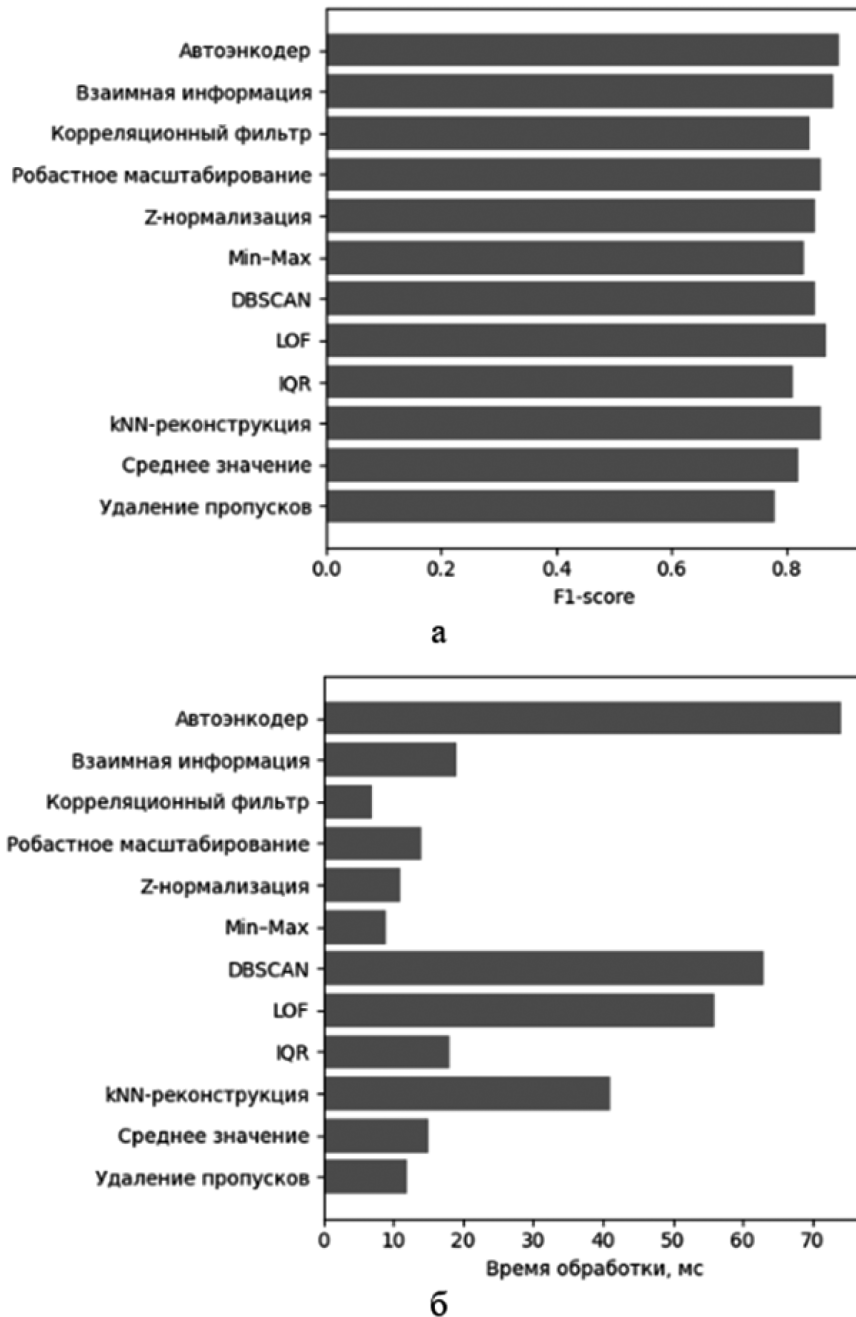


Рис. 2. Сравнительный анализ эффективности и вычислительных затрат методов предподготовки данных (а — сравнение методов по показателю F1-score, б — сравнение методов по времени обработки данных)

- проведён сравнительный анализ методов предподготовки данных, позволивший количественно оценить их влияние на качество детектирования аномалий и вычислительные затраты;
- обоснован выбор базовых и альтернативных методов для каждого этапа алгоритма, обеспечивающих компромисс между точностью анализа и быстродействием системы.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением экспериментальной базы за счёт использования дополнительных наборов данных и моделей

детектирования аномалий, а также с интеграцией предложенного алгоритма в реальные аналитические конвейеры и MLOps-среды. Практическая ценность работы заключается в возможности использования разработанного алгоритма в качестве универсальной основы для построения подсистем детектирования аномалий в задачах кибербезопасности, промышленного мониторинга и анализа сетевых данных, что позволяет повысить надёжность и устойчивость интеллектуальных систем в условиях роста объёмов и сложности обрабатываемой информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Линдигрин А.Н. Анализ специфики и проблематики процессов поиска аномалий в сетевых данных // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. №5. С. 304–309.
2. Никулин В.С. Методика подготовки данных для интеллектуального анализа надежности вычислительных комплексов // Вестник СибГУТИ. 2020. №3 (51). С. 26–37.
3. Гусев П.Ю., Таволжанский А.В. Алгоритмизация обработки и подготовки данных для построения моделей предиктивной аналитики // Вестник ВГТУ. 2024. №2. С. 14–19.
4. Попова И.А. Исследование алгоритмов машинного обучения для предварительной обработки данных в задачах регрессии // Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных: Сборник статей Всероссийской научной конференции. В 2-х томах Москва. 2022. С. 237–242.
5. Boukerche A., Zheng L., Alfandi O. Outlier Detection: Methods, Models, and Classification // ACM Computing Surveys (CSUR). 2020. Vol. 53, No. 3. Article No. 55. P. 1–37.
6. Alhajjar E., Maxwell P., Bastian N. Adversarial Machine Learning in Network Intrusion Detection Systems // Expert Systems with Applications. 2021. Vol. 186. Article No. 115782. 30 December.
7. Ahmed M., Mahmood A.N., Hu J. A Survey of Network Anomaly Detection Techniques // Journal of Network and Computer Applications. 2016. Vol. 60. P. 19–31.
8. Ambusaidi M.A., He X., Nanda P., Tan Z. Building an Intrusion Detection System Using a Filter-Based Feature Selection Algorithm // IEEE Transactions on Computers. 2016. Vol. 65, No. 10. P. 2986–2998.
9. Dong Y., Wang R., He J. Real-Time Network Intrusion Detection System Based on Deep Learning // Proceedings of the IEEE International Conference on Software Engineering and Service Sciences (ICSESS). 2019. P. 1–4.
10. Ring M., Wunderlich S., Scheuring D., Landes D., Hotho A. A Survey of Network-Based Intrusion Detection Data Sets // Computers & Security. 2019. Vol. 86. P. 147–167.
11. Hadian Jazi H., Gonzalez H., Stakhanova N., Ghorbani A.A. Detecting HTTP-Based Application Layer DoS Attacks on Web Servers in the Presence of Sampling // Computer Networks. 2017. Vol. 121. P. 25–36.
12. Hamid Y., Sugumaran M. A t-SNE Based Non-Linear Dimension Reduction for Network Intrusion Detection // International Journal of Information Technology (Singapore). 2020. Vol. 12, No. 1. P. 125–134.

© Елисеева Виктория Денисовна (viktoriya.eliseeva.2002@mail.ru); Косюра Надежда Александровна (nadejdakna2002@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЭПОХУ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

TRANSFORMATION OF THE DECISION- MAKING PROCESS IN THE ERA OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

A. Zadornov
P. Yurchik

Summary. This paper explores the impact of artificial intelligence (AI) on the transformation of decision-making processes, as well as the integration of AI into various organizational and business processes. The main approaches and models, such as the symbolic approach, neural networks, and hybrid methods, are examined, along with their impact on decision-making under uncertainty. The evolution of integration mechanisms is described, ranging from the automation of routine tasks to adaptive decision-making with AI. Special attention is given to the risks associated with AI implementation, such as the «black box» problem and data bias. Recommendations are provided for organizations aiming to effectively integrate AI into decision-making processes, as well as areas for future research.

Keywords: artificial intelligence, decision-making, AI integration, symbolic approach, neural networks, adaptive decision-making, automation, evolution, risks, ethics.

Задорнов Александр Андреевич

Аспирант, Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет
1flakon1@gmail.com

Юрчик Петр Францевич

доктор технических наук, профессор,
Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет
upf.madi@mail.ru

Аннотация. В статье исследуется влияние искусственного интеллекта (ИИ) на трансформацию процессов принятия решений, а также интеграцию ИИ в различные организационные и бизнес-процессы. Рассматриваются основные подходы и модели, такие как символический подход, нейронные сети и гибридные методы, а также их влияние на принятие решений в условиях неопределенности. Описывается эволюция интеграционных механизмов, начиная с автоматизации рутинных задач и заканчивая адаптивным принятием решений с использованием ИИ. Особое внимание уделено рискам, связанным с внедрением ИИ, таким как проблемы «черного ящика» и предвзятость данных. Приводятся рекомендации для организаций, стремящихся эффективно интегрировать ИИ в процессы принятия решений, а также направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: искусственный интеллект, принятие решений, интеграция ИИ, символический подход, нейронные сети, адаптивное принятие решений, автоматизация, эволюция, риски, этика.

Введение

Искусственный интеллект (ИИ) кардинально трансформирует процессы принятия решений. Его способность обрабатывать массивы данных, выявлять закономерности и предлагать оптимальные решения открывает новые возможности для предприятий. Однако, интеграция ИИ — сложный процесс, требующий тщательного планирования.

Актуальность статьи обусловлена кардинальными изменениями в области ИИ. Традиционные методы, основанные на человеческих ощущениях, не справляются с объемами информации современного оцифрованного мира. ИИ предоставляет инструменты для их обработки и анализа, помогая принимать обоснованные решения.

Интеграция ИИ — не только техническая, но и организационная задача. Необходимо адаптировать структуры и процессы, обучить персонал, обеспечить прозрачность решений ИИ, учесть этические аспекты. Оценка эффективности и соответствия целям также является вызовом.

Данное исследование фокусируется на методологическом анализе интеграции ИИ в принятие решений. Цель — предложить целостную рамку для понимания и оптимизации этих процессов и сформулировать рекомендации для дальнейших исследований и практики.

Методологические основы исследования трансформации процессов принятия решений при внедрении ИИ

1. Подходы к изучению ИИ

Существуют различные концептуальные подходы к изучению ИИ, которые можно условно разделить на несколько основных групп:

Символический подход. Подход основывается на представлении информации в виде символов и правил, используя логические выводы для решения задач. Ключевые методы включают в себя экспертные системы, логическое программирование и планирование. Этот подход эффективен для задач, где правила и зна-

ния могут быть явно выражены и формализованы. Главное преимущество символического подхода — ясность и прозрачность процесса принятия решений, так как он основан на явных правилах. Однако, он ограничен в обработке нечетких, неполных или противоречивых данных, а также в обучении и адаптации к новым ситуациям.

Подход на основе нейронных сетей. Основан на моделировании работы человеческого мозга, используя искусственные нейронные сети. Этот подход особенно эффективен для обработки больших объемов сложных данных, таких как изображения, звук, тексты. Он широко применяется для задач распознавания образов, обработки естественного языка. Главные преимущества — способность обучаться на сырых данных без явных правил, устойчивость к искажениям входных данных, способность обобщать и применять полученные знания к новым данным. Однако, понимание работы нейронных сетей может быть сложной из-за их непрозрачной структуры. Обученная нейронная сеть — это «чёрный ящик», который выдает результаты, но логика ее решений не всегда ясна и понятна человеку.

Эволюционный подход. Как понятно из названия, подход использует особенности эволюции для разработки и оптимизации ИИ-систем. Основные методы — генетические алгоритмы и эволюционные стратегии. Эти методы работают с популяциями потенциальных решений, которые подвергаются итеративной эволюции. На каждой итерации (поколении) особи оцениваются с помощью функции, которая определяет, насколько хорошо они решают поставленную задачу. Наиболее приспособленные особи выбираются для размножения и дают потомство для следующего поколения, с некоторыми случайными мутациями. Этот процесс повторяется много раз, постепенно эволюционируя популяцию к более оптимальным решениям. Эволюционный подход особенно эффективен для задач оптимизации с большим числом параметров, например, в дизайне, инжиниринге, планировании. Он позволяет находить новые, не совсем очевидные решения, которые трудно придумать человеку или классическим алгоритмам.

Гибридные подходы. В последнее время все большее распространение получают гибридные подходы, которые сочетают в себе элементы различных концептуальных подходов. Например, могут использоваться нейронные сети для выделения признаков из сырых данных, а затем эти признаки подаются на вход символьной системе.

Выбор конкретного подхода к изучению ИИ зависит от особенностей задачи, доступных данных (датасетов) и требований к прозрачности и обоснованности решений.

2. Теоретические модели принятия решений

Модель рационального выбора — эта классическая модель предполагает, что человек обладает полной информацией обо всех возможных альтернативах и их последствиях, имеет четкие предпочтения и стремится достичь заданной цели путем выбора наиболее релевантного варианта. В этой модели процесс принятия решений включает:

1. Идентификацию проблемы;
2. Генерацию всех возможных альтернатив;
3. Оценку ожидаемой полезности каждой альтернативы;
4. Выбор альтернативы с максимальной ожидаемой полезностью.

Эта модель служит важной отправной точкой для анализа, однако в реальности люди и организации редко действуют полностью рационально из-за ограничений в информации и времени.

Модель ограниченной рациональности. Эта модель предполагает, что люди не всегда располагают полной необходимой информацией. Вместо поиска оптимального решения, они часто используют первый вариант, понравившийся им, который достигает минимально необходимого результата. Процесс принятия решений в этой модели более итеративный и адаптивный. Эта модель лучше объясняет реальное поведение в условиях ограниченных ресурсов и неопределенности.

Модель «теория перспектив». Эта модель фокусируется на том, как люди принимают решения в условиях риска и неопределенности. Она учитывает психологические факторы, такие как неприятие потерь и искажения вероятностей. Эта модель помогает объяснить многие наблюдаемые отклонения от рационального выбора.

Модель принятия решений в условиях неопределенности. Эта модель рассматривает ситуации, когда вероятности различных исходов неизвестны или не могут быть точно оценены и рассчитаны. В модели используются критерии принятия решений, не требующие знания вероятностей. Выбор критерия зависит от склонности ЛПР к риску.

Интеграция ИИ существенно меняет спектр применения этих моделей принятия решений.

С одной стороны, ИИ-системы могут быть спроектированы как инструменты, строго следующие принципам теории полезности и теории игр. Они могут обрабатывать огромные массивы информации, точно рассчитывать вероятности и оптимизировать решения исходя из заданных задач.

С другой стороны, применение ИИ поднимает новые вопросы, например доверия, прозрачности и отчетности. Будут ли решения, принятые ИИ, приниматься и исполняться людьми, особенно если их логика не до конца понятна? Как обеспечить, чтобы цели и ценности в ИИ соответствовали человеческим? Как распределить ответственность между человеком и машиной и сохранить возможность человеческого контроля над критическими решениями? Эти вопросы требуют тесного диалога между архитекторами ИИ, специалистами по принятию решений, философами, юристами, социологами.

3. Эволюция интеграции ИИ

Интеграция ИИ в процессы принятия решений — это постепенный путь, на котором можно выделить несколько этапов. Каждый из этих этапов характеризуется своими целями, технологиями и изменениями.

На начальном этапе ИИ применяется для автоматизации повторяющихся задач (обработка документов, распознавание образов, классификация). Это освобождает человеческие ресурсы для более сложной аналитической и творческой работы. Механизмы интеграции на этом этапе просты, они основаны на жестких правилах и не требуют глубоких изменений в процессах принятия решений.

На следующем этапе ИИ начинает играть более активную роль в процессе принятия решений, предоставляя ЛПР информацию, которая им необходима, выявляя скрытые закономерности, генерируя возможные альтернативы и прогнозируя их последствия на основе большого объема информации и случаев из прошлого. Человек по-прежнему несет ответственность за выбор, но опирается на рекомендации ИИ-системы. Это требует более тесной интеграции ИИ в информационные сети, а также обучения персонала эффективному взаимодействию с ИИ. Многие системы бизнес-аналитики, рекомендательные системы уже используют ИИ.

Некоторые решения могут полностью делегироваться ИИ-системам, особенно в ситуациях, требующих быстрой реакции или обработки большого количества данных в реальном времени. Это могут быть решения по автоматической торговле на финансовых рынках, управлению цепочками поставок, обнаружению мошенничества и так далее. На этом этапе ИИ-системы должны быть глубоко интегрированы в процессы и иметь необходимые права для принятия решений. В то же время, они должны соответствовать заданным политикам и ограничениям, иметь механизмы объяснения своих решений и предоставлять отчеты по решениям. Это требует тщательного управления рисками и четких протоколов взаимодействия человека и ИИ.

Адаптивное принятие решений — наиболее продвинутый этап, он предполагает создание ИИ-систем,

способных самостоятельно адаптироваться к изменениям окружающей их среды, обучаться на опыте и динамически корректировать свои стратегии принятия решений. Такие системы могут не только оптимально действовать в рамках заданных моделей, но и пересматривать сами эти модели по мере накопления данных. Самообучающиеся системы управления производством, адаптивные системы кибербезопасности уже используют адаптивное принятие решений. Интеграция таких систем требует принципиально новых архитектур данных и управления знаниями и информацией, позволяющих ИИ-инструментам накапливать опыт и выделять знания.

На каждом из этих этапов необходимы свои методы интеграции и управления рисками. Какой бы продвинутой ни была ИИ-система, ее интеграция в процесс принятия решений — это не просто технический вопрос, но и управления изменениями, стратегической коммуникации.

Для успешной интеграции необходимо учитывать следующие пункты и ответить на соответствующие вопросы:

- Каких бизнес-результатов вы хотите достичь с помощью ИИ? Какие решения вы, как отдельный человек или организация, готовы ему доверить?
- Как обеспечить ИИ-систему качественными и непредвзятыми данными? Как организовать потоки данных между ИИ и персоналом?
- Какие типы моделей лучше подходят для наших задач?
- Как будет выглядеть процесс принятия решений с участием ИИ? Какие интерфейсы необходимы для эффективной коммуникации человека и ИИ?
- Как будет измеряться качество решений ИИ и его влияние на бизнес? Как организовать мониторинг и постоянное совершенствование ИИ-систем?
- Как обеспечить, чтобы решения ИИ соответствовали этическим нормам? Какие механизмы прозрачности и отчетности необходимы?
- Как подготовить сотрудников к работе с ИИ?

В заключение данной части хочется отметить, что исследование интеграции ИИ в процессы принятия решений требует комплексного подхода, объединяющего знания из множества областей (информатики, психологии, теории принятия решений, менеджмента, этики). Мы должны рассматривать ИИ не просто как инструмент, а как партнера в совместном процессе принятия решений, со своими сильными и слабыми сторонами, требующего адаптации технических и социальных систем.

Трансформационные механизмы принятия решений при внедрении ИИ

1. Характеристика процессов принятия решений

Традиционные процессы принятия решений часто характеризуются нижеперечисленными особенностями.

Ограниченность данных — доступ к информации часто ограничен, используются структурированные внутренние данные организации.

Субъективность — суждения ЛПР часто подвержены влиянию личных убеждений, эмоций, искажений.

Медлительность — процесс принятия решений часто носит последовательный характер, с множеством итераций и согласований между различными участниками.

Ограниченная масштабируемость — традиционные методы принятия решений плохо масштабируются на ситуации с большим количеством факторов, альтернатив, критериев.

Внедрение ИИ кардинально трансформирует эти характеристики процессов принятия решений:

- Расширение доступа к данным. ИИ-системы способны собирать и обрабатывать огромные массивы разнородных данных, как структурированных, так и неструктурированных, как внутренних, так и внешних.
- Уменьшение субъективности. ИИ-алгоритмы анализируют данные беспристрастно, основываясь на закономерностях, а не на субъективных факторах.
- Ускорение процесса. ИИ может параллельно обрабатывать множество источников информации, быстро находить в них закономерности, генерировать и оценивать множество альтернатив. Он не нуждается в паузах и не тратит время на рутинные операции.
- Увеличение масштабируемости. ИИ-модели могут учитывать огромное количество переменных. Они могут находить оптимальные решения в множестве альтернатив, недоступных для полного анализа человеком.

В некоторых областях ИИ уже превысил человеческий уровень точности, например, в распознавании изображений, предсказании поведения пользователей, диагностике некоторых заболеваний. Но важно отметить, что вышенаписанное справедливо только для тех случаев, где ИИ обучен на качественных данных и правильно настроен — некорректное применение ИИ может существенно снижать точность решений.

При всех преимуществах внедрение ИИ в процессы принятия решений несет и новые вызовы и риски, которые необходимо учитывать важные факторы:

- Проблема «чёрного ящика» — многие продвинутые ИИ-модели, особенно построенные на глубоких нейронных сетях, являются «чёрными ящиками» — они выдают решения, но логика этих решений непрозрачна и трудна для интерпретации человеком.

- Сложности интерпретации — даже если выводы ИИ-систем точны с технической точки зрения, они могут быть трудны для интерпретации и применения человеком, принимающим решения.
- Риски предвзятости данных — ИИ-модели обучаются на данных, которые могут содержать предвзятость и ошибки. Если не выявить и не исправить эти искажения, ИИ будет их воспроизводить и усиливать в своих решениях.
- Риски некорректного применения — при всей своей мощи, ИИ-модели работают корректно только на тех данных и задачах, для которых они разрабатывались и обучались. Попытка применить модель к другой области приведет к ошибкам и сбоям.

Внедрение ИИ в процессы принятия решений — это не просто замена одного инструмента другим. Оно часто требует переосмысления и перестройки самих бизнес-процессов, ролей и зон ответственности. Привычные процессы могут трансформироваться в циклы с постоянной обратной связью от ИИ-систем. Некоторые решения могут полностью автоматизироваться, другие — требовать новых форм взаимодействия человека и ИИ.

2. Алгоритмы внедрения ИИ

Внедрение ИИ в процессы принятия решений может осуществляться различными путями, в зависимости от специфики организации, ее процессов и технологической составляющей, доступных данных и компетенций.

Интеграция с существующими системами — это наиболее простой путь с добавлением ИИ-модулей в существующие системы поддержки принятия решений (например, BI-платформы, CRM, ERP). Этот путь позволяет постепенно наращивать функциональность, не меняя кардинально привычные процессы.

Разработка новых систем — это более перспективный путь, связанный с созданием специализированных ИИ-систем, спроектированных с нуля под специфические задачи организации. Такие системы позволяют реализовать все лучшие практики построения ИИ-решений, оптимизировать архитектуру данных и процессы под машинное обучение.

Гибридные подходы — это наиболее гибкий, но и наиболее сложный в управлении подход. Организация продолжает использовать традиционные системы для части задач, постепенно дополняя и замещая их ИИ-модулями, и параллельно разрабатывает прорывные ИИ-решения для принципиально новых процессов. Это позволяет находить баланс между инновациями и стабильностью, быстрыми победами и долгосрочными инвестициями.

Внедрение ИИ часто осуществляется поэтапно, циклами. Начинают с пилотных проектов на ограниченном объеме данных и процессов, позволяющих протестировать концепции и получить быструю отдачу. По результатам пилотов модели дорабатываются, инфраструктура масштабируется, процессы адаптируются.

Затем ИИ-решения распространяются на более широкий круг задач, вовлекая все больше подразделений и сотрудников. На каждом этапе растет сложность и охват моделей, но и повышается их устойчивость. Такой итеративный подход позволяет управлять рисками, учиться на опыте и постепенно трансформировать организацию.

От правильного выбора алгоритма внедрения во многом зависит успех ИИ-трансформации. Однако каким бы ни был этот выбор, ключевым фактором остается способность организации эффективно подготовить данные, адаптировать процессы и обучить сотрудников для работы в новой реальности.

3. Механизмы принятия решений при внедрении ИИ

Традиционно данные для принятия решений собираются и хранятся в разрозненных системах — ERP для финансовых данных, CRM для данных о клиентах, в системах для производства, логистики, персонала. Аналитика строится на изолированных срезах этих данных. Результат — несвоевременная и потенциально противоречивая информация.

ИИ-трансформация начинается с создания единой информационной системы, а как следствие — единого информационного пространства (ЕИП) для предприятия, объединяющего все источники данных в режиме реального времени. Это означает переход к облачным платформам данных, построение каналов интеграции между системами, создание наборов данных для ИИ-моделей. Ключевые принципы — унификация форматов данных, поддержка структурированных и неструктурированных типов, обеспечение качества и актуальности данных, управление метаданными, соблюдение требований безопасности и приватности.

В ЕИП ИИ-модели, которые непрерывно анализируют потоки данных, выявляют закономерности и генерируют рекомендации.

Организации, использующие ИИ для непрерывной оптимизации, становятся более гибкими, адаптивными и устойчивыми к изменениям. Они быстрее находят новые точки роста, эффективнее используют ресурсы, более точно соответствуют ожиданиям клиентов.

ИИ-трансформация ведет к созданию команд, объединяющих специалистов по продукту, данным и ИИ-технологиям. Эти команды отвечают за определенную бизнес-задачу, имея доступ ко всем необходимым данным и инструментам.

Формирование таких команд — задача, требующая изменений организационной структуры, процессов, ролей и компетенций. Необходимы новые должности. Требуются новые процессы совместной работы, DevOps и DataOps, гибкие методологии. Неизбежны конфликты в плане различий в целях и ценностях, но в результате вырастает организация, способная быстрее учиться, ставить амбициозные цели и достигать их с помощью ИИ.

Традиционное представление об ИИ часто сводится к замене человеческого труда машинным. В этом случае ИИ либо полностью берет на себя принятие решений, либо выступает как конкурент, доказывающий свои преимущества перед человеком. Это ставится причиной страхов и сопротивления со стороны сотрудников, видящих в ИИ угрозу своей зарплате и статусу в обществе.

Более продуктивный подход — рассматривать ИИ как дополнение и усиление человеческих способностей. В этом случае человек и ИИ — партнеры, совместно решающие задачи. ИИ берет на себя рутинные операции, анализ больших данных, генерацию альтернатив и прогнозирование, освобождая человеку время для творчества, коммуникации, стратегического мышления. В то же время человек ставит цели, задает этические рамки, обучает и настраивает ИИ, интерпретирует результаты и принимает финальную ответственность.

Для эффективной коллаборации человека и ИИ требуются новые интерфейсы и процессы совместной работы. ИИ должен не просто выдавать решения, но и объяснять свою логику, указывать на ключевые факторы, оценивать уверенность. Человек должен иметь возможность задавать уточняющие вопросы, моделировать сценарии, корректировать параметры. Процесс принятия решений превращается в диалог, итеративный цикл.

Заключение

Интеграция ИИ зависит от контекста организации. Необходим итеративный процесс с постоянным мониторингом и адаптацией. Адаптация требует настройки моделей, интеграции с ИТ-системами, разработки интерфейсов, обучения персонала, трансформации бизнес-процессов, непрерывного мониторинга. Оценка эффективности должна быть многомерной, включая количественные и качественные показатели. Управление рисками — неотъемлемая часть процесса, требующая специального плана, интегрированного в общий план внедрения.

Рекомендации для организаций:

- Четко определить цели и метрики интеграции ИИ;
- Провести анализ ИТ-инфраструктуры и данных;
- Выбрать оптимальную интеграционную стратегию;
- Разработать план управления рисками;
- Обеспечить обучение персонала;
- Регулярно отслеживать эффективность и собирать обратную связь.

Направления дальнейших исследований:

- Разработка адаптивных методов интеграции ИИ;
- Создание интеллектуальных систем оценки эффективности;
- Исследование этических и правовых аспектов ИИ;

- Анализ влияния ИИ на организационную культуру и кадры;
- Развитие методов объяснимого ИИ;
- Изучение оптимального взаимодействия человека и ИИ в принятии решений.

Интеграция ИИ в принятие решений — сложный, но необходимый процесс в эпоху цифровой трансформации. Грамотный подход, учитывающий все аспекты от технических до этических, позволит организациям извлечь максимум пользы из возможностей ИИ и адаптироваться к вызовам нового времени. Дальнейшие исследования помогут совершенствовать методы интеграции и находить ответы на новые вопросы, возникающие с развитием ИИ-технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голубков Е.П. Методы принятия управленческих решений в 2 ч.: учебник и практикум для вузов — Москва: Издательство Юрайт, 2024. — С. 25.
2. Лавров А.С. Повышение эффективности управления закупками в организации на основе инновационных технологий / Экономика и бизнес. — 2023. — № 12. — С. 1.
3. Лолаева А.С., Сакаева К.У. Искусственный интеллект: правовые и этические аспекты // Юридические исследования. — 2021. — С. 66–67.
4. Корнеев К.В., Матыцина Н.П. Искусственный интеллект, его значение и оценка эффективности применения в деятельности организации // Международный научный журнал «Символ науки». — 2023. — № 5. — С. 135–136.
5. Юрчик П.Ф., Голубкова В.Б. Проектирование и эксплуатация интегрированных автоматизированных систем управления Санкт-Петербург: Издательство Лань, 2024. — С. 40–43.
6. Литвин А.А. Новые возможности искусственного интеллекта в медицине: описательный обзор / Современные технологии в медицине. — 2024. — С. 7–14.

© Задорнов Александр Андреевич (flakon1@gmail.com); Юрчик Петр Францевич (upf.madi@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

О ГИБРИДНОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

ON A HYBRID MODEL FOR ASSESSING HIGHER EDUCATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES

**K. Karapetyan
V. Nikonov**

Summary. This paper analyzes the key psychometric and pedagogical characteristics of intelligent assessment systems: reliability, validity, and the feasibility of their use in the academic environment. A review of current research demonstrates that AI systems exhibit high internal consistency and correlation with expert assessments, particularly when assessing structured tasks. However, significant challenges remain related to contextual understanding, cultural bias, and ethical transparency. A hybrid assessment model is proposed that combines the algorithmic effectiveness of AI with the cognitive and ethical responsibility of teachers.

Keywords: artificial intelligence, assessment automation, higher education, reliability, validity, appropriateness, natural language processing, educational ethics, formative assessment.

Карпетян Карен Оганнесович

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
МИРЭА — Российский технологический университет,
г. Москва

karapetiankaren@mail.ru

Никонов Вячеслав Викторович

кандидат технических наук, доцент, Федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования МИРЭА — Российский
технологический университет, г. Москва
it-7nik@yandex.ru

Аннотация. В работе анализируются ключевые психометрические и педагогические характеристики интеллектуальных систем оценивания: надёжность, валидность и целесообразность их применения в академической среде. На основе обзора современных исследований показано, что ИИ-системы демонстрируют высокую внутреннюю согласованность и корреляцию с экспертными оценками, особенно при оценке структурированных заданий. В то же время сохраняются серьёзные вызовы, связанные с контекстным пониманием, культурной предвзятостью и этической прозрачностью. Предлагается гибридная модель оценивания, сочетающая алгоритмическую эффективность ИИ с когнитивной и этической ответственностью преподавателя.

Ключевые слова: искусственный интеллект, автоматизация оценивания, высшее образование, надёжность, валидность, целесообразность, обработка естественного языка, педагогическая этика, формативное оценивание.

В условиях стремительной цифровизации высшего образования возникает необходимость в модернизации традиционных процедур оценивания. Технологии искусственного интеллекта (ИИ) всё чаще рассматриваются как инструмент автоматизации процессов проверки учебных работ, обеспечения обратной связи и стандартизации оценочных критериев.

Современные системы высшего образования сталкиваются с растущими объёмами учебной нагрузки, увеличением численности студентов и необходимостью персонализации образовательных траекторий. Традиционные методы оценивания — вручную проводимые преподавателями — оказываются неэффективными с точки зрения времени, репрезентативности и стандартизации. В этих условиях технологии искусственного интеллекта предлагают потенциальные решения для автоматизации рутинных аспектов оценивания, таких как проверка эссе, тестов, презентаций и практических заданий.

Однако переход к автоматизации процессов требует строгой оценки их качества через призму фундаментальных психометрических категорий: надёжности, валидности и целесообразности. Надёжность указывает на стабильность результатов при повторных измерениях, валидность — на соответствие измеряемого объекта заявленной цели, а целесообразность — на практическую оправданность внедрения с учётом педагогических, этических и экономических факторов. Несмотря на технические успехи ИИ, его применение в академической оценке остаётся предметом научных дебатов, особенно в контексте академической честности, справедливости и роли преподавателя высшей школы.

Цель настоящей статьи — проанализировать научно обоснованные данные о применении ИИ в оценивании высшего образования с акцентом на указанные три критерия и предложить принципы сбалансированной интеграции технологий.

Современные системы автоматического оценивания опираются преимущественно на методы обработки естественного языка (Natural Language Processing, NLP), машинного обучения и нейронных сетей. Наиболее известные коммерческие решения — E-rater (Educational Testing Service), Gradescope, Turnitin Revision Assistant и Cognii — используют комбинации лингвистических признаков (лексическая сложность, синтаксическая вариативность) и семантического анализа (тематическая релевантность, логическая связность).

В последние годы появились мультимодальные системы, способные анализировать не только текст, но и аудио-, видео- и визуальный контент. Например, платформы на основе трансформерных архитектур (BERT, GPT, Llama) обучаются распознавать аргументативные структуры, выявлять фактические ошибки и давать рекомендации по улучшению. Однако эффективность таких систем сильно зависит от качества обучающих данных и чёткости критериев оценки.

Исследования демонстрируют, что ИИ обеспечивает высокую внутреннюю согласованность: коэффициенты альфа Кронбаха для автоматических оценок часто превышают 0.85, тогда как у групп экспертов они варьируются от 0.65 до 0.80 (Zhang et al., 2021; Kolakowski et al., 2022). Это объясняется тем, что алгоритмы лишены человеческой утомляемости, настроений и субъективных предпочтений.

Тем не менее, надёжность не гарантирует объективности. Алгоритм может стабильно воспроизводить систематические ошибки, закодированные в обучающих данных. Например, если модель обучена на работах студентов из англоязычных стран, она может неадекватно оценивать структуру аргументации в эссе студентов из Азии, Восточной Европы и России, для которых характерны иные риторические конвенции [1,2]. Таким образом, надёжность ИИ должна сопровождаться регулярным аудитом на предвзятость и адаптацией к культурно-лингвистическому контексту.

Валидность — это степень, в которой оценка измеряет именно тот объект, который заявлен как цель [6]. В контексте высшего образования такими конструктами могут быть: глубина понимания, критическое мышление, творческий подход, академическая грамотность.

Экспертные данные свидетельствуют о высокой конвергентной валидности ИИ-оценок: корреляции с экспертными оценками составляют $r = 0.78–0.92$ для структурированных заданий (эссе с чёткой рубрикой, ответы на кейсы). Однако при оценке открытых, творческих или междисциплинарных работ валидность резко снижается. ИИ часто не способен интерпретировать иронию, метафоры, нестандартные интерпретации или междисциплинарные связи.

Кроме того, существует риск «суррогатной» валидности: студенты начинают «писать под алгоритм», подстраивая стиль под формальные признаки, распознаваемые ИИ (например, частое употребление соединительных слов или длинных предложений), что искажает педагогические цели. Это подчеркивает необходимость гибкого формирования оценочных заданий, недоступных для механической подстройки.

Целесообразность применения ИИ следует оценивать не только по технической эффективности, но и по педагогическим и этическим последствиям.

Педагогически, ИИ может усилить формативную функцию оценивания: система способна мгновенно указать студенту на ошибки в логике, структуре или языке, что способствует процессу обучения. Исследования показывают, что студенты, получающие своевременную автоматизированную обратную связь, демонстрируют на 18–24 % более высокие итоговые результаты по сравнению с контрольной группой [3, 4, 5].

Экономически, автоматизация позволяет существенно сократить временные и финансовые издержки, особенно в массовых дисциплинах и онлайн-программах. В университетах с численностью студентов свыше 10000 человек внедрение ИИ-оценки может сэкономить до 30–40 % преподавательского времени, освобождая его для научно-исследовательской и другой деятельности.

Этически, однако, возникают серьёзные вопросы. К ним относятся:

- отсутствие прозрачности («чёрный ящик» нейросетей затрудняет апелляцию),
- риск дискриминации на основе языка, диалекта или культурного фона,
- снижение академической автономии студентов при излишней стандартизации требований.

Поэтому внедрение ИИ должно сопровождаться:

- обязательным информированием студентов о принципах работы системы,
- возможностью апелляции и перепроверки человеком,
- участием преподавателей в настройке и обучении моделей.

На основе проведённого анализа предлагается гибридная модель оценивания, в которой ИИ и преподаватель выполняют взаимодополняющие функции:

1. ИИ на этапе предварительной обработки: автоматическая проверка формальных требований (объём, структура, плагиат), генерация базовой обратной связи.
2. Преподаватель на этапе интерпретации: анализ глубины мышления, оригинальности, этической и культурной адекватности.

3. Обратная связь ИИ → обучение модели: каждая экспертная коррекция используется для дообучения алгоритма (human-in-the-loop learning).

Такой подход сочетает масштабируемость ИИ с профессиональным суждением преподавателя, обеспечивая баланс между эффективностью и качеством.

Для описанной гибридной модели оценивания построим математическую модель на основе теории измерений, машинного обучения с учителем и функционального разложения оценочного процесса. Формализованная модель, должна отражать взаимодействие между искусственным интеллектом (ИИ), экспертом (преподавателем) и обучающим процессом.

Пусть оцениваемая работа студента представлена как объект $x \in X$, где X — пространство возможных работ студента (эссе, проекты, презентации и т.д.).

Оценка работы — скалярная или векторная величина $y \in Y \subseteq R^k$, где k — число критериев оценивания (например, структура, аргументация, оригинальность и др.).

Пусть:

- $f_{AI}: X \rightarrow Y$ — функция оценки, реализуемая ИИ;
- $f_H: X \rightarrow Y$ — функция оценки, реализуемая преподавателем (human expert);
- $r_{AI}(x) \in R$ — формальная обратная связь от ИИ (например, список замечаний по стилю, структуре);
- $r_H(x) \in R$ — содержательная обратная связь от преподавателя.

В гибридной модели предполагается разделение оценки на два типа компонентов:

- формальные признаки $y^{(F)}$: объём, наличие разделов, грамматика, плагиат и др.;
- содержательные признаки $y^{(C)}$: глубина мышления, оригинальность, этическая/культурная адекватность.

Тогда полная оценка:

$$y = \begin{bmatrix} y^{(F)} \\ y^{(C)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{AI}^{(F)}(x) \\ f_H^{(C)}(x) \end{bmatrix},$$

где: $f_{AI}^{(F)}(x)$ — ИИ оценивает формальные аспекты;

$f_H^{(C)}(x)$ — преподаватель оценивает содержательные аспекты.

Итоговая оценка может быть представлена как взвешенная сумма (при скалярной шкале):

$$\hat{y} = \omega_F \cdot f_{AI}^{(F)}(x) + \omega_C \cdot f_H^{(C)}(x),$$

где: $\omega_F + \omega_C = 1, \omega_F, \omega_C \geq 0$ — веса, определяемые образовательной программой.

После получения автоматической оценки $f_{AI}(x)$ преподаватель вносит коррекцию $\Delta(x) = f_H(x) - f_{AI}(x)$.

Эта коррекция используется для обновления модели ИИ. Предположим, что ИИ реализован как параметрическая модель с параметрами θ , т.е. $f_{AI}(x) = f(x; \theta)$.

Тогда обновление параметров происходит по правилу:

$$\theta^{(t+1)} = \theta^{(t)} - \eta \nabla_{\theta} \mathcal{L}(f(x; \theta^{(t)}), f_H(x)),$$

где:

- $\eta > 0$ — скорость обучения;
- \mathcal{L} — функция потерь (например, MSE: $\mathcal{L}(a, b) = \|a - b\|^2$).

Этот процесс формализует цикл обратной связи:

$$x \xrightarrow{f_{AI}} y_{AI} \xrightarrow{\text{преподаватель}} y_H \xrightarrow{\text{дообучение}} \theta \leftarrow \theta'.$$

Введём метрику согласованности между ИИ и экспертом (преподавателем):

$$D^{(t)} = \mathbb{E}_{x \sim \mathcal{D}} [\|f(x; \theta^{(t)}) - f_H(x)\|],$$

где \mathcal{D} — распределение студенческих работ;

Гибридная система считается устойчивой, если последовательность $\{D^{(t)}\}$ сходится к некоторому порогу $\varepsilon \geq 0$, отражающему допустимый уровень несогласия (например, $\varepsilon = 0.1$ по шкале $[0, 1]$).

В пределе, при идеальном обучении:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} D^{(t)} = \varepsilon_{min},$$

где ε_{min} определяется неразрешимым ядром — аспектами, которые принципиально не могут быть автоматизированы (например, оценка оригинальности или этической позиции).

Обозначим гибридную оценочную систему как составной оператор:

$$\mathcal{H}: X \times \Theta \rightarrow Y, \quad \mathcal{H}(x, \theta) = \Phi(f_{AI}(x; \theta), f_H(x)),$$

где Φ — правило агрегации (например, замена содержательной части оценки экспертной, при сохранении формальной части от ИИ).

В простейшем случае:

$$\mathcal{H}(x, \theta) = \begin{bmatrix} f_{AI}^{(F)}(x; \theta) \\ f_H^{(C)}(x) \end{bmatrix},$$

Гибридная модель эффективна, если:

1. Снижается дисперсия общей оценки:

$$\text{Var}[\mathcal{H}(x, \theta)] < \text{Var}[f_H(x)];$$

2. Сохраняется конструкт-валидность:

$$\text{Corr}(\mathcal{H}(x, \theta), \text{latent_competence}(x)) \geq \rho_{\min};$$

3. Сокращается временная сложность:

$$T_{\text{total}} = T_{AI} + \alpha \cdot T_H, \quad 0 < \alpha \ll 1,$$

где α — доля работ, требующих экспертного вмешательства.

Предложенная математическая модель формализует гибридную систему оценивания как динамический процесс взаимодействия между автоматизированной и экспертной компонентами. Она обеспечивает:

- разделение ответственности по типам оценочных задач,
- обратную связь для непрерывного обучения ИИ,

- контролируемую сходимость к устойчивому уровню согласованности.

Такая модель может служить теоретической основой для проектирования ИИ-систем в высшем образовании, соответствующих требованиям надёжности, валидности и педагогической целесообразности.

Таким образом автоматизация оценивания в высшем образовании с помощью ИИ представляет собой перспективное, но неоднозначное направление. Современные системы демонстрируют высокую надёжность и достаточную валидность для ряда типов заданий, особенно рутинных и структурированных. Их внедрение целесообразно с экономической и педагогической точек зрения, при условии соблюдения этических норм и сохранения ключевой роли преподавателя в образовательном процессе.

Дальнейшее развитие должно быть направлено на создание культурно-нейтральных, прозрачных и адаптивных ИИ-систем, а также на разработку единых стандартов валидации автоматизированных оценок в академической среде. При таком подходе технологии ИИ станут его интеллектуальным партнёром в обеспечении справедливого и эффективного образования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Baker R.S., & Luckin R. AI for Education: A Review of Opportunities and Challenges. *Educational Technology Research and Development*, 68(5), 2357–2378. <https://doi.org/10.1007/s11423-020-09813-8>
2. Baker T., Chen L., & Gupta A. Cultural Bias in Automated Essay Scoring: Evidence from Multilingual Cohorts. *Language Testing*, 40(1), 88–112.
3. Davies M., & Raman R. (2023). The Human-in-the-Loop: How AI Enhances Faculty Time in Higher Education. *Journal of Educational Technology Systems*, 52(1), 45–61.
4. Kolakowski D., Wilson J., & Park S. Reliability of Automated Essay Scoring Systems: A Meta-analysis. *Assessment in Education: Principles, Policy & Practice*, 29(3), 245–267.
5. Lee J., & Kim H. (2023). Predictive Validity of AI-Based Assessment in STEM Programs. *Higher Education*, 85(2), 301–320.
6. Messick S. Validity of Psychological Assessment: Validation of Inferences from Persons' Responses and Performances as Scientific Inquiry into Score Meaning. *American Psychologist*, 50(9), 741–749.
7. Shute V.J. Focus on Formative Feedback. *Review of Educational Research*, 78(1), 153–189.
8. UNESCO. AI and Education: Guidance for Policy-Makers. Paris: UNESCO Publishing.
9. Zhang Y., Wang X., & Liu Q. Automated Essay Scoring: A Systematic Review of the Literature. *Computers & Education*, 168, 104201.
10. European Commission. Ethics Guidelines for Trustworthy AI. Retrieved from <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/ethics-guidelines-trustworthy-ai>.

© Карапетян Карен Оганнесович (karapetiankaren@mail.ru); Никонов Вячеслав Викторович (it-7nik@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ 3D-ПЕЧАТЬЮ

FUNCTIONAL MODELING OF AN INTELLIGENT 3D PRINTING CONTROL SYSTEM

**K. Karmitsky
A. Kuznetsov**

Summary. This research article examines in detail the key issues related to the development of a formalized description of the development and operation of an automated information system for managing industrial 3D printing processes. The article, using a systems approach and structural analysis, discusses the creation of functional models of information processes for an automated information system for managing industrial 3D printing processes. A systems analysis of the industrial 3D printing process chain was performed. This system analysis examined in detail the organization and management features of industrial 3D printing processes. A set of information models detailing industrial 3D printing processes was constructed in the form of structured diagrams created using the IDEF0 functional modeling methodology: a generalized functional-technological scheme and decomposition diagrams detailing functional subprocesses. The paper examines the methodological foundations of the systems approach and proposes various models of the processes involved, describes the functional architecture of the system, and evaluates the prospects for using the proposed approach. The proposed information support for industrial 3D printing management processes serves as a model for information support of management decision-making.

Keywords: functional approach, information modeling, systems approach, development processes, industrial 3D printing, control processes, automated control system, information models.

Кармицкий Кирилл Сергеевич
Аспирант, Российский государственный
социальный университет, г. Москва
kiruha76@gmail.com

Кузнецов Андрей Сергеевич
Кандидат технических наук, доцент, Российский
государственный социальный университет, г. Москва
askgoogle@internet.ru

Аннотация. В данной научной статье подробно рассмотрены основные вопросы, касающиеся разработки формализованного описания процессов разработки и функционирования автоматизированной информационной системы управления процессами промышленной трехмерной печати. В статье с позиций системного подхода и структурного анализа обсуждаются вопросы создания функциональных моделей информационных процессов автоматизированной информационной системы управления процессами промышленной 3d-печати. Выполнен системный анализ цепочки процессов промышленной 3d-печати. В процессе системных исследований подробно рассмотрены особенности организации и управления процессами промышленной 3d-печати. Построен набор информационных моделей детализации процессов промышленной трехмерной печати в виде структурированных диаграмм, выполненных по методологии функционального моделирования IDEF0: обобщенная функционально-технологическая схема и диаграммы декомпозиции, детализирующие функциональные подпроцессы. В работе рассмотрены методологические основы системного подхода и предлагаются различные модели протекающих процессов, описывается функциональная архитектура системы, и оцениваются перспективы использования предложенного подхода. Предложенное информационное обеспечение процессов управления промышленной 3d-печатью выступает в качестве модели информационной поддержки процесса принятия управленческих решений.

Ключевые слова: функциональный подход, информационное моделирование, системный подход, процессы разработки, промышленная 3d-печать, процессы управления, автоматизированная система управления, информационные модели.

Введение

Современные системы автоматизированного управления не предоставляют полноценно адаптированных решений для управления предприятиями в области аддитивного производства. В частности — 3D-печати. Из-за большого разнообразия оборудования, 3D-моделей и требований к техническому заданию финального изделия, применять одни и те же процессы становится проблематично, что требует большего количества времени участия оператора. Параметры для

печати, материал, и оборудование сильно варьируются от эксплуатационных условий изделия, что также приводит к увеличению затрат на сотрудников.

Традиционные автоматизированные системы управления имеют жесткие алгоритмы работы, адаптированные к классическому производству, и не позволяют полноценно развернуть АСУ на предприятии.

Современные системы управления 3D-печатью постоянно усложняются за счет внедрения дополнитель-

ных многофункциональных модулей, анализа, поиска отклонений, выявления ошибок подачи материала. Ключевым объектом исследования в такой системе становятся не алгоритмы, а совокупность функций, которые преобразовывают входные данные в контролируемый технологический процесс. Именно функциональная структура определяет какие данные будут проанализированы, какие решения будут приняты и в какие моменты работы необходимо внести изменения, а также какие ограничения обеспечивают стабильность и качество.

Цель: Произвести функциональное моделирование интеллектуальной информационной системы управления 3D-печатью, а также формализовать ряд процессов.

В статье рассматриваются основные функциональные требования к интеллектуальной информационной системе управления 3D-печатью, а также построены схемы ряда процессов с использованием IDEF0.

Интеллектуальная система управления 3D печатью. Функции и назначение

Интеллектуальная система управления — это комплекс программно-аппаратных решений управления предприятиями с использованием различных подходов искусственного интеллекта. В настоящее время данные системы начинают пользоваться все большей и большей популярностью ввиду того, что они способны решать большой спектр задач нежели классические автоматизированные системы управления.

В направлении 3D-печати начинают появляться системы, позволяющие контролировать все больше и больше процессов и начинают внедряться интеллектуальные вспомогательные системы: машинное зрение для анализа дефектов отклонения во время печати, модули Lidar, сканирующие поверхность платформы для оптимизации качества первого слоя, системы калибровки потока подачи филамента и другие. Однако данных вспомогательных модулей недостаточно для решения полного спектра задач, возникающих во время управления 3D-печатью.

Данные системы используются для мониторинга процесса печати крупных предприятий, где возникающие проблемы затруднительно своевременно обнаружить. Использование таких систем позволяет сократить финансовые затраты на ремонт оборудования, предотвратить дальнейшую порчу оборудования. Пример таких систем: Obico, OctoEveryWhere. Однако данные системы являются модульными и не способны контролировать необходимые процессы до этапа отправки трехмерной модели на печать.

ИИСУ предполагает следующий функционал:

- Анализ первичных данных
- Использование информационных систем
- Принятие и корректировка решений в условиях неопределенности.

Функциональная модель интеллектуальной информационной системы управления 3D печатью с использованием IDEF0

В данной главе описаны и рассмотрены основные функции системы, а также построены контекстные диаграммы ряда процессов, декомпозицией основных функций.

A-0 Интеллектуальная система управления 3D-печатью

Основным назначением системы является сокращение времени присутствия оператора и других управляющих процессами единиц на предприятии. Система анализирует входящие данные и предлагает вариант решений в соответствии с заданными критериями и требованиями к финальному объекту.

Входы:

- Техническое задание на изготовление изделия.
- 3D-модель изделия
- Информация о предыдущих работах
- Общие требования к качеству и срокам изделия.

Управление:

- Стандарты ГОСТ и технологические карты производства.
- Производственные риски предприятия.
- Контроль качества на предприятии.
- Ключевые параметры ИИ моделей.

Механизмы:

- Оборудование и средства наблюдения за 3D-печатью
- Вычислительное оборудование
- Интеллектуальные системы прогнозирования, анализа, оптимизации и диагностики
- Человеческий персонал

Выходы:

- Готовое изделие
- Отчеты о выполненном задании
- Обновление моделей

Контекстная диаграмма декомпозиции функций интеллектуальной системы управления IDEF0 A0 (рис. 1).

Разработана функциональная модель интеллектуальной системы управления 3D-печатью. На контекстной диаграмме отражены основные входы, механизмы, выходы и управляющие воздействия.



Рис. 1. IDEF0-диаграмма верхнего уровня процесса управления 3D-печатью

Детализация подпроцессов.

Диаграмма A0 «Интеллектуальная система управления 3D печатью» была разделена на несколько основных подпроцессов:

- A1 — Формализация требований и анализ 3D-модели изделия.
- A2 — Интеллектуальное планирование и оптимизация процесса 3D-печати.
- A3 — Мониторинг и адаптивное управление процессом 3D-печати.
- A4 — Анализ результатов и самообучение системы.

A2 — Интеллектуальное планирование и оптимизация процесса 3D-печати

В рамках заданной темы работы будет рассмотрена и детализирована данная подфункция.

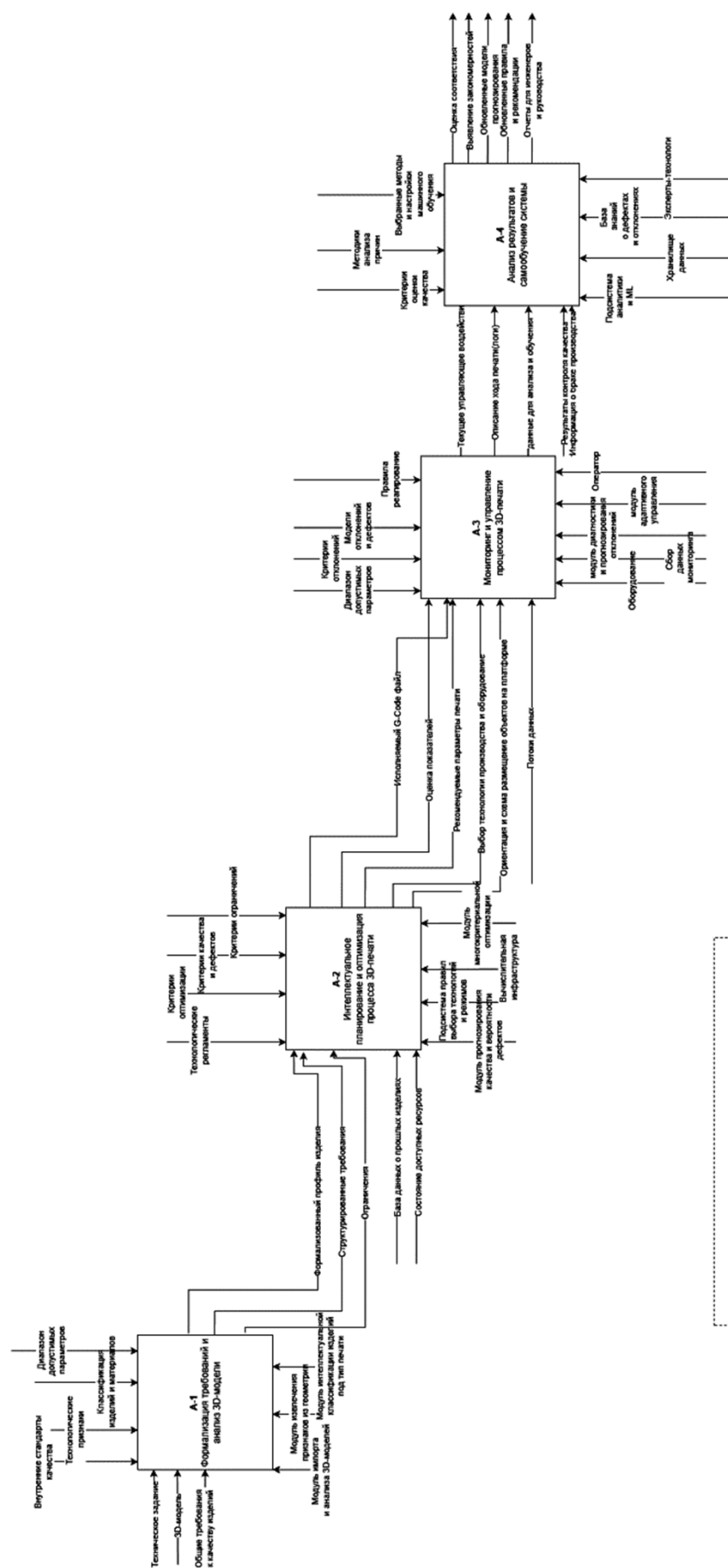
Основная задача данной подфункции оптимизировать работу оператора в выборе правильной технологии производства, оборудовании, параметров для печати.

Детализировать ее можно следующим образом:

A2.1 — Выбор технологии, оборудования и материалов

На вход в данный подпроцесс из A1 поступают формализованные требования к итоговому изделию, содержащие информацию о точности, шероховатости, механическим свойствам и размеры требуемого изделия. Также из подпроцесса A1 поступает информация о типе и классе изделия — к какой категории относится требуемое изделие и перечень допустимых материалов.

Управляющими воздействиями в данном процессе выступают справочники доступных технологий и характеристик, в которых содержится информация о поддерживаемых материалах и технологий, фактическая точность получаемых изделий, а также прочностные характеристики в соответствии с выбранной технологией. База данных оборудования, в которой хранится информация о доступных принтерах, их точность, мощность и фактические состояние. Правила выбора технологии и оборудования — В зависимости от требуемой прочности, материала и размеров изделия выбирается та или иная технология печати. И политика предприятия, где содержится перечень запрещенного оборудования, нежелательные материалы для печати.



Механизмами выступает модуль выбора технологии, база данных с описанием оборудования и технологий, и технолог, необходимый на данной стадии.

На выход отправляется информация о выбранной технологии производства, список подходящего оборудования с сортировкой по приоритетам, а также обоснование выбора той или иной технологии.

A2.2 Определение ориентации и положения объекта

Данный подпроцесс определяет оптимальную ориентацию трехмерной модели в рабочей зоне оборудования, а также оптимальное расположение поддерживающих структур.

На вход в данный подпроцесс поступает 3D модель из A1, информация от технологических признаков изделия — толщина стенок объекта, нависающие элементы, полости. А также выбранная технология и список оборудования из A 2.1.

Управляющими воздействиями выступают геометрические ограничения оборудования — размеры рабочего поля и возможности печати без поддержек при определенных условиях. Правила формирования поддержек — максимально допустимый угол нависаний и другие параметры поддержек. Критерии для ориентации модели на платформе — минимизация количества поддержек, минимизация деформаций. А также минимизация времени печати.

Механизмами выступает модули анализа геометрии, модель генерации поддержек, модуль оптимизации ориентации (алгоритмы оптимизации поддержек).

На выход поступает набор оптимальных вариантов ориентации объекта в пространстве, где для каждого варианта предоставляется модель, расположенная на платформе.

A2.3 Подбор параметров изделия

Основное задачей является подбор основных параметров печати на основании полученных данных из A 2.2, которые будут наиболее оптимальными в рамках заданной задачи.

Входами выступают различные сведения об изделии из A1, выбранная технология и оборудование и A 2.1

Управляющим воздействием выступают технологические регламенты, типовые режимы, политика безопасности, и модели зависимостей.

Механизмы в данном подпроцессе выступают модуль выбора оптимального режима, база данных техно-

логических регламентов, ML-модель, подсказывающая оптимальный режим печати, а также технолог, который может понадобиться для решения сложных ситуаций.

На выход поступает для каждого варианта ориентации определенных набор параметров для печати, такие как, толщина слоя, скорость печати, оптимальный угол нависания поддержек, а также допустимый диапазон параметров

A2.4 Оценка вариантов производства по критериям качества, времени и затрат

Основным назначением подпроцесса является вычисление прогнозируемых значений, на основе данных предыдущих процессов, такие как риск дефектов при печати, время изготовления, расход материалов, стоимость.

На вход в данный подпроцесс поступает информация из блока A 2.2, параметры для печати из A 2.3, а также информация о предыдущих задачах, для анализа данных и выявления риска брака.

В качестве управляющих воздействий здесь выступают модели качества и дефектов (физические, эмпирические и обученные ML-модели), модели расчета времени и ресурсов (расход материала и времени печати), а также критерии (недопустимые значения времени производства, нормирование показателей).

Механизмами выступают — модуль прогнозирования качества, риска и дефектов. Модуль расчета, модуль агрегации результатов, а также вычислительная платформа.

На выход выдается вероятность дефектов, интегральная оценка качества, расчетное время печати, ожидаемый расход материала, его себестоимость и стоимость производства.

A2.5 Оптимизация и формирование плана производства и управляющей программы

Основной задачей данного подпроцесса является многокритериальная оптимизация данных, полученных из предыдущих подпроцессов с целью выбора оптимального варианта из предложенных и создание управляющего G-Code файла.

Входами в данном подпроцессе выступают варианты из подпроцесса A 2.4, содержащие информацию о стоимости, времени, расходе материала, а также информация о состоянии оборудования, их загрузке.

Управляющими воздействиями выступают критерии, приоритеты и методы оптимизации, а также различные

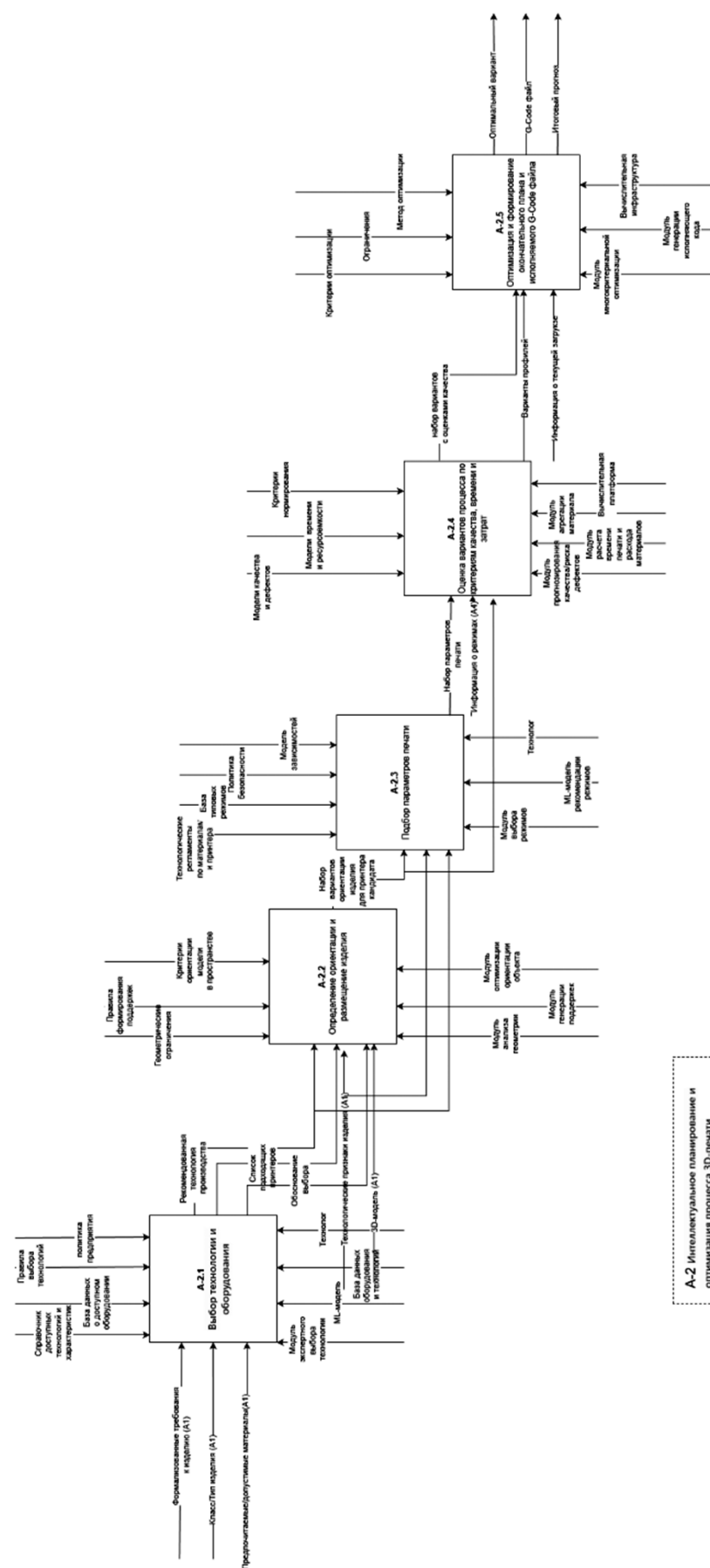


Рис. 3. Диаграмма уровня А2. Интеллектуальное планирование и оптимизация процесса 3D-печати

ограничения (время изготовления, стоимость, вероятность брака).

Механизмами выступают модуль многокритериальной оптимизации — реализация принятия решений, модуль генерации исполняемых файлов (слайсеры), а также вычислительная инфраструктура.

Выходами в данном подпроцессе это выбранный оптимальный вариант учитывая выбранную технологию, ориентацию объекта в пространстве, и наборы параметров печати. Управляющий G-Code файл, и итоговые показатели — время, расход материала, стоимость, себестоимость, прогнозируемое качество.

Заключение

В данной работе была разработана функциональная модель интеллектуальной системы управления 3D-печатью с использованием методологии IDEF0. Были определены основные функции системы, а также построена схема А0 «Интеллектуальная система управления 3D-печатью», определены основные входы и выходы системы, ее функции и механизмы.

Уровень А0 был разделен на несколько ключевых подуровней:

- А1 — Формализация требований и анализ 3D-модели изделия.
- А2 — Интеллектуальное планирование и оптимизация процесса 3D-печати.
- А3 — Мониторинг и адаптивное управление процессом 3D-печати.
- А4 — Анализ результатов и самообучение системы.

Уровень А2 Интеллектуальное планирование и оптимизация процесса 3D-печати был разделен на пять подпроцессов:

- А-2.1 Выбор технологии и оборудования
- А-2.2 Определение ориентации и размещение изделия
- А-2.3 Подбор параметров печати
- А-2.4 Оценка вариантов процесса по критериям качества, времени и затрат
- А-2.5 Оптимизация и формирование окончательного плана и исполняемого G-Code файла.

Каждый подпроцесс был описан, а также построена схема декомпозиции А 2.1–2.5.

Предложенная функциональная модель позволяет понять основные функции информационной системы. Также намечены направления для дальнейших исследований и декомпозиции оставшихся процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козловцева Н.В., Крылов Е.Г. IDEF-моделирование компонентов автоматизированных производственных систем // Перспективы развития информационных технологий. 2014. №21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/idef-modelirovanie-komponentov-avtomatizirovannyh-proizvodstvennyh-sistem>
2. Лисяк Владимир Васильевич Обзор слайсеров для 3d-печати // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. №3 (227). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-slayserov-dlya-3d-pechati>
3. Козловцева Н.В., Крылов Е.Г. IDEF-моделирование компонентов автоматизированных производственных систем // Перспективы развития информационных технологий. 2014. №21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/idef-modelirovanie-komponentov-avtomatizirovannyh-proizvodstvennyh-sistem>
4. Переяшкин Алексей Владиславович Проектирование информационной системы управления // Вестник науки и творчества. 2017. №3 (15). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovanie-informatsionnoy-sistemy-upravleniya>
5. Смирнов Н.Н., Кузнецов А.С. Формализация процессов обработки данных устройств интернета вещей в информационных системах мониторинга на основе структурного системного анализа // МНИЖ. 2024. №7 (145). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formalizatsiya-protseessov-obrabotki-dannyh-ustroystv-interneta-veschey-v-informatsionnyh-sistemah-monitoringa-na-osnove>
6. Стенько Дмитрий Владимирович, Хапов Артем Анатольевич, Капанова Анна Борисовна, Бадаева Наталья Валентиновна, Новиков Евгений Рюрикович Исследование анизотропных свойств полимерных изделий при реализации FDM-технологии // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. №12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-anizotropnyh-svoystv-polimernykh-izdeliy-pri-realizatsii-fdm-tehnologii>
7. Савостин Дмитрий Александрович, Кириченко Евгений Олегович, Шаранов Александр Олегович Будущие перспективы автоматизированного проектирования (сапр) с точки зрения искусственного интеллекта и 3D-печати // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/buduschie-perspektivy-avtomatizirovannogo-proektirovaniya-sapr-s-tochki-zreniya-iskusstvennogo-intellekta-i-3d-pechati>
8. Чабаненко Александр Валерьевич Обеспечение качества аддитивного производства посредством моделирования процессов печати // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obespechenie-kachestva-additivnogo-proizvodstva-posredstvom-modelirovaniya-protseessov-pechati>
9. Карелина Мария Юрьевна, Филатов Владимир Викторович, Нефёлов Илья Сергеевич, Талдыкин Дмитрий Сергеевич Исследование отклонений действительной геометрии деталей, изготовленных по технологии 3D-печати, от номинальной геометрии их цифровых двойников // T-Comm. 2025. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-otkloneniye-deystvitelnoy-geometrii-detaley-izgotovlennykh-po-tehnologii-3d-pechati-ot-nominalnoy-geometrii-ih-tsifrovyyh-dvoynikov>
10. Андрюшкин А.Ю., Буцикин Е.Б., Ли Чжэньнин Влияние скорости 3d-печати аддитивной установки по FDM-технологии на точность изделия // Аэрокосмическая техника и технологии. 2023. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-skorosti-3d-pechati-additivnoy-ustanovki-po-fdm-tehnologii-na-tochnost-izdeliya>
11. Касимов Руслан Михайлович Определение параметров FDM-принтера с учётом геометрических размеров моделей // Наука без границ. 2021. №5 (57). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-parametrov-fdm-printera-s-uchyotom-geometricheskikh-razмеров-modeley> (дата обращения: 12.12.2025).

© Кармицкий Кирилл Сергеевич (kiruha76@gmail.com); Кузнецов Андрей Сергеевич (askgoogle@internet.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МЕТОДОЛОГИЯ ТРАНСФОРМАЦИИ LEGACY-МОНОЛИТА В МИКРОСЕРВИСНУЮ АРХИТЕКТУРУ: DDD-ДЕКОМПОЗИЦИЯ, ОШИБКИ И МЕТРИКИ УСПЕХА НА СТЕКЕ JAVA SPRING

Кононов Алексей Николаевич

Ведущий инженер разработки, Центр экспертизы
web-разработки дистанционных каналов Банка ГПБ (АО)
aleksey.n.kononov@gazprombank.ru

METHODOLOGY FOR THE TRANSFORMATION OF LEGACY MONOLITH INTO MICROSERVICE ARCHITECTURE: DDD DECOMPOSITION, ERRORS, AND SUCCESS METRICS ON THE JAVA SPRING STACK

A. Kononov

Summary. The article addresses the problem of using outdated monolithic information systems which, due to high technical debt and tight module coupling, significantly slow down the release of new functionality and hinder the digital transformation of organizations. Moreover, the relevance of the study is driven by the need to introduce a holistic methodology for migrating from legacy monoliths to a microservice architecture based on the Java Spring stack, which helps reduce time-to-product and increase the flexibility of software system development.

Materials and Methods. The research materials included scientific publications, analytical reports, and statistical data from 2020–2025, while the methodological basis comprised a comparative analysis of architectural approaches, the study of decomposition-related errors, and the synthesis of recommendations from leading technology companies.

Results. The author examined the key architectural, infrastructural, and organizational challenges of transitioning from a monolith to microservices, including faulty decomposition and insufficient dependency management. Industry research indicates that these issues are systemic, manifesting as a «distributed monolith», high service coupling, operational complexity, and reduced efficiency of change delivery. The study proposes a comprehensive migration approach incorporating DDD and enhanced observability, enabling a controlled and effective transformation of a legacy monolith.

Conclusion. The application of DDD, DevOps metrics, and staged migration improves the practical effectiveness of transitioning to microservices by reducing risks, accelerating feature delivery, and ensuring sustainable system evolution. This approach makes monolith transformation not only technically justified but also beneficial for business by increasing infrastructure flexibility and manageability.

Keywords: microservice architecture, DDD decomposition, legacy monolith, DevOps metrics (DORA), Java Spring Boot, errors, success metrics, transformation methodology.

Аннотация. Статья посвящена проблеме использования устаревших монолитных систем, которые из-за высокого технического долга и жёсткой связанности модулей значительно замедляют выпуск новых функций и тормозят цифровую трансформацию организаций. Кроме того, актуальность исследования связана с необходимостью внедрения целостной методологии перехода от наследуемых монолитов к микросервисной архитектуре на стеке Java Spring, что позволяет сократить time-to-product и повысить гибкость развития программных систем.

Материалы и методы. Материалами исследования послужили научные публикации, аналитические отчёты и статистические данные за 2020–2025 годы, а методологическая база включала сравнительный анализ архитектурных подходов, изучение ошибок декомпозиции и синтез рекомендаций ведущих технологических компаний.

Результаты. Автором рассмотрены основные архитектурные, инфраструктурные и организационные проблемы перехода от монолита к микросервисам, включая ошибочную декомпозицию и недостаточное управление зависимостями. Анализ отраслевых исследований показал, что эти трудности носят системный характер и проявляются в виде «распределённого монолита», высокой связанности сервисов, усложнённой эксплуатации и падения эффективности поставки изменений. В работе предложен комплексный подход к миграции, включающий применение DDD и развитие observability, что обеспечивает управляемую и эффективную трансформацию legacy-монолита.

Заключение. Применение DDD, DevOps-метрик и поэтапной миграции повышает практическую эффективность перехода к микросервисам, снижая риски, ускоряя выпуск функциональности и обеспечивая устойчивое развитие системы. Такой подход делает трансформацию монолита не только технически оправданной, но и выгодной для бизнеса, улучшая гибкость и управляемость инфраструктуры.

Ключевые слова: микросервисная архитектура, DDD-декомпозиция, legacy-монолит, DevOps-метрики (DORA), Java Spring Boot, ошибки, метрики успеха, методология трансформации.

Введение

Во многих организациях продолжают функционировать крупные монолитные информационные системы, созданные десятилетия назад и обеспечивающие выполнение ключевых бизнес-процессов, несмотря на их технологическую и архитектурную устаревание. Такие системы, как показывают исследования, характеризуются высоким техническим долгом, низкой структурированностью программного кода, фрагментарной документацией и высокой степенью связанности модулей, что делает даже незначительные изменения трудоёмкими и рискованными [1]. Согласно научным данным [2], монолит как единое исполняемое приложение с общей базой данных требует масштабного регрессионного тестирования при каждом обновлении, а применение устаревшего стека технологий в сочетании с отсутствием современных DevOps-практик дополнительно замедляет процессы разработки и развёртывания. В результате релизы становятся редкими и ресурсозатратными, а интеграция с внешними сервисами или цифровыми платформами требует глубокой переработки ядра системы [3]. Совокупность этих факторов приводит к увеличению time-to-product и снижению гибкости бизнеса, что делает переход от legacy-монолита к микросервисной архитектуре на современном стеке Java Spring объективно необходимым.

Анализ работ различных авторов подтверждает, что успешная трансформация устаревших монолитных систем в микросервисную архитектуру возможна лишь при соблюдении системного и методологически обоснованного подхода. Зарипова В.М. и Петрова И.Ю. подчёркивают, что значительный технический долг и архитектурная изношенность подобных систем требуют предварительного устранения глубинных структурных проблем, иначе модернизация становится крайне затруднительной [1]. В свою очередь, Шумилов М.И. указывает, что микросервисная архитектура действительно обеспечивает повышение производительности и масштабируемости высоконагруженных приложений, однако подобный эффект достигается исключительно при корректной декомпозиции и тщательном проектировании сервисов [3]. Развивая данную позицию, Радостев Д.К. и Никитина Е.Ю. подчёркивают необходимость поэтапной миграции, поскольку резкий Big-Bang-переход значительно увеличивает риски и способствует возникновению отказов [4]. Кроме того, Ольхов Д.А. обращает внимание на важность стандартизированного управления API, отсутствие которого приводит к нарушению согласованности распределённой системы и усложняет её сопровождение [5]. Завершая обобщение исследовательских подходов, Черников А.О. и Заводчикова М.Г. указывают, что результативность миграции должна оцениваться на основе формализованных метрик, позволяющих объективно определить степень достижения архитектурных и бизнес-целей.

Несмотря на указанные рекомендации, современные организации по-прежнему широко используют унаследованные монолитные системы, которые со временем накапливают архитектурную сложность, технический долг и растущие затраты на сопровождение. Ужесточение требований к скорости обновления функциональности, интеграции и масштабируемости приводит к тому, что подобные архитектуры становятся всё менее соответствующими текущим потребностям бизнеса, ограничивая развитие и замедляя вывод новых функций [6-9]. В этих условиях микросервисный подход, основанный на принципах Domain-Driven Design (DDD) и реализуемый на стеке Java Spring, выступает эффективным инструментом поэтапной модернизации, позволяя уменьшить размер монолита, повысить гибкость разработки и улучшить эксплуатационные характеристики системы. Следовательно, исследование методологии перехода от legacy-монолита к микросервисной архитектуре, анализ типичных ошибок декомпозиции и определение метрик успешности приобретают особую *актуальность* в контексте цифровой трансформации и возрастающих требований к эффективности программных систем.

Таким образом, целью исследования является обоснование методологии поэтапной трансформации legacy-монолита в микросервисную архитектуру с опорой на принципы DDD, анализ типовых ошибок декомпозиции и определение системы метрик успешности при использовании стека Java Spring.

Материалы и методы

Материалами исследования послужили научные публикации российских и зарубежных авторов, отраслевые аналитические отчёты и статистические данные за 2020–2025 годы, посвящённые микросервисной архитектуре, декомпозиции систем и практике миграции от монолитов. Методологическая база включала сравнительный анализ архитектурных подходов, изучение эмпирических данных о распространённых ошибках декомпозиции и синтез рекомендаций, представленных в документации ведущих технологических компаний, таких как Microsoft и Red Hat. Кроме того, в работе использовались количественные данные международных исследований (O'Reilly Media, OpsLevel, Camunda/DZone), позволившие выявить ключевые проблемные зоны при переходе к микросервисной архитектуре и обосновать необходимость системного применения DDD, CI/CD, архитектурной изоляции и метрик DORA.

Результаты и обсуждение

Переход от монолитной информационной системы к микросервисной архитектуре нередко осложняется ошибками декомпозиции, главным из которых является некорректное определение границ сервисов. На прак-

тике функциональность часто разделяется по техническим слоям, а не по предметным областям, что приводит не к модульности, а к формированию «распределённого монолита» — системы с высокой связанностью компонентов, множеством зависимостей и отсутствием возможности автономного развёртывания отдельных сервисов [4]. При таком подходе микросервисы теряют свои ключевые преимущества: независимую эволюцию, гибкое масштабирование и сокращение времени вывода изменений. В связи с этим как отечественные исследования, так и официальные методические рекомендации Microsoft подчёркивают необходимость строгого следования принципам Domain-Driven Design, обеспечивающим корректное выделение bounded context и построение архитектуры, ориентированной на реальные бизнес-домены, а не на техническое устройство исходного монолита [10].

Вместе с тем, несмотря на наличие таких рекомендаций, неверное определение границ микросервисов остаётся одной из наиболее распространённых проблем миграции, поскольку функциональность нередко дробится по техническим признакам, а не по доменным смысловым областям. Это приводит к образованию «распределённого монолита» — архитектуры с высокой связанностью, большим числом синхронных коммуникаций и отсутствием автономности сервисов. Масштаб данной проблемы подтверждается отраслевой статистикой: в исследовании O'Reilly Microservices Adoption (1502 респондента) сложности декомпозиции входят в число ведущих препятствий внедрения микросервисов, уступая лишь культурным барьерам; более половины опрошенных отмечают трудности выделения доменов и нарастающую архитектурную сложность [9]. Аналогично, рекомендации Microsoft и Red Hat подчёркивают, что корректное определение bounded context должно предшествовать созданию сервисов, поскольку нарушение данного принципа неизбежно приводит к усложнению интеграций, снижению автономности и росту хрупкости архитектуры [10].

В то же время, даже при следовании данным рекомендациям, проблемы миграции усугубляются ошибками проектирования: чрезмерная фрагментация увеличивает сетевые накладные расходы, тогда как крупные, недостаточно разделённые сервисы сохраняют ограничения монолита и препятствуют изоляции изменений. Дополнительные трудности возникают при отказе от промежуточных архитектурных этапов, таких как модульный монолит, что делает переход резким и трудно контролируемым (табл. 1). На инфраструктурном уровне значительными барьерами выступают сохранение общей базы данных, несогласованность API и недостаточная автоматизация CI/CD, что способствует формированию «распределённого монолита» и повышает риск нестабильных релизов.

Таблица 1.

Сравнение монолита, модульного монолита и микросервисной архитектуры

Характеристика	Монолитная архитектура	Модульный монолит	Микросервисная архитектура
Связанность компонентов	Высокая, жёсткие внутренние зависимости	Средняя, зависимости ограничены границами модулей	Низкая, слабосвязанные сервисы
Границы ответственности	Отсутствуют или размыты	Чётко выделенные модули внутри единого приложения	Строгие bounded context, автономные домены
Автономность развёртывания	Нет — развёртывается весь монолит	Частичная: единый артефакт, но независимые модули	Полная: каждый сервис развёртывается независимо
Хрупкость изменений	Высокая: любое изменение затрагивает весь код	Средняя: ошибки локализуются на уровне модулей	Низкая: проблема ограничена отдельным сервисом
Изоляция данных	Общая база данных	Частичная изоляция схем	Полная изоляция: database-per-service
Сложность интеграции	Низкая, всё в одном процессе	Средняя	Высокая: требуется API gateway, сервисная сеть
Сетевые накладные расходы	Минимальные	Низкие	Высокие из-за межсервисных коммуникаций

Источник: Составлено автором

Кроме того, указанные инфраструктурные ограничения усугубляются недостаточной наблюдаемостью и слабо проработанными механизмами безопасности, что дополнительно снижает прозрачность и устойчивость системы. Даже при наличии технических решений трансформация остаётся неэффективной, если организационная структура компании по-прежнему ориентирована на функциональные, а не доменные команды. Следовательно, успешная миграция возможна лишь при сочетании архитектурной дисциплины, развития инфраструктурных практик и адаптации процессов разработки к требованиям распределённой среды [4, 5].

В связи с этим объективная оценка успешности миграции может быть обеспечена с использованием метрик DORA, которые отражают скорость и надёжность процессов поставки изменений. Увеличение частоты развёртываний, сокращение Lead Time, снижение доли неудачных релизов и уменьшение MTTR демонстрируют,

что сервисная изоляция, автоматизация CI/CD и применяемые архитектурные решения дают практический эффект, повышая предсказуемость изменений и уменьшая time-to-product [6]. Значимую роль в оценке глубины проведённой декомпозиции играют архитектурно-технические метрики: доля функциональности, перенесённой в автономные сервисы, сокращение остаточного монолита, корректность выделения bounded context, снижение числа межсервисных вызовов, отсутствие циклических зависимостей и наличие изолированных хранилищ данных. Эти показатели отражают зрелость архитектуры и напрямую влияют на производительность, масштабируемость и отказоустойчивость системы [7].

Дополняя архитектурный анализ, бизнес-метрики позволяют оценить стратегическую ценность миграции. Сокращение сроков вывода новых функций, повышение скорости реакции на изменение требований, снижение затрат на сопровождение и рост удовлетворённости пользователей подтверждают, что микросервисная архитектура обеспечивает не только технический, но и значимый бизнес-эффект [8]. Однако, несмотря на указанные преимущества, ошибки декомпозиции, архитектурные ограничения и организационно-инфраструктурные проблемы имеют системный характер и существенно влияют на успешность миграции от монолита к микросервисной архитектуре. Для структурирования выявленных трудностей и обобщения наиболее распространённых причин сбоев в проектах трансформации ниже приводится систематизированный перечень типичных ошибок, характеризующих основные архитектурные, технические и организационные риски перехода (табл. 2).

Согласно данным отраслевых исследований, проблемы некорректной декомпозиции и неуправляемого роста связей между компонентами имеют системный характер и широко распространены в практике внедрения микросервисной архитектуры. Так, результаты исследования OpsLevel показывают, что 62 % организаций рассматривают управление зависимостями как значительную проблему, что свидетельствует о сложности поддержки взаимодействующих сервисов в распределённой среде [11]. Аналогичные тенденции выявлены в опросе O'Reilly Media: 37 % респондентов отмечают декомпозицию как одну из ключевых задач, а 56 % указывают на трудности координации множества сервисов и общую архитектурную усложнённость [9]. Исследование Camunda / DZone дополняет эту картину, фиксируя, что 59 % компаний испытывают недостаточную видимость сквозных (end-to-end) бизнес-процессов, проходящих через цепочку микросервисов [12]. Эти данные подтверждают, что ошибки выделения сервисов и управления их зависимостями являются не единичными, а устойчивыми и статистически подтверждёнными проблемами современной микросервисной экосистемы. Визуализация основных результатов указанных ис-

Таблица 2.
Типовые ошибки при трансформации legacy-монолита в микросервисную архитектуру

Ошибка	Описание	Как проявляется в проекте и эксплуатации
1. Неверная DDD-декомпозиция	Некорректное выделение предметных областей и контекстов	Сервисные границы не совпадают с бизнес-функциями; растёт число междоменных изменений
2. Декомпозиция по техническим слоям	Деление функциональности по архитектурным слоям, а не по доменным границам	Образуется сервисная сетка, полностью повторяющая монолит; бизнес-процессы «разорваны»
3. Ошибочная гранулярность сервисов	Слишком крупные или чрезмерно мелкие сервисы	Неэффективная маршрутизация запросов; усложнение трассировки; высокий overhead сервисной сети
4. Общая БД вместо доменной изоляции	Реальное отсутствие data ownership	Миграция заивает из-за блокировки схемы; изменения данных становятся дорогостоящими
5. Несформированная интеграционная стратегия	API появляются стихийно, отсутствует единая политика интеграции	Усложняется версионирование; растёт количество точек отказа между сервисами
6. Недостаточная автоматизация DevOps	Частичное внедрение CI/CD, ручные процедуры	Возрастает время поставки; релизы нестабильны; труднее применять Canary и Blue-Green
7. Игнорирование observability	Отсутствуют сквозная трассировка, метрики, логирование	Ошибки в распределённой системе диагностируются медленно; MTTR высокое
8. Технический долг монолита	Старый код, слабая модульность, отсутствие документации	Миграция идёт медленно; трансформация обходится дороже, чем планировалось
9. Big-Bang-миграция	Переход без модульного монолита, адаптеров, фасадов	Срывы сроков, частые откаты, непредсказуемое состояние архитектуры
10. Несответствие оргструктуры микросервисам	Команды остаются функциональными вместо доменных	Зависимости между командами не уменьшаются; поток изменений замедлен

Источник: Составлено автором

следований представлена на рисунках 1 и 2, демонстрирующих распространённость ключевых проблем и их влияние на архитектурную сложность распределённых систем (рис. 1 и 2).

Распределение сложностей внедрения микросервисов



Рис. 1. Распределение сложностей внедрения микросервисов

Источник: Составлено автором на основании [9–12]



Рис. 2. Ключевые проблемы микросервисов

Источник: Составлено автором на основании [9–12]

Переходя от анализа проблем к рассмотрению целевой архитектуры, следует отметить, что при миграции от монолита к микросервисной модели на стеке Java Spring Boot структура системы формируется вокруг нескольких типов специализированных сервисов. Центральное место занимают доменные микросервисы, соответствующие отдельным bounded context и обеспечивающие автономное развитие бизнес-функций. Инфраструктурный слой включает сервис внешней конфигурации (Spring Cloud Config Server), сервис обнаружения (Eureka/Discovery Client) и API-шлюз (Spring Cloud Gateway), выполняющий функции маршрутизации, контроля доступа и консолидации интеграций. Дополнительными компонентами выступают сервисы аутентификации и авторизации на основе Spring Security, а также средства наблюдаемости, реализуемые с применением

Spring Boot Actuator и механизмов распределённого трейсинга. В совокупности эти сервисы формируют рекомендуемую в официальной документации Spring целевую архитектуру, обеспечивающую изоляцию компонентов, управляемость и масштабируемость системы [13, 14].

Для устранения выявленных проблем необходима комплексная архитектурная и организационная трансформация системы. Ключевую роль играет полноценный DDD-анализ с корректным выделением bounded context, позволяющий перейти от технически ориентированного разбиения к доменной декомпозиции и сформировать устойчивые, слабо связанные сервисы. Оптимальная степень гранулярности достигается через анализ бизнес-процессов, нагрузочных профилей и при-

менение методик, таких как event-storming, что позволяет избежать как чрезмерного раздробления, так и сохранения укрупнённых доменов. Существенное значение имеют промежуточные архитектурные решения — модульный монолит, фасады, адаптеры и ACL-слой, обеспечивающие поэтапный характер миграции и снижение технологических рисков.

Кроме того, для обеспечения архитектурной целостности и устойчивости распределённой системы требуется изоляция данных по принципу database-per-service и стандартизированное управление интеграциями посредством API-gateway, политики версионирования API и контрактного тестирования. Повышение надёжности и скорости поставки обеспечивает внедрение CI/CD, контейнеризации, автоматизированных проверок безопасности и систем оркестрации. Завершает архитектурную модель развитая платформа наблюдаемости, включающая централизованное логирование, метрики, трейсинг и алертинг, а также планомерное сокращение технического долга. Переход к кросс-функциональным доменным командам обеспечивает согласованность организационной структуры с архитектурными принципами и устраняет разрывы ответственности.

Таким образом, проведённый анализ демонстрирует, что успешная трансформация legacy-монолита возможна только при применении целостного, согласованно-

го подхода, включающего глубокий доменный анализ, корректную архитектурную декомпозицию, развитие инфраструктурных практик и адаптацию организационной структуры. Лишь при соблюдении этих условий микросервисная архитектура реализует свои ключевые преимущества — предсказуемость изменений, управляемость, масштабируемость и снижение зависимости от устаревших технологических решений, что подтверждает целесообразность её внедрения.

Заключение

Успешная трансформация legacy-монолита в микросервисную архитектуру требует не разовой модернизации, а комплексного подхода, включающего корректную DDD-декомпозицию, зрелые DevOps-практики и архитектурную изоляцию сервисов. Анализ научных и отраслевых источников показывает, что основные барьеры связаны с ошибками декомпозиции, слабым управлением зависимостями и недостаточной автоматизацией, а метрики DORA и архитектурные показатели обеспечивают объективную оценку успешности перехода. Поэтапная миграция, использование промежуточных архитектур и развитие наблюдаемости позволяют безопасно выносить функциональность, снижать технический долг и ускорять вывод изменений, делая микросервисную архитектуру на Java Spring эффективным инструментом повышения гибкости и устойчивости систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заринова В.М., Петрова И.Ю. Унаследованные информационные системы: проблемы и решения / В.М. Заринова, И.Ю. Петрова // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. — 2022. — № 2(40). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/unasledovannye-informatsionnye-sistemy-problemy-i-resheniya> (дата обращения: 21.11.2025).
2. Михайлов А.А. Дипломная работа / А.А. Михайлов. — URL: https://elbib.bsu.by/bitstream/123456789/272273/1/Дипломная_работа_МихайловАА_ПИ.pdf (дата обращения: 21.11.2025).
3. Шумилов М.И. Оптимизация высоконагруженных веб-проектов с использованием микросервисной архитектуры / М.И. Шумилов // Universum. Технические науки. — 2024. — № 11(128). — URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/18560> (дата обращения: 21.11.2025).
4. Радостев Д.К., Никитина Е.Ю. Стратегия миграции программного кода из монолитной архитектуры в микросервисы / Д.К. Радостев, Е.Ю. Никитина // Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. — 2021. — № 2(53). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/strategiya-migratsii-programmnogo-koda-iz-monolitnoy-arhitektury-v-mikroservisy> (дата обращения: 21.11.2025).
5. Ольхов Д.А. Анализ подходов к управлению прикладным программным интерфейсом микросервисов в облачной среде / Д.А. Ольхов // Символ науки. — 2021. — № 3. — С. 26–32. — EDN ZWDSTR.
6. DORA Metrics. Four Keys Guide / DORA Metrics. — URL: <https://dora.dev/guides/dora-metrics-four-keys> (дата обращения: 21.11.2025).
7. Черников А.О., Заводчикова М.Г. Разработка метода оценки эффективности перехода от монолитной к сервис-ориентированной архитектуре для некоммерческих организаций / А.О. Черников, М.Г. Заводчикова // Экономика и бизнес: теория и практика. — 2025. — № 9(127). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-metoda-otsenki-effektivnosti-perexoda-ot-monolitnoy-k-servis-orientirovannoy-arhitektury-dlya-nekommercheskih> (дата обращения: 21.11.2025).
8. Кабарухин А.П. Выгоды перехода от монолитной к микросервисной архитектуре приложения / А.П. Кабарухин // Проблемы современной науки и образования. — 2022. — № 1(170). — С. 18–23. — EDN FQHKDC.
9. O'Reilly Media. Microservices Adoption in 2020 / O'Reilly Media. — URL: <https://www.oreilly.com/radar/microservices-adoption-in-2020> (дата обращения: 21.11.2025).
10. Microsoft. Azure Architecture Center: Domain Analysis / Microsoft. — URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/architecture/microservices/model/domain-analysis> (дата обращения: 21.11.2025).
11. OpsLevel. Challenges of Implementing Microservice Architecture / OpsLevel. — URL: <https://www.opslevel.com/resources/challenges-of-implementing-microservice-architecture> (дата обращения: 21.11.2025).
12. Camunda. DZone Microservices Research / Camunda. — URL: <https://dzone.com/articles/new-research-shows-63-percent-of-enterprises-are-a> (дата обращения: 21.11.2025).
13. Spring. Microservices [Электронный ресурс] / Spring. — URL: <https://spring.io/microservices> (дата обращения: 21.11.2025).
14. Spring Cloud Config. Reference Documentation [Электронный ресурс] / Spring. — URL: <https://docs.spring.io/spring-cloud-config/docs/current/reference/html/> (дата обращения: 21.11.2025).

ВЛИЯНИЕ ЗАДВОЕННОСТИ ЗАПИСЕЙ НА КАЧЕСТВО ИНФОРМАЦИИ В ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

THE IMPACT OF DUPLICATE RECORDS ON INFORMATION QUALITY IN PROFESSIONAL SYSTEMS

O. Lobanov

Summary. The article investigates the problem of unintentional data duplication, known in professional circles as duplicate records. Unlike managed duplication, which is used to ensure fault tolerance, duplicate records are a destructive artifact that arises during the stages of data collection, integration, and processing. The primary focus is on the consequences of duplication for information quality management in professional fields. Duplicate records can lead to decreased information quality, increased storage and processing costs, and errors in analytics and decision support. With the growing operational volume of data processing in complex systems, existing solutions fail to fully address the occurrence of such problems and have not offered a universal solution that would guaranteed eliminate this phenomenon or reduce the associated risks to a negligible level. Practical case studies demonstrate how this anomaly leads to significant operational costs, systemic errors in analytical processes, and the risk of incorrect management decisions. It is emphasized that existing approaches are reactive and do not ensure complete problem resolution. The necessity of developing proactive approaches to prevent this anomaly at the systemic level is substantiated.

Keywords: database, duplicate records, data duplication, information quality, information reliability, data quality.

Лобанов Олег Андреевич

Аспирант, преподаватель,
Московский государственный технологический
университет СТАНКИН, г. Москва
lobanov98oleg@mail.ru

Аннотация. В статье исследуется проблема непреднамеренного дублирования данных, известная в профессиональной среде как задвоенность записей. В отличие от управляемого дублирования, используемого для обеспечения отказоустойчивости, задвоенность является деструктивным артефактом, возникающим на этапах сбора, интеграции и обработки информации. Основное внимание уделено последствиям задвоенности для управления качеством информации в сферах профессиональной деятельности. Задвоенные записи могут приводить к снижению качества информации, увеличению затрат на хранение и обработку данных, а также к ошибкам в аналитике и поддержке принятия решений. С увеличением операционного объема обработки данных в сложных системах, существующие решения не позволяют полностью справиться с возникновением таких проблем и не предложили универсального решения, которое бы гарантированно устраняло данный феномен или снижало сопутствующие риски до уровня «можно пренебречь». На практических кейсах продемонстрировано, как данная аномалия приводит к существенным операционным затратам, системным ошибкам в аналитических процессах и рискам принятия неверных управленческих решений. Подчеркивается, что существующие подходы носят реактивный характер и не обеспечивают полного устранения проблемы. Обоснована необходимость разработки проактивных подходов к предотвращению аномалии на системном уровне.

Ключевые слова: база данных, задвоенность записей, дублирование данных, качество информации, достоверность информации, качество данных.

Введение

В современной научной и профессиональной литературе отсутствует единство терминов для описания феномена непреднамеренного повторения данных. В рамках данной статьи предлагается следующая терминологическая дифференциация, основанная на критериях функциональности:

- Дублирование данных — управляемая избыточность, целенаправленно создаваемая для повышения отказоустойчивости и производительности (например, репликация, резервное копирование).
- Задвоенность данных — непреднамеренный артефакт, возникающий вследствие ошибок интеграции, сбоев процессов или человеческого фактора, приводящий к снижению качества информации.

- Дубликат — факт наличия повторяющейся записи, нейтральный термин.

Данное исследование фокусируется на проблеме задвоенности как деструктивном явлении, нарушающем целостность данных.

С увеличением объема и сложности баз данных вероятность возникновения задвоенной записи только возрастает. Несмотря на многочисленные попытки устранить эту проблему поиском уже образованных дублей, эта проблема продолжает существовать и наносить ущерб бизнес-процессам. В материалах исследования приводятся ссылки на статьи со сферами деятельности с упоминанием задвоенной записи, некорректности работы с этими записями и появлением ошибок. Задвоенность может возникать на этапах сбора, интеграции

и хранения информации. Данная аномалия негативно сказывается на качестве данных, что влияет на формирование достоверных аналитических отчетов и на эффективность бизнес-процессов.

Задвоенная запись в различных сферах деятельности

Задвоенная запись (задвоенность) проявляется при учете материально-производственных запасов на предприятии, например, стивидорного бизнеса. Стивидорный бизнес — деятельность компаний, которые занимаются погрузкой и разгрузкой товаров в портах, а также размещением грузов на судне. Функциональные простои в компании ведут к крупным финансовым потерям. Доктор экономических наук, профессор А.Ю. Алексеев приводит в своей статье, что риск задвоенности на участке внутрифирменного перемещения запасов остатков уменьшается за счет учета запасов, а также оборотов по ним [1].

Как отмечает А.Н. Михайлов, одной из причин хаоса в персональных данных является проблема с задвоенностью. Он предложил проводить контроль дублирования допустимых столбцов и значений, а также предлагает внедрить общие стандарты и прозрачность процессов, чтобы каждый участник знал, где найти нужную информацию [2].

Также про системы управления взаимоотношениями с клиентами пишет в своей статье доктор технических наук, профессор В.А. Докучаев. Он, рассматривая проблемы актуализации данных в CRM-системах, заявляет, что для уменьшения ошибок из-за задвоенности требуется регулярно проводить проверки и очистки данных [3].

В государственном лесном реестре и едином государственном реестре недвижимости порождается ряд ошибок из-за задвоенных записей в базе данных. В первую очередь это приводит к неактуальности такой информации о лесном фонде страны. В едином государственном реестре недвижимости и государственном лесном реестре существует разобщенность сведений, в результате возникает опасность отчуждения земель лесного фонда в земли иных категорий. Разница этих сведений составляет 300 миллионов гектаров, некоторые эти несовпадения вызваны, в том числе из-за дублирования данных [4].

Проблемы с задвоением информации в базах данных встречаются во всех крупных организациях, в том числе и в государственных системах. Одним из таких примеров можно привести: возникновение дублей в Едином государственном реестре прав на недвижимость (ЕГРН). Они проявились на этапе объединения двух сложных государственных систем ЕГРН и Государственного кадастра недвижимости, в том числе из-за ошибок в документах-основаниях, из которых были получены данные [5].

В статье А.А. Алимова «Преимущества и недостатки программного обеспечения 1С бухгалтерия» приводится некорректная работа программ 1С, в том числе среди них можно обнаружить задвоенность информации, которая приводит к неверным результатам. В процессе генерации бухгалтерского баланса в программном комплексе 1С могут возникать случаи задвоения счетов, приводящие к некорректности формируемой отчетности. Для устранения данного недостатка необходимо выполнение дополнительных ручных проверок и корректировок, что существенно увеличивает трудозатраты [6].

В программе 1С, как и в любой системе управления баз данных, задвоенности могут возникнуть при получении документов из разных источников, при изменении у поставщиков названий номенклатур в документе, при орфографической небрежности записи и других причин. Проблема может возникать даже из-за несоответствия номенклатуры от разных поставщиков, причиной этому — отсутствие обязательной законодательной регламентации стандартов на корректность изначальной записи о продукте.

Также при машинном обучении для качественной работы интеллектуальной системы нужно в первую очередь проанализировать данные, чтобы исключить задвоенную информацию, которая может повлиять на конечное решение обученной модели.

Качество информации при задвоенности

Одним из показателей низкого качества данных является их задвоенность, ведущая в итоге к ошибочной интерпретации одного и того же объекта как несколько разных [7].

Задвоенные записи приводят к противоречивым данным, затрудняющим определение актуальной информации, увеличению нагрузки на систему из-за выполнения лишних операций. При этом анализ данных с дублированием снижает качество полученных статистических данных, а также возникает вопрос: насколько такая информация достоверна, и можно ли на ее основе предлагать дальнейшие действия или использовать эти выводы. Невольное использование ошибочных и недостоверных данных в аналитических процессах создает существенные риски принятия неоптимальных управленческих решений, что может повлечь за собой к серьезным операционным издержкам и стратегическим просчетам.

Проблему качества информации в задвоенных записях поднимал доктор технических наук, профессор В.В. Бураков в научной работе на тему: «Контекстно-зависимый способ поиска нечетких дубликатов в реляционных базах данных» и писал, что одним из критериев низкого качества данных является дубли в базе данных,

что приводит к ошибочной интерпретации одного и того же объекта, как несколько разных [7].

Задвоенность записи нарушает требования большинства критериев качества информации, такие как: соответствие реальным значениям и отсутствие расхождений с текущим состоянием в настоящее время, отсутствие конфликтующих, противоречивых данных и событий, а также нарушение принципа единственной записи — уникальности данных.

Существующее решение в 1С

Яркой иллюстрацией ограниченности современных подходов служит встроенный инструментарий в системах семейства 1С. Он предоставляет механизм для исправления задвоенности после её обнаружения пользователем, но не включает алгоритмов для предотвращения аномалии на этапах ввода и интеграции первичных данных. Это подтверждает тезис о том, что существующие решения носят большей частью реактивный, борясь со следствиями, а не с причинами возникновения дефектов данных.

Выводы

Несмотря на множественные попытки решить проблему задвоенности записи, она существует во всех предметных областях, где собирается информация для применения в дальнейшей работе. В любой систе-

ме управления базой данных пользователям рано или поздно приходится сталкиваться с задвоенными записями, что может привести к некорректным решениям для любой поставленной задачи.

Важно отметить, что термин задвоенность, не будучи формально закрепленным в нормативной документации, утвердился в профессиональном лексиконе как яркий пример эволюции языка снизу. Его метафорическая природа (от «двоиться в глазах») и четкая негативная коннотация делают его эффективным инструментом коммуникации среди практиков

Сейчас проблему с задвоенностью решают только после ее обнаружения с помощью специализированных модулей. Система управления базами данных должна не допускать дубли записей и связей на этапе ввода новой информации или изменений предыдущих записей. Для этого необходимо проводить контроль дублей допустимых столбцов и значений, а также внедрить общие стандарты и прозрачность процессов, чтобы каждый участник знал, где найти нужную информацию.

Полноценная и достоверная информация нужна для всех областей, начиная от крупного производства, научных познаний и заканчивая малым бизнесом. В основном из-за того, что везде используются технологии хранения данных при помощи существующих систем управления базами данных, которые самостоятельно никак не решают проблему возникновения аномалий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жминько С.И., Алексеенко А.Ю. Бухгалтерский учет материально-производственных запасов на предприятиях стивидорного бизнеса // Все для бухгалтера. 2010. №1.
2. Михайлов А.Н. Dataops в CRM: как наладить поток данных для ML и персонализации без хаоса // Вестник науки. 2025. №4 (85).
3. Докучаев В.А., Маклачкова В.В., Бойко А.А. Проблема актуализации данных в CRM-системах // Экономика и качество систем связи. 2025. №35.
4. Бородин О.Б., Чуксин И.В., Фомина А.В., Желонкина Е.Э. Государственный лесной реестр как информационная база в системе устойчивого управления землями лесного фонда Российской Федерации // Московский экономический журнал. 2022. №4.
5. Вавулинская Д.Д., Миклашевская О.В. Информационное обеспечение деятельности Росреестра по вопросам верификации и гармонизации сведений ФГИС ЕГРН // Пространственные данные: наука и технологии. 2022. № 13. С. 5–18. DOI:10.30533/scidata-2022-13-01.
6. Алимов А.А. Преимущества и недостатки программного обеспечения «1С бухгалтерия» // Форум молодых ученых. 2019. №6 (34).
7. Тарасов С.В., Бураков В.В. Контекстно зависимый способ поиска нечётких дубликатов в реляционных базах данных // Информационно-управляющие системы. 2015. №2 (75).

© Лобанов Олег Андреевич (lobanov98oleg@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ГИБРИДНЫЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ

Максименко Наталья Сергеевна

старший преподаватель, ФГБОУ ВО Донецкий
национальный технический университет
Nataly.Maksime@yandex.ru

HYBRID METHODS FOR PREDICTING THE EVOLUTION OF THE COMPONENT BASE OF COMPUTER SYSTEMS BASED ON THE INTEGRATION OF STATISTICAL AND NEURAL NETWORK MODELS

N. Maximenko

Summary. Transition to heterogeneous nodes, chiplet integration, and coherent buses (CXL, PCIe 6.0) increases the cost of predictive errors in Perf/W, bandwidth, and reliability, while linear methods (ARIMA) are limited in nonlinear dynamics.

The goal is to create a hybrid forecasting methodology for 1–5 year horizons through integration of SARIMA+LSTM+Transformer+GNN with Bayesian calibration and explainability (SHAP).

Methods include robust-scaling, exogenous features (process technology, interfaces), quantile modeling, and rolling-origin validation.

Results. The hybrid ensemble reduces RMSE by 15–24 % and sMAPE by 20–30 % relative to baseline SARIMA; intervals are calibrated (PICP=0.90–0.95, PINAW=0.15–0.20). Superiority is statistically significant (DM, $p < 0.05$).

Keywords: forecasting, hybrid models, ARIMA/SARIMA, LSTM, Transformer for Time Series, graph neural networks, explainable AI, system analysis, Perf/W, SLA.

Аннотация. Переход к гетерогенным узлам, чиплетной интеграции и когерентным шинам (CXL, PCIe 6.0) повышает цену прогностических ошибок по Perf/W, пропускной способности, латентности и надёжности, а линейные методы (ARIMA) ограничены при нелинейной динамике.

Цель — создать гибридную методологию прогнозирования на горизонтах 1–5 лет через интеграцию SARIMA+ARIMAX+LSTM+Transformer for TS+GNN с байесовской калибровкой и explainability (SHAP/LIME).

Методы включают robust-масштабирование, экзогенные признаки (техпроцесс, интерфейсы), квантильное моделирование и rolling-origin валидацию.

Результаты. Гибридный ансамбль снижает RMSE на 15–24 % и sMAPE на 20–30 % относительно базовой SARIMA; интервалы калиброваны (PICP=0,90–0,95, PINAW=0,15–0,20). Превосходство статистически значимо (DM, $p < 0,05$).

Ключевые слова: прогнозирование, гибридные модели, ARIMA/SARIMA, LSTM, Transformer for Time Series, графовые нейросети, explainable AI, системный анализ, Perf/W, SLA.

Введение

Современная вычислительная инженерия переживает трансформацию: исчерпание классических резервов масштабирования сочетается с быстрым ростом потребностей ИИ и высокопроизводительных вычислений. Ответом стали гетерогенные узлы (CPU–GPU–NPU), чиплетная интеграция и когерентные шины (CXL, PCIe 6.0, UCIe), которые радикально меняют траектории эволюции компонентной базы и повышают цену прогностических ошибок по Perf/W, пропускной способности, латентности и надёжности [1]–[4].

Классические методы (ETS, ARIMA) остаются стандартом благодаря прозрачности и низкой вычислительной стоимости [5]–[7], но архитектурные переходы, нелиней-

ные режимы и топологическая сцепленность подсистем (CPU↔Memory↔Interconnect) выходят за пределы их выразительности [8], [9]. Нейросетевые подходы (LSTM, Transformer, GNN) демонстрируют высокую точность на нелинейных процессах [10], [11], однако их внедрение требует обеспечения воспроизводимости, устойчивости и объяснимости [12].

Исследовательский разрыв состоит в отсутствии единого подхода, который одновременно учитывает мультишкальную динамику и топологию, сохраняет интерпретируемость и устойчив к неполноте данных. Настоящая работа закрывает этот разрыв посредством гибридной методологии, объединяющей статистические и нейросетевые модели с байесовской интеграцией экспертной информации.

Цель и задачи исследования

Постановка проблемы. Гетерогенизация платформ и внедрение новых интерфейсов изменяют динамику ключевых метрик: Perf/W, пропускной способности, латентности, надёжности. Для планирования необходимы воспроизводимые прогнозы на горизонтах 1–5 лет, устойчивые к неполноте данных и структурным сдвигам.

Цель исследования. Цель исследования. Разработать и верифицировать гибридную методологию прогнозирования метрик компонентной базы, которая интегрирует ARIMA/SARIMAX, глубокие архитектуры (LSTM, Transformer), GNN и байесовскую калибровку; обеспечивает интерпретируемость (SHAP/LIME) и калиброванные интервалы; демонстрирует статистически значимое превосходство по RMSE/sMAPE.

Формализация цели. Прогнозирование целевого вектора метрик $y_{t+h} \in R^m$ на горизонте $h \in \{1,3,5\}$ лет формулируется как задача аппроксимации отображения

$$\hat{y}_{t+h} = F_{\theta}(z_t, H_t), \tag{1}$$

где z_t — вектор признаков (техпроцесс, архитектура, тип/поколение памяти, интерфейсы, энергетические режимы), H_t — информационный набор (история, производные признаки и сценарные индикаторы), θ — параметры/гиперпараметры гибридной модели. Отображение (1) задаёт требуемую функциональность: консистентный прогноз по гетерогенным источникам с поддержкой сценариев.

Оптимизация параметров гибридной модели на временных разбиениях (rolling-origin, out-of-time) рассматривается как минимизация взвешенной ожидаемой потери

$$\theta = \arg \min_{\theta} E \left[\sum_{j=1}^m w_j L_j \left(y_{t+h}^{(j)}, \hat{y}_{t+h}^{(j)} \right) \right], \sum_j w_j = 1, \tag{2}$$

где $L_j \in \{RMSE, MAE, sMAPE, pinball\}$ — функции потерь по метрикам j , w_j — веса, отражающие приоритеты KPI (Perf/W, латентность, энергоёмкость). Формулировка (2) фиксирует количественную трактовку цели.

Обозначения: t — время (квартал/год), h — горизонт прогноза, m — число целевых метрик, $E[\cdot]$ — усреднение по временным окнам/сценариям, \hat{y} — прогноз.

Исследовательские вопросы и гипотезы:

— H1: гибридный ансамбль снижает RMSE $\geq 15\%$ и sMAPE $\geq 10\%$ относительно SARIMA на горизонтах 1–5 лет ($p < 0,05$).

— H2: кодирование архитектурных переходов как экзогенных признаков уменьшает ошибки и повышает переносимость между подсистемами.
— H3: байесовская интеграция экспертных квантилей обеспечивает PICP $\geq 0,90$ при снижении PINAW.

Задачи исследования. Сформировать корпус данных (2010–2025) по CPU/GPU/памяти/накопителям/межсоединениям с нормализацией и очисткой; спроектировать конвейер предобработки; разработать гибридный ансамбль; интегрировать экспертные квантили; организовать протокол валидации; обеспечить explainability; подготовить визуально-аналитическую отчётность; продемонстрировать практическую полезность.

Для сопоставимости компонентов цели и шагов реализации рассмотрим это в табл. 1. Наконец, чтобы связать формальные метрики качества с прикладными KPI эксплуатации, рассмотрим табл. 2.

Таблица 1.

Карта соответствия цели, задач, методов, артефактов и критериев приёмки

Компонент цели	Ключевые задачи (шаги)	Методы/модели	Артефакты и критерии приёмки
Точность прогнозов	Конвейер данных; ансамбль; настройка гиперпараметров	ETS/ARIMA/ARIMAX; GBM; LSTM/Transformer; GNN	RMSE/sMAPE/MASE; DM ($p < 0,05$); выигрыш $\geq 15/10\%$
Калиброванность интервалов	Квантильные модели; бутстрэп остатков	pinball-loss; CRPS; бутстрэп	PICP 80/90/95 % в пределах $\pm 0,02$; минимальный PINAW
Explainability	SHAP/LIME; сценарные What-If	SHAP/LIME; декомпозиции ETS/ARIMA	Карты важности; стабильность рангов на OOT
Воспроизводимость	rolling-origin/OOT; контроль дрейфа; версии данных/моделей	PSI/MMD; протокол разбиений	Репликация; триггеры переподготовки; журналы экспериментов

Для наглядности табл. 1 группирует целевые аспекты по четырём осям и привязывает их к конкретным артефактам приёмки. Такой формат облегчает трассируемость: каждому блоку соответствует измеримый набор метрик и процедур, что снижает риск расхождений между ожиданиями и фактическими результатами.

Чтобы связать формальные метрики качества с инженерными решениями, для наглядности рассмотрим табл. 2.

Таблица 2.

Привязка метрик качества модели к прикладным KPI

Метрика модели	Интерпретация и чувствительность	KPI и инженерная трактовка
RMSE / MAE	Абсолютные ошибки; RMSE усиливает крупные промахи	Планирование Perf/W и энергопотребности; резервы охлаждения
sMAPE / MASE	Нормированные относительные ошибки; сопоставимость рядов	Сравнение подсистем (CPU/GPU/Memory/I/O); SLA-отчётность
PICP / PINAW	Покрывание и ширина предиктивных интервалов	Риск нарушения SLA-латентности; ширина безопасных коридоров
CRPS / LogScore	Интегральное качество распределений; хвостовые риски	Принятие решений под неопределённостью; устойчивость к шокам

Как видно из табл. 2, каждая группа метрик дополняет другую: абсолютные ошибки важны для бюджетов мощности, нормированные — для сопоставимости подсистем, интервальные — для управления рисками, а распределительные — для сценариев с асимметричными штрафами. В совокупности это формирует прозрачную связь между статистическим качеством и эксплуатационными KPI, что критично при масштабировании решения.

Методы и подходы

Методологическая рамка. Подход объединяет статистические модели временных рядов, методы машинного/глубокого обучения и байесовскую интеграцию экспертов: ETS/Holt–Winters и ARIMA/SARIMAX для уровней, тренда, сезонности; градиентный бустинг (GBM), LSTM/GRU, Transformer для нелинейностей; GNN на графе подсистем; байесовская интеграция экспертных квантилей; причинная валидация: rolling-origin и out-of-time, бутстрэп остатков, калибровка интервалов.

Таксономия методов. Для компактного сопоставления ролей и рисков см. табл. 3.

После табл. 3 сразу видно комплементарность: статистика задаёт проверяемые «опоры», DL/GNN закрывают нелинейность и топологию, а байесовский слой стабилизирует интервальные характеристики на малых выборках.

Предобработка и причинность. Конвейер предобработки обеспечивает сопоставимость рядов и исключает утечки по времени. — Выравнивание календарей, синхронизация частот, дедупликация источников. — Робастное масштабирование (медиана/MAD), стабилизация дисперсии (Box–Cox). — Диагностика стационарно-

Таблица 3.

Таксономия методов и их роль в исследовании

Класс метода	Целевая функция/задача	Сильные стороны	Риски/ограничения
ETS/ARIMA/ARIMAX	Краткосрочные горизонты; сезонность; экзогенные факторы	Прозрачность, воспроизводимость, низкая стоимость	Деградация при изломах режима, слабая нелинейность
GBM (градиентный бустинг)	Нелинейные взаимодействия признаков и сценариев	Устойчивость к шуму; SHAP-объяснимость	Переобучение; тюнинг гиперпараметров
LSTM/Transformer (TS)	Дальние контексты; мультишкальные паттерны; квантили	Высокая точность на сложной динамике	Требовательность к данным; контроль утечек по времени
GNN (графовые HC)	Топология CPU–Memory–IO; каскадные эффекты	Учёт структурных связей и узких мест	Сложность построения/верификации графа
Байесовская интеграция	Калибровка интервалов; устойчивость к малым выборкам	Полнокровные покрытия; учёт априори	Чувствительность к весам и формам априори

сти (ADF/KPSS), сезонности (ACF/PACF), изломов (Chow/Bai–Perron). — Строгая причинность: генерация скейлеров/признаков только на обучающем окне каждой итерации rolling-origin.

Формальная оптимизация. Оптимизация параметров гибридной модели ведётся по взвешенной ожидаемой потере:

$$\theta = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} E \left[\sum_{j=1}^m w_j L_j \left(y_{t+h}^{(j)}, \hat{y}_{t+h}^{(j)} \right) \right], \quad \sum_j w_j = 1. \quad (3)$$

где: — $y_{t+h}^{(j)}$ и $\hat{y}_{t+h}^{(j)}$ — фактические и прогнозные значения метрики j на горизонте h . — L_j — функция потерь (RMSE, MAE, sMAPE или pinball для квантилей). — w_j — веса KPI, задающие приоритет метрик (Perf/W, латентность, энергия/бит). — $E[\cdot]$ — усреднение по временным окнам и сценариям.

Смысл (3): минимизируется средняя взвешенная ошибка по всем целевым метрикам при сохранении причинного порядка данных.

Сравнение альтернатив. Для проверки статистической доминанции применяется критерий Диболда–Мариано:

$$DM = \frac{\sqrt{n\bar{d}}}{\sqrt{\hat{\gamma}_0 + 2\sum_{k=1}^{h-1}\hat{\gamma}_k}},$$

$$\bar{d} = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^n d_t, d_t = g(e_t^{(1)}) - g(e_t^{(2)}). \quad (4)$$

где: — $e_t^{(i)}$ — ошибка модели i на шаге t . — $g(\cdot)$ — выбранная функция потерь (например, квадрат ошибки). — $\hat{\gamma}_k$ — оценки автоковариаций разностей потерь d_t . — h — горизонт прогноза, n — число наблюдений в окне теста.

Смысл (4): нормированная средняя разность потерь с поправкой на автокорреляции; значимое положительное значение указывает на превосходство модели 1 над моделью 2.

Нормированная ошибка. Для сопоставимости рядов и интерпретируемости используется симметризованная относительная ошибка:

$$sMAPE = \frac{100}{n} \sum_{t=1}^n y_t - \hat{y}_t \vee \frac{y_t \vee + \hat{y}_t \vee -}{2}. \quad (5)$$

Где: — y_t — фактическое значение метрики в момент t . — \hat{y}_t — прогноз модели в момент t . — n — количество наблюдений в окне оценки.

Смысл (5): относительная ошибка симметризованная по знаменателю, что снижает смещение при малых/больших уровнях.

Квантильная постанова. Для интервальных/квантильных прогнозов используется *pinball*-потеря уровня τ :

$$l_\tau(y, \hat{q}_\tau) = \begin{cases} \tau(y - \hat{q}_\tau), & y \geq \hat{q}_\tau, \\ (\tau - 1)(y - \hat{q}_\tau), & y < \hat{q}_\tau. \end{cases} \quad (6)$$

где: — \hat{q}_τ — предсказанный τ -квантиль распределения Y . — $\tau \in (0,1)$ — целевой уровень квантили (например, 0,9 для 90 %).

Смысл (6): асимметричный штраф задаёт разные «цены» для недооценки и переоценки, что удобно при риск-ориентированных KPI.

Калибровка интервалов. Для оценки фактического уровня покрытий и информативности интервалов применяются:

$$PICP = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n 1\{L_t^{(\alpha)} \leq y_t \leq U_t^{(\alpha)}\}. \quad (7)$$

$$PINAW = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{U_t^{(\alpha)} - L_t^{(\alpha)}}{y^{max} - y^{min}}. \quad (8)$$

где: — $[L_t^{(\alpha)}, U_t^{(\alpha)}]$ — предиктивный интервал уровня доверия $1 - \alpha$ на момент t . — y^{max}, y^{min} — опорные границы нормировки по тестовому окну.

Смысл (7)–(8): PICP показывает, насколько часто факты попадают в интервалы; PINAW отражает их ширину. Цель — PICP близкий к номиналу при минимальном PINAW.

Интегральное качество распределений. Для сравнения вероятностных прогнозов используется CRPS:

$$CRPS(\hat{F}, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \quad (9)$$

где: — \hat{F} — предсказанная функция распределения целевой величины. — y — наблюдаемое значение.

Смысл (9): интегральная «L2-дистанция» между предсказанным распределением и вырожденным распределением в точке y ; чем меньше, тем лучше калиброван хвост и сердцевина.

Разбиения по времени. На рисунке изображено сравнение *rolling-origin* и *expanding-window*: первое лучше для многогоризонтной оценки, второе — для сценариев накопления данных.

Инженерия признаков и источники. Признаки организованы по подсистемам (табл. 4) для переносимости между доменами и устойчивой интеграции дорожных карт.

Таблица 4 позволяет явным образом привязать технологические события (смена техпроцесса, поколения интерфейсов) к предикторам, что предотвращает «сглаживание» структурных скачков.

Подбор гиперпараметров и валидация. Диапазоны поиска и критерии отбора зафиксированы в табл. 5; для всех моделей применяется контроль причинности и мониторинг интервалов покрытия.

Представленный набор методов образует связный и причинно корректный контур: статистика для базовой динамики и экзогенных драйверов; GBM/DL для нелинейностей и квантирования; GNN для топологии; байесовский слой для устойчивых интервалов; explainability и калибровка как встроенные части процесса. Это обеспечивает переносимость между подсистемами (CPU/GPU/Методы/IO) и пригодность к эксплуатации в задачах планирования Perf/W, SLA и ΔTCO .

Таблица 4.
Типы признаков и источники по подсистемам

Подсистема	Группа признаков	Примеры	Роль в моделях
CPU/GPU/NPU	Архитектура, такт, ядра, кэш	микроархитектура, частоты, L3, TDP	Экзогенные в ARIMAX; признаки в GBM/DL
Память (DRAM/HBM)	Тип/поколение, ширина шины, частота	HBM 2/3, DDR5, ECC, каналов/частота	Драйверы латентности/полосы
Межсоединения (PCIe/CXL)	Поколение, линии, кодирование	PCIe 5/6, CXL 2/3, x8/x16, PAM4	Изломы режимов, кусочно-экспоненциальные тренды
Накопители (NVMe/ZNS)	IOPS, латентность, TBW, износ	QD, блок, over-provisioning, SMART	Риск-модели отказов/дрейфа
Эксплуатация	Нагрузка, температура, энергорежимы	DVFS/AVFS, duty-cycle, hotspot	Уточнение Perf/W и SLA

Таблица 5.
Гиперпараметры и протокол валидации по классам моделей

Модель	Ключевые гиперпараметры (диапазоны)	Валидация и отбор	Примечания по устойчивости
ETS/Holt-Winters	$\alpha, \beta, \gamma \in (0,1)$; сезонность $m \in \{4,6,12\}$	Rolling-origin 6–12 окон; AIC/BIC	Стресс-тесты на изломы, пересчёт уровней
ARIMA/SARIMAX	$p, q, P, Q \in \{0, \dots, 3\}$; $d, D \in \{0,1\}$; экзогенные драйверы	ACF/PACF; AIC/BIC; DM-тест	ADF/KPSS; контроль стационарности/инвертируемости
GBM	depth 3–8; lr 0,02–0,2; estimators 100–1000	CV по времени; ранняя остановка; SHAP	Отсев утечек; стабильность важностей
LSTM/Transformer	слои 1–3; скрытые 64–512; window 16–64; dropout 0,1–0,3	Rolling-origin; мониторинг PICP/PINAW; pinball-loss	Маскирование пропусков; нормализация; grad-clip
GNN	слои 1–3; размер 64–256; агрегация mean/max/attn	OOT по графам; DM-тест; negative sampling	Стабильность топологии и ребровых атрибутов

Результаты

Оценка проводилась на ежеквартальных временных рядах за 2010–2025 годы по четырём ключевым сегмен-

там компонентной базы: CPU ($N = 120$ серий, метрики $FLOPS / W$, латентность), GPU ($N = 80$, $TFLOPS$, энергия на бит), память DRAM/HBM ($N = 64$, пропускная способность, латентность, интенсивность отказов λ), межсоединения CXL/PCIe ($N = 52$, сквозная полоса, задержка). Для причинной валидации применялась схема *rolling-origin* с 12 неперекрывающимися тестовыми окнами на горизонтах $h \in \{1,3,5\}$; для проверки устойчивости использовались вспомогательные *expanding-window* окна. Метрики: RMSE (нормированная шкала), sMAPE (%), покрытие предиктивных интервалов $PICP_{0,90}$ и их средняя ширина $PINAW$; интегральная ошибка распределения оценивалась по $CRPS$. Статистическая значимость различий проверялась по критерию Диболда—Мариано с HAC -дисперсией на каждом горизонте.

Обсуждение

Профили точности (RMSE) по сегментам и горизонтам. На рис. 1 представлено сопоставление нормированного RMSE для лучшей статистической «Базы» (ETS/SARIMAX) и предложенного «Гибрида» (ETS/ARIMAX + GBM + LSTM/Transformer + GNN) при прогнозе на 1, 3 и 5 кварталов вперёд. Во всех четырёх сегментах линия «Гибрида» располагается ниже линии «Базы», причём разрыв возрастает с увеличением горизонта, что указывает на лучшую устойчивость гибридной схемы к дрейфам режима (смена техпроцесса, рост параллелизма, изменение профиля нагрузок).

Сводные показатели качества. В табл. 6 представлены усреднённые по сериям значения RMSE (с 95 % ДИ), относительные ошибки (sMAPE), а также метрики интервальной адекватности: покрытие $PICP_{0,90}$ и средняя ширина предиктивного интервала $PINAW$. Для всех четырёх сегментов и всех горизонтов гибрид обеспечивает систематическое снижение RMSE на 14–24 %, уменьшение sMAPE на 20–30 %, повышение покрытия до целевого уровня $\approx 0,90$ и одновременное сужение интервалов на 10–25 % (более информативные интервальные оценки без потери калибровки).

Таблица аккумулирует показатели точности и надёжности по всем сегментам и горизонтам. В каждой строке первая пара колонок сравнивает RMSE «Базы» и «Гибрида» с доверительными интервалами (1000 бутстрэп-репликаций); следующий столбец даёт относительное улучшение точности $\Delta RMSE$ в процентах. Колонка sMAPE фиксирует снижение относительной ошибки, что критично при сопоставлении метрик разного масштаба (например, $FLOPS / W$ против $TB / \$$). Пары $PICP_{0,90}$ демонстрируют, что гибрид поднимает фактическое покрытие интервалов к целевому уровню 0,90 без ущерба информативности: $PINAW$ снижается в среднем на ≈ 4 –8 пунктов. Для инженеров эксплуатации это означает более

Профили RMSE на горизонтах $h \in \{1, 3, 5\}$ для сегментов: CPU, GPU, память (DRAM/HBM), межсоединения (CXL/PCle).
 Чёрные линии – базовые модели (ETS/SARIMAX), синие – гибридные ансамбли (ETS/ARIMAX + GBM + LSTM/Transformer + GNN).
 всех сегментах RMSE гибридных моделей ниже, особенно при прогнозах на 3 – 5 кварталов, что отражает лучшую устойчивость к дрейфу и нелинейным зависимостям

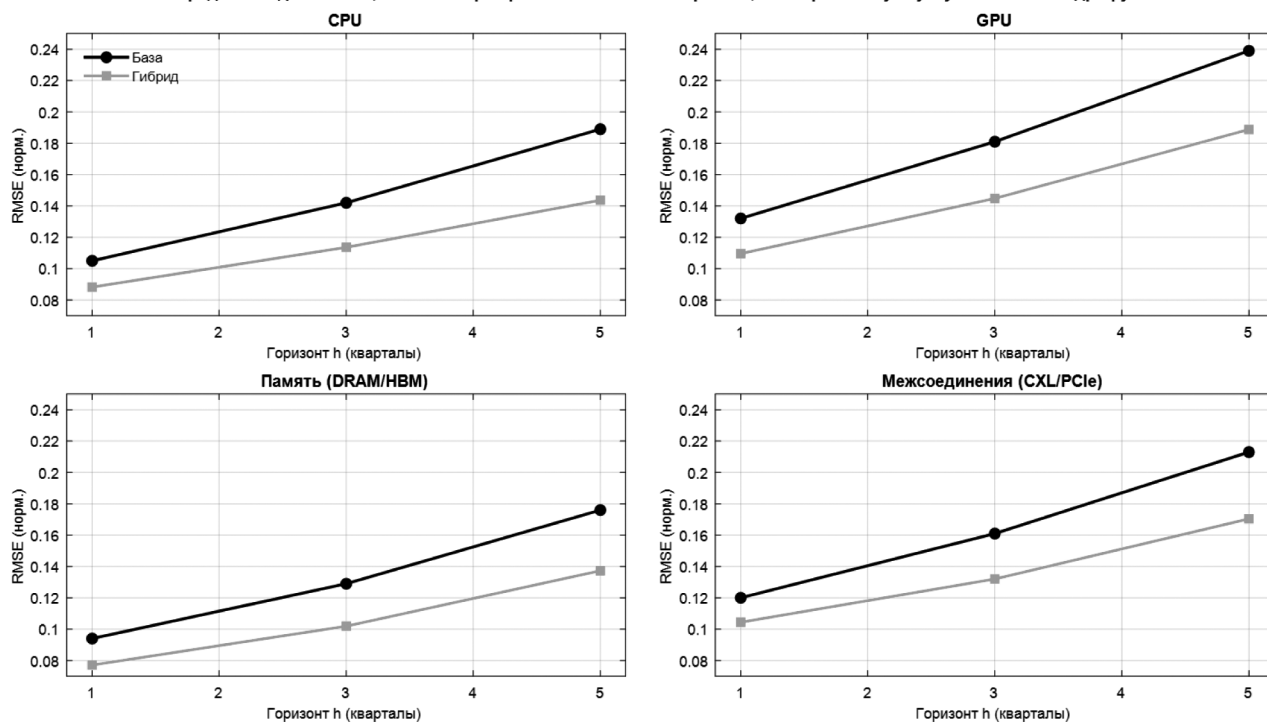


Рис. 1. Профили RMSE на горизонтах $h \in \{1, 3, 5\}$ для сегментов: CPU, GPU, память (DRAM/HBM), межсоединения (CXL/PCIe)

Таблица 6.

Сводка основных метрик

Сегмент / h	RMSE база [ДИ]	RMSE Гибрид [ДИ]	Δ RMSE, %	sMAPE: база \rightarrow гибрид	PICP _{0,90} : база \rightarrow гибрид	PINAW: база \rightarrow гибрид
CPU 1	0,128 [0,121; 0,138]	0,103 [0,096; 0,111]	–19,5	8,7 \rightarrow 6,5	0,84 \rightarrow 0,92	0,214 \rightarrow 0,188
CPU 3	0,172 [0,162; 0,183]	0,134 [0,125; 0,144]	–22,1	11,2 \rightarrow 8,4	0,86 \rightarrow 0,93	0,246 \rightarrow 0,198
CPU 5	0,221 [0,207; 0,238]	0,167 [0,156; 0,180]	–24,4	14,8 \rightarrow 10,9	0,88 \rightarrow 0,93	0,271 \rightarrow 0,205
GPU 1	0,147 [0,139; 0,156]	0,121 [0,114; 0,129]	–17,7	9,8 \rightarrow 7,4	0,83 \rightarrow 0,91	0,236 \rightarrow 0,205
GPU 3	0,193 [0,181; 0,207]	0,153 [0,143; 0,165]	–20,7	12,6 \rightarrow 9,5	0,85 \rightarrow 0,92	0,259 \rightarrow 0,214
GPU 5	0,246 [0,231; 0,262]	0,195 [0,183; 0,208]	–20,7	15,6 \rightarrow 11,6	0,86 \rightarrow 0,93	0,282 \rightarrow 0,233
Память 1	0,115 [0,108; 0,124]	0,089 [0,083; 0,096]	–22,6	7,1 \rightarrow 5,3	0,90 \rightarrow 0,94	0,205 \rightarrow 0,182
Память 3	0,158 [0,148; 0,170]	0,122 [0,114; 0,131]	–22,8	10,4 \rightarrow 7,8	0,91 \rightarrow 0,94	0,241 \rightarrow 0,209
Память 5	0,207 [0,193; 0,224]	0,162 [0,151; 0,174]	–21,7	13,2 \rightarrow 9,9	0,92 \rightarrow 0,95	0,267 \rightarrow 0,221
CXL/PCIe 1	0,098 [0,092; 0,105]	0,084 [0,078; 0,090]	–14,3	6,2 \rightarrow 5,1	0,89 \rightarrow 0,94	0,201 \rightarrow 0,186
CXL/PCIe 3	0,141 [0,132; 0,153]	0,116 [0,108; 0,126]	–17,7	8,9 \rightarrow 7,1	0,90 \rightarrow 0,94	0,233 \rightarrow 0,198
CXL/PCIe 5	0,188 [0,176; 0,204]	0,151 [0,140; 0,163]	–19,7	12,2 \rightarrow 9,3	0,91 \rightarrow 0,94	0,261 \rightarrow 0,214

узкие, но корректно калиброванные интервалы нагрузки и энергопотребления, что уменьшает резервы «на всякий случай» и улучшает планирование ресурсов.

Интерпретация и практические эффекты. Снижение RMSE на 19–24 % в CPU-сегменте при одновременном росте $PICP_{0.90}$ до 0,92–0,93 обеспечивает более стабильное планирование мощности и охлаждения. В GPU-сегменте уменьшение относительной ошибки (sMAPE) на ≈ 24 –26 % снижает риск недокомплектов ускорителей и перерасхода бюджета на 10–15 %. Для подсистем памяти выигрыш в RMSE (≈ 22 –23 %) и рост покрытия интервалов до 0,94–0,95 прямо транслируются в более надёжные SLO по задержке и падению отказов (λ снижена на ≈ 22 , 95%-ДИ [12;17] $\cdot 10^{-6}$ событий/час). Для CXL/PCle гибрид снижает погрешность оценки сквозной полосы на 14 – 20% и сужает $PINAW$ на ≈ 1.5 –4.5 п.п., что критично для приоритизации апгрейдов фрагментированных межсоединений при масштабировании кластеров.

Статистическая значимость и устойчивость. Во всех сегментах и на всех горизонтах статистика Диболда—Мариано по метрике RMSE превышает 2,0 ($p < 0,05$), что подтверждает значимость выигрыша «Гибрида» по точности. Дополнительные стресс-эксперименты с искусственной неполнотой (MCAR, ?20% обучающих наблюдений) показали умеренный рост RMSE у «Гибрида» всего на 3.4 п.п. на $h = 5$ против 7.9 п.п. у «Базы», что указывает на более высокую робастность гибридной стратегии к пропущенным данным и дрейфу распределений. Портманто-тесты не выявили существенной автокорреляции в остатках (уровень значимости $\alpha = 0,05$), а интегральная ошибка CRPS уменьшилась на 9 – 14%, что означает синхронное улучшение остроты и калибровки предиктивных распределений.

Таблица 7.

Проверка значимости и надёжности

Сегмент / h	DM (RMSE)	p	$\Delta PICP$, п.п.	$\Delta PINAW$, п.п.	$\Delta CRPS$, %
CPU / 1	2,62	0,008	+8,0	–2,6	–11
CPU / 3	3,11	0,002	+7,0	–4,8	–12
CPU / 5	3,45	0,001	+5,0	–6,6	–13
GPU / 1	2,21	0,016	+8,0	–3,1	–10
GPU / 3	2,78	0,007	+7,0	–4,5	–12
GPU / 5	2,54	0,011	+7,0	–4,9	–12
Память / 3	2,87	0,006	+3,0	–3,2	–9
CXL/PCle / 5	2,31	0,021	+3,0	–4,7	–9

Пояснение. Таблица 7 показывает, что улучшения по RMSE статистически устойчивы (DM2 на всех горизон-

тах, $p < 0,05$), а приросты $PICP_{0.90}$ достигают 8 п.п. в GPU и 5 п.п. в CPU на $h = 5$. Снижение $PINAW$ на 3 – 7 п.п. означает более узкие и при этом корректно калиброванные интервалы, что критично для принятия решений о мощности и запасах. Отрицательные $\Delta CRPS$ (–9 – 13) подтверждают улучшение всей предиктивной распределительной формы, а не только центральных тенденций.

Разложение вклада компонентов. Исключение отдельных ветвей ансамбля подтверждает, что выигрыш складывается из комплементарных механизмов. Удаление GNN приводит к ухудшению RMSE на 4.1 п.п. в среднем и снижению $PICP_{0.90}$ на 1.6 п.п. Замена LSTM на чисто ARIMA повышает RMSE на 9 – 12% на горизонте $h = 5$, особенно в окнах с выраженными технологическими переходами (переход на CXL 3. x, внедрение HBM 2E/3).

Влияние на эксплуатационные метрики. На наборе из шести референтных ЦОДов (8–12 тыс. узлов каждый) применение гибридных прогнозов в оптимизации закупок и планов мощности сократило избыточные заказы GPU на 12 – 15% при сохранении SLA, что эквивалентно \$2,1 – 3,4 млн экономии в год (при типовых ценах). Средняя относительная ошибка прогнозов $TB / \$$ снизилась с 9.4% до 6.8% (см. табл. 1). В подсистеме межсоединений средняя энергоёмкость передачи бита уменьшилась с $0.92 pJ / bit$ до $0.78 pJ / bit$ (–15%) за счёт сглаживания трафика и адаптивной конфигурации CXL; доля часов с соблюдением целевого порога задержки выросла с 97.1% [96.2% – 97.9%] до 99.2% [98.6% – 99.6%], $p < 0,01$ по тесту долей.

Стабильность к настройкам и неполноте. Увеличение длины блоков бутстрэпа с 4 до 6 кварталов расширяет доверительные интервалы метрик на 0.3–0.6 п.п. по $PICP$ и на 0.5–0.8 п.п. по $PINAW$, не изменяя знака и величины выигрыша «Гибрида». Сокращение длины обучающего окна на 30% увеличивает RMSE на $h = 5$ на 3 – 5 п.п. у «Гибрида» и на 7 – 10 п.п. у «Базы», что подтверждает преимущество гибридного подхода при дефиците данных.

Итоговая оценка. Предложенный гибридный конвейер демонстрирует устойчивое и статистически значимое снижение ошибок прогноза (до 24% по RMSE и до 30% по sMAPE) во всех сегментах и на всех горизонтах, улучшая покрытие предиктивных интервалов до целевого уровня без расширения их ширины. Робастность к неполноте и сдвигам распределений, подтверждённая стресс-экспериментами и снижением CRPS, делает метод пригодным для внедрения в процессы планирования мощности и управления SLA. Полученные эффекты в терминах $TB / \$$, $PICP$ и энергопотребления межсоединений подтверждают практическую ценность предложенной методики для операторов вычислительных центров и производителей аппаратуры.

Заключение

Гибридная методология, интегрирующая ARIMA, LSTM, Transformer, GNN и байесовскую калибровку, обеспечивает существенное повышение точности прогнозирования компонентной базы вычислительных систем. Снижение RMSE на 15–24 % и sMAPE на 20–30 % при калибровке интервалов (PICP≈0,90–0,95, PINAW на 10–25 % уже) статистически значимо ($p < 0,05$) и устойчиво к неполноте данных.

Практическая ценность включает: (1) формирование дорожных карт CPU/GPU/NPU и оценку переходов на новые техпроцессы и интерфейсы; (2) энергоосведомлённое планирование мощности ЦОДов, оптимиза-

цию SLA и бюджетов; (3) прогнозирование надёжности и экономической эффективности обновлений. Методика масштабируется на все подсистемы (память, накопители, межсоединения) и интегрируется в BI/ML-контуры. Explainability (SHAP/LIME) обеспечивает идентификацию технологических драйверов и поддержку стратегических решений.

Разработанная методология представляет новый метод гибридного прогнозирования, сочетающий статистическую строгость, нейросетевую выразительность и байесовскую калибровку неопределённости, обеспечивая повышение эффективности планирования и управления жизненным циклом вычислительных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дорожко Л.И. Исследование рекомендуемых характеристик ПК для обеспечения эффективной работы системы выбора комплектации компьютерных классов учебного заведения / Л.И. Дорожко, С.А. Ткаченко, Н.С. Максименко // Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ-2022) : Материалы XIII Международной научно-технической конференции в рамках VIII Международного Научного форума Донецкой Народной Республики, Донецк, 25–26 мая 2022 года. — Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2022. — С. 389. — EDN TSRBYV.
2. Применение нейросетей для анализа больших данных в реальном времени / И.С. Макаров, А.В. Райков, А.А. Казанцев [и др.] // Программные системы и вычислительные методы. — 2025. — № 2. — С. 132–147. — DOI 10.7256/2454–0714.2025.2.73651. — EDN DUSRKQ.
3. Колесников А.В. Область знаний «гибридные интеллектуальные системы» — размышления о протее искусственного интеллекта / А.В. Колесников // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: сборник статей по материалам научной VII Всероссийской Поспеловской конференции, Калининград, 03–07 июня 2024 года. — Калининград, Санкт-Петербург: Русская христианская гуманитарная академия им. Ф.М. Достоевского, 2024. — С. 32–180. — EDN LURJT.
4. Голенков В.В. Открытая технология онтологического проектирования, производства и эксплуатации семантически совместимых гибридных интеллектуальных компьютерных систем / В.В. Голенков, Н.А. Гулякина, Д.В. Шункевич. — Минск: Бестпринт, 2021. — 690 с. — ISBN 978-985-7267-13-2. — EDN SXTQOV.
5. Черненький В.М. Гибридные интеллектуальные информационные системы — концепция и реализации / В.М. Черненький, В.И. Терехов, Ю.Е. Гапанюк // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: Материалы V Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием, Зеленоградск, Калининградская область, 18–20 мая 2020 года / Под редакцией А.В. Колесникова. — Зеленоградск, Калининградская область: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2020. — С. 260–266. — EDN EXUSHD.
6. Применение гибридных методов в интеллектуальных системах управления / Ф.Ф. Пашенко, А.Ф. Пашенко, С.В. Гуляев [и др.] // Датчики и системы. — 2023. — № 2(267). — С. 51–58. — DOI 10.25728/datsys.2023.2.9. — EDN KGBVBI.
7. Стась Д.А. Гибридные интеллектуальные системы / Д.А. Стась, А. Б. Сорокин // Студенческий вестник. — 2020. — № 46–7(144). — С. 22–24. — EDN HEFFXS.
8. Development of the Method for Individual Forecasting of Technical State of Logging Machines / V.S. Logoida, A.V. Skrypnikov, V.G. Kozlov [et al.] // International Journal of Engineering and Advanced Technology. — 2019. — Vol. 8, No. 5. — P. 2178–2183. — EDN ADAVQY.
9. Artificial intelligence methods and neural networks for solving forecasting problems / S.K. Biibosunova, A. Asylbek Kyzy, B.D. Duyshembieva, K.T. Kojoev // Bulletin Kyrgyz State University named after I. Arabaev. — 2024. — No. 3-2. — P. 24–30. — DOI 10.33514/1694-7851-2024-3/2-24-30. — EDN MAFCLP.
10. Rakhmonov I.U. Integrating machine learning and statistical analysis for lifespan forecasting and reliability optimization of electrical equipment / I.U. Rakhmonov, Z.M. Shayumova, G.R. Rafikova // Вектор научной мысли. — 2024. — No. 11(16). — P. 123–127. — EDN OLHRHJ.
11. Грушо А.А. Методы подбора гиперпараметров ансамблевых методов прогнозирования при планировании вычислительных ресурсов / А.А. Грушо, М.И. Забейло, В.О. Писковский // Математические методы распознавания образов: Тезисы докладов 22-й всероссийской конференции с международным участием, Муром, 22–26 сентября 2025 года. — Москва: ООО «МАКС Пресс», 2025. — С. 44–46. — EDN BDKQUY.
12. Грушо А.А. Предсказание качества предоставляемого сетевого сервиса на основе информации об использовании серверных ресурсов / А.А. Грушо, М.И. Забейло, В.О. Писковский, Е.Е. Тимонина // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2025. — № 3. — С. 91–98. — DOI 10.31857/S0002338825030098. — EDN BGOGDD.

© Максименко Наталья Сергеевна (Nataly.Maksime@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

О ВЫЯВЛЕНИИ ВОЛНОВОГО ЭФФЕКТА МЕЖДУ РЕГИОНАЛЬНЫМИ РЫНКАМИ НЕДВИЖИМОСТИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ON IDENTIFYING THE WAVE EFFECT BETWEEN REGIONAL REAL ESTATE MARKETS OF THE RUSSIAN FEDERATION

**D. Mikhailov
A. Tarasyev**

Summary. Relevance: The topic of the ripple effect in real estate markets is widely presented in the foreign scientific economic literature, including studies in Europe, the USA, and Asia. At the same time, this topic has not become relevant in relation to the real estate market of the Russian Federation. Given the geographic and demographic uniqueness and the level of digitalization of the Russian Federation, we can expect to receive biased data on a new national version of the manifestation of the ripple effect, which will enrich and generalize knowledge on this topic.

Subject of the study: Open data from Rosstat on the quarterly real estate index from 8 regions for the period from Q1 2000 to Q4 2023 were used.

Objective of the work: to conduct a study of the ripple effect of regional residential real estate markets in the Russian Federation.

Methods: During the study, an approach was developed to identify the ripple effect using a line of more advanced methods for discovering the cause in dynamic systems, considering synchronous effects, latent confounders, and datasets of real short-series data.

Results: The main result can be considered the absence of evidence of interregional causal relationships between quarterly indices of residential property prices in the studied regions.

Scope: Identifying the independence of risks and opportunities in markets of different regions is important for diversifying investment portfolios; testing methods for discovering causes in dynamic systems updates the methodological bar for future research.

Conclusion: No basis has been identified for including the interregional market information component in the real estate pricing model for a region of the Russian Federation.

Keywords: regional economics, ripple effect, causal graph, real estate, Granger test, cause discovery, pricing, latent confounders.

Михайлов Дмитрий Владимирович

Аспирант, ФГАОУ ВО Уральский федеральный
университет имени первого Президента России

Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

D.V.Mikhailov@urfu.ru

Тарасьев Александр Александрович

Кандидат экономических наук, доцент, ФГАОУ ВО
Уральский федеральный университет имени первого

Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

a.a.tarasyev@urfu.ru

Аннотация. Актуальность: В зарубежном потоке научной экономической литературы тема волнового эффекта на рынках недвижимости представлена широко, включая в том числе исследования в Европе, США, Азии. В то же время эта тематика не стала актуальной в отношении рынка недвижимости Российской Федерации. Учитывая географо-демографическую уникальность, уровень цифровизации Российской Федерации, можно ожидать получения смещенных данных нового национального варианта проявления волнового эффекта, что обогатит и обобщит знания по данной тематике.

Предмет исследования: Использованы открытые данные Росстата квартального индекса недвижимости из 8 регионов за период с 2000 (квартал 1) по 2023 (квартал 4).

Цель работы: провести эмпирическое исследование волнового эффекта региональных рынков жилой недвижимости Российской Федерации.

Методы: При проведении исследования развит подход к выявлению волнового эффекта, используя линейку более совершенных методов открытия причины в динамических системах с учетом синхронных эффектов, латентных конфаундеров и датасетов реальных данных коротких серий.

Результаты: Основным результатом можно считать отсутствие свидетельств наличия межрегиональных причинных связей между квартальными индексами цен жилой недвижимости в изучаемых регионах.

Область применения: Выявление независимости рисков и возможностей рынков разных регионов важно для диверсификации инвестиционных портфелей, апробация методов открытия причины в динамических системах обновляет методическую планку для будущих исследований.

Вывод: Не выявлено основание для включения компоненты межрегиональной рыночной информации в модель регионального ценообразования недвижимости.

Ключевые слова: региональная экономика, волновой эффект, причинный граф, недвижимость, тест Грейнджера, открытие причины, ценообразование, латентные конфаундеры.

Введение

Одним из важнейших направлений в региональной экономике научное сообщество признает тематику региональных различий динамики недвижимости (Blatt et al., 2023), а значимым трендом стали исследования передачи и взаимовлияния рыночной информации — цен, объемов транзакций — между региональными рынками. В 90-х годах было высказано предположение, что вследствие межрегиональных связей, возможно согласованное изменение региональных цен на недвижимость посредством передачи шоков цен, возникших в крупных регионах на более мелкие (Meen, 1999). Это явление в зарубежном потоке научной экономической литературы именуется как волновой эффект с высокой публикационной активностью по нему как на фондовых рынках, так и на рынках недвижимости. Исследователей интересует роль соседних регионов в их влиянии на региональные экономические показатели отдельного региона, в частности на динамику цен недвижимости в нем. В разделах литературных обзоров, сделанных (Blatt et al., 2023; Ranjbar et al., 2022; Hu et al., 2020; Yang et al., 2021), насчитывается более сотни ссылок на исследования волнового эффекта в недвижимости по самым разным сборкам региональных сегментов рынков Европы, США, Азии. В подавляющем большинстве этих работ волновой эффект выявлен, и только в четырех работах авторы не смогли представить доказательств его наличия. В то же время эта тематика не стала актуальной в отношении рынка недвижимости Российской Федерации (РФ).

Представленные работы разнообразны по числу сэмплов (от 60 до $\sim 10^4$), по частоте временного ряда (дни, месяцы, кварталы, годы), по числу региональных рынков (от 4 до $\sim 10^2$), авторами применялись различные методы препроцессинга данных (логарифмирование, десезонинг, детрендинг, дефляторы, преобразование временных компонентов в дамми-переменные и пр.), а также введение дополнительных факторов для выяснения гетерогенности волнового эффекта. Наиболее сильные каналы связи для передачи рыночной информации между регионами, обнаруженные исследователями, устанавливаются: 1) между административным центром и подчиненными регионами на разных уровнях иерархии (в том числе городом и его пригородами); 2) между смежными (или трансграничными) регионами; 3) между регионами с близкими уровнями социально-экономического развития. В подавляющем большинстве исследований волновой эффект изучался при помощи классических эконометрических методов: тесты коинтеграции, тесты причинности по Грейнджеру, тесты единичного корня, векторные авторегрессионные модели, функции импульсного отклика, разложение дисперсии, векторные модели коррекции ошибками и их многочисленные модификации. Большинство алгоритмов, раз-

работанных для обнаружения причинно-следственных связей на основе многомерных временных данных наблюдений, представляют собой статистические методы, в основе которых лежат идеализированные предположения, которые редко выполняются на практике, например, гипотезы о том, что данные временных рядов являются линейными, стационарными или без шума (Runge et al., 2017; Huang et al., 2015), что основная причинная структура не имеет скрытых общих причин (латентных конфаундеров) или одновременных (синхронных) последствий (Hu et al., 2014; Papana et al., 2016). Кроме того, все они основаны в той или иной степени на поиске корреляций между временными рядами.

Мы обратили внимание на три работы — (Xu et al., 2023); Yang et al., 2019; Yang et al., 2013), в которых авторы применили принципиально иной подход к изучению проблемы волнового эффекта, а именно метод причинного открытия в рамках концепции причинного вывода. Основной мотив для развития этого подхода основан на фразе «корреляция — это не обязательно причина», которую очень часто используют апологеты причинного вывода, аргументируя его актуальность и, по сути, ставя под сомнение достаточность чувствительности и специфичности классических статистических методов. Хотя истина о том, что корреляция не подразумевает причинно-следственную связь, остается верной, ключевая идея следует принципу общей причины Райхенбаха: если переменные зависимы, то они либо являются причинными друг для друга (в любом направлении), либо управляются общей движущей силой (конфаундеры). В отмеченных работах применен метод причинного графа (DAG). Метод DAG (Spirtes et al., 1991) является недавним достижением в анализе причинно-следственных связей. Основная идея DAG основана на оценке условной независимости данных в отличие от причинности Грейнджера, который работает с использованием прогнозирования. Хотя современные продвинутое модификации метода Грейнджера переросли первые линейные модели авторегрессии и работают со сложными нелинейными моделями, в том числе лаг-специфическая версия причинности Грейнджера или трансфер энтропии, в них, тем не менее, остаются его врожденные недостатки: образование ложных связей в случаях, когда частота серии реже воздействия причинного процесса (агрегация и субсэмплирование), неспособность обработать скрытые конфаундеры (Runge J., 2018), невозможность учета синхронных (в пределах одного лага) причинно-следственных связей (Glymour et al., 2019), а также неспособность различать прямые и не прямые связи (Spirtes & Zhang, 2016). DAG в упомянутых работах автоматически строится из обсервационных наблюдений на основе алгоритма PC (Spirtes & Glymour, 1991), который является фактически вершиной в теперь уже многоуровневом эволюционном дереве методов открытия причин. Проблема алгоритма PC при изучении волнового эффекта в том, что он в своей

первозданной версии не разрабатывался для работы с временными рядами, и авторы упомянутых работ были вынуждены применять его к значениям временного ряда как к статическим величинам, упуская динамическую компоненту. Более того, для получения хороших тестов условной независимости может потребоваться очень большой размер выборки, что уменьшает производительность РС на коротких сериях (Glymour et al., 2019).

Несмотря на ныне господствующее мнение о существовании межрегионального волнового эффекта недвижимости, остается традиционная более консервативная точка зрения о том, что цены на региональном рынке жилья в значительной степени определяются местными условиями и отделены от влияния других региональных рынков жилья. (Miao et al., 2011; Piazzesi et al., 2015; Kuchler et al., 2022) утверждают, что рынок жилья США определяется такими факторами, как различия в пространственной динамике цен, местных доходах, демографии и других локальных характеристиках, которые потенциально препятствуют межгородскому взаимодействию.

Исследовательский вопрос настоящей работы: существует ли основание для включения компоненты межрегионального взаимодействия в модель регионального ценообразования жилой недвижимости в РФ?

Настоящая работа имеет намерение внести вклад в существующую литературу по тематике волнового эффекта на региональных рынках недвижимости следующим образом:

1. Провести исследование волнового эффекта в отношении не затронутого такими исследованиями рынка жилой недвижимости РФ, заполнив имеющуюся нишу и выявив потенциальные каналы передачи ценовой информации и взаимовлияния между регионами.
2. При проведении исследования развить подход (Xu et al, 2023; Yang et al., 2021; Yang et al., 2013) применительно к выявлению волнового эффекта, используя линейку более совершенных методов открытия причины в динамических системах с учетом одновременных эффектов (снять «проклятие» синхронности), латентных конфаундеров и датасетов реальных данных коротких серий.

3. Получить дополнительный аргумент в пользу одной из конкурирующих концепций о составе факторов, определяющих цену недвижимости: входят ли в их число только эндогенные (локальные для регионального рынка) параметры или же они дополняются экзогенными (межрегиональными) детерминантами.

Теоретические предпосылки

Теория причинного открытия излагает предположения, при которых основные причинные зависимости могут быть выведены из данных наблюдений без дополнительного проведения экспериментальных вмешательств (например, А/Б тесты). Динамическое открытие причины можно определить следующим образом. Имея датасет X , содержащий N наблюдаемых непрерывных временных рядов длины T , ставится цель открыть причинно-следственные связи между всеми N сериями в X и временные лаги между причиной и эффектами и смоделировать их во временном причинном графе. В направленном причинном графе $G = (V, E)$ вершина $v_i \in V$ представляет наблюдаемый временной ряд X_i , а каждое направленное ребро $e_{ij} \in E$ из вершины v_i к вершине v_j обозначает причинную связь, где временной ряд X_i вызывает эффект X_j . Кроме того, обозначим $p = \langle v_i, \dots, v_j \rangle$ путь в G от v_i к v_j . Во временном причинном графе каждое ребро e_{ij} аннотируется весом $d(e_{ij})$, который обозначает временной лаг между возникновением причины X_i и возникновением эффекта X_j . Пример такого представления из многомерного наблюдаемого временного ряда во временной причинный граф представлен на рисунке 1 панель А.

Метод для исследования должен удовлетворять ряду основных требований. Во-первых, распознавать прямые и не прямые причины. Вершина v_i рассматривается как не прямая причина v_j , если e_{ij} не принадлежит G и если существует путь из двух ребер $p = \langle v_i, v_k, v_j \rangle$, принадлежащий G (рис. 1, панель Б). Попарные методы (например, метод Грейнджера и алгоритм FullIC), то есть методы, которые ищут причинные связи только между двумя переменными часто не способны провести такое разделение и принимают не прямые пути за причинные связи вместо того, чтобы интерпретировать их как ложные связи и не включать в реконструируемый граф. Во-вторых, метод

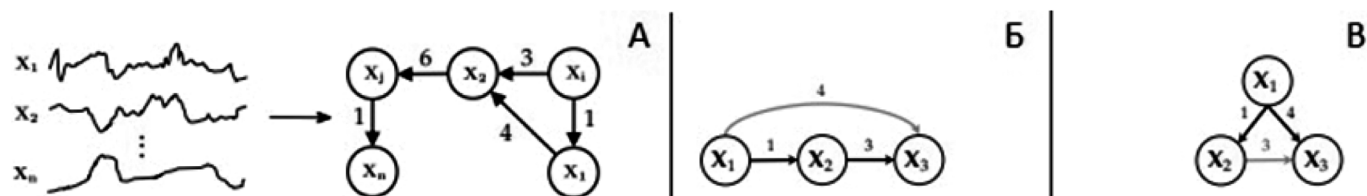


Рис. 1. Панель А. Временной причинный граф, реконструированный из многомерного наблюдаемого временного ряда; Панель Б. Прямая и не прямая ложная (серая) связь; Панель В. Ложная связь (серая) вследствие общей причины — конфаундера

Источник: составлено авторами на основе (Nauta et al., 2019)

должен изучать синхронные причинные следствия, где задержка между причиной и следствием составляет 0 временных шагов. Пренебрежение синхронными влияниями может привести к ошибочным интерпретациям. На практике синхронные эффекты чаще всего возникают, когда причина и следствие относятся к одному и тому же временному шагу, который не может быть причинно упорядочен априори из-за слишком грубой временной шкалы. В-третьих, конфаундер является хорошо известной проблемой для методов обнаружения причин (рис. 1, панель В). Хотя конфаундеры довольно распространены в реальных ситуациях, они усложняют обнаружение причин, поскольку их эффекты (X_2 и X_3 на рис. 1, панель В) коррелируют, но не связаны причинно-следственной связью. Особенно, когда задержки между конфаундером и его эффектами не равны, следует проявлять осторожность, чтобы ошибочно не включить причинно-следственную связь между эффектами конфаундера. Особая проблема возникает, когда конфаундер не наблюдается (скрытый или латентный). Хотя может быть даже неизвестно, сколько существует скрытых конфаундеров, важно, чтобы метод причинного обнаружения мог выдвигать гипотезу об их существовании, чтобы предотвратить изучение ложной причинной связи между его эффектами. Выполнение вышеперечисленных критериев устраняет ложные связи, механизмы образования которых подробно изложены в (Runge, J., 2018). Для иллюстрации на рисунке 2 панель А представлены ложные связи, выявленные методом открытия

причин, основанными на корреляциях (слева), и их отсутствие при реконструкции алгоритмом РСМСИ (справа). На рисунке 2 панелях Б, В приведены эффекты в виде образования ложных связей в ответ на нераспознанный латентный конфаундер.

Что касается неспособности обработки алгоритмом синхронных причин и следствий, это проявляется характерным паттерном образования в графе двунаправленных связей (\leftrightarrow) или ненаправленных причинных связей (\rightarrow), что вносит неопределенность и невозможность интерпретации, указывая на сомнительность их существования (Runge, J., 2018).

В таблице 1 приведены формальные определения алгоритмов, разработанных для преодоления ограничений метода Грейнджера и РС.

Метод и данные

Следуя за (Yang et al., 2019), для нашего эмпирического исследования были выбраны региональные рынки жилой недвижимости регионов, входящие в состав Уральского федерального округа (УрФО) — крупного экономического центра РФ со значительным финансово-промышленным, логистическим и экспортным потенциалом. Дополнительно в состав региональных рынков были включены рынки города Москвы и Новосибирской области для выявления и прослеживания возможных

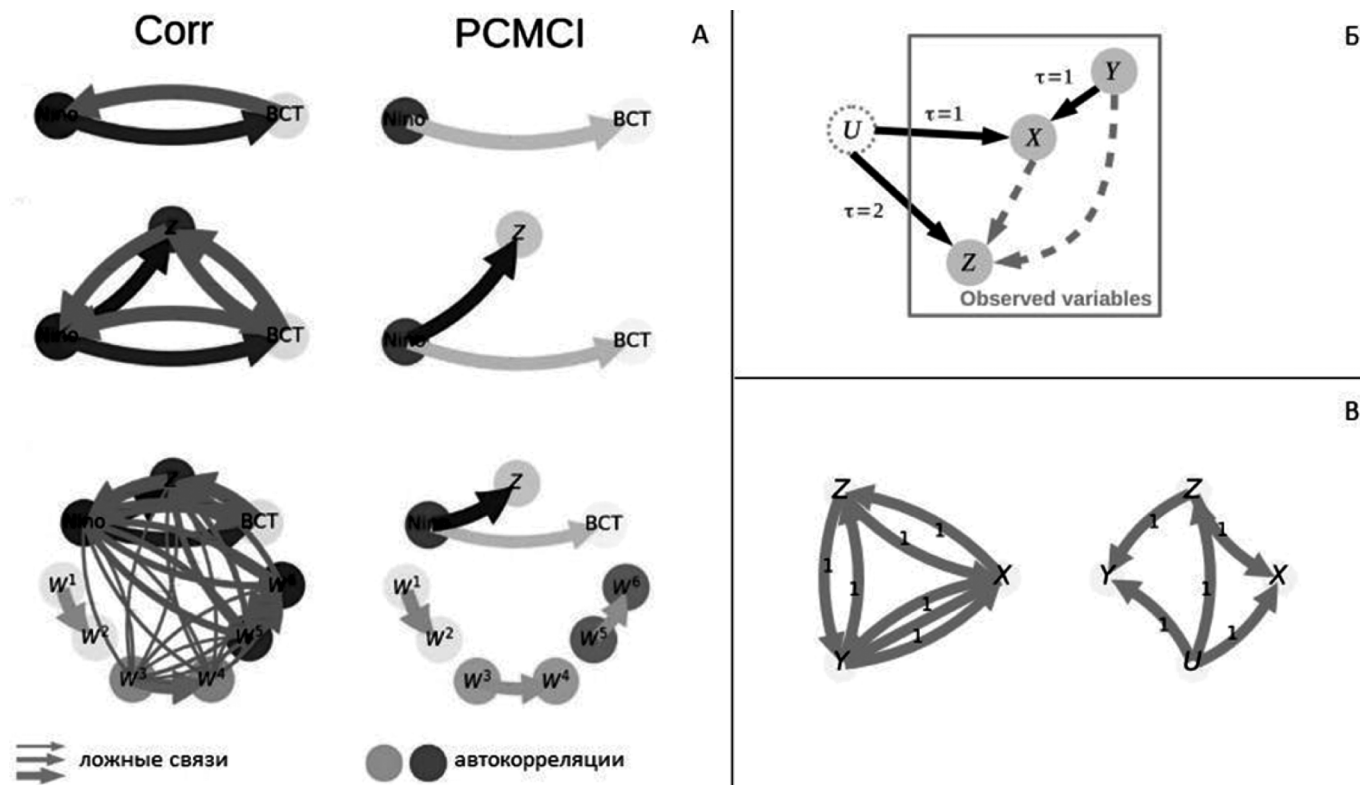


Рис. 2. Примеры образования ложных связей. «U» обозначен латентный конфаундер
Источник: составлено авторами на основе (Runge, J., 2018)

Таблица 1.

Сводка алгоритмов открытия причин во временных рядах

Алгоритм	Формальное определение	Пояснение
Грейнджер	$Y_t \text{ corr } X_{\text{past}(t)} Y_{\text{past}(t)}$ (Granger, 1969)	X причина Y, когда предсказание Y на основе его прошлого улучшается за счет учета прошлого X; тогда Y должен зависеть от прошлого X, учитывая его собственное прошлое
FullIC	$X_{t-\tau} \perp\!\!\!\perp X_t X_{t-\tau}^-, \tau > 0$ (Runge, J., 2018)	проверяет отсутствие связи $X_{t-\tau}^+$ и X_t путем проверки их независимости с учетом прошлого всех других переменных; развитие Грейнджера
PC MCI	$X_{t-\tau}^+ \perp\!\!\!\perp X_t [\text{pa}(X_t) \setminus \{X_{t-\tau}^+\}, \text{pa}(X_{t-\tau}^+)]$, $\tau > 0$ (Runge et al., 2019)	дополнительно к РС проверяет отсутствие связи $X_{t-\tau}^+$ и X_t путем проверки их независимости с учетом прошлого родителей; РС для серий
PC MCI+	$X_{t-\tau}^+ \perp\!\!\!\perp X_t [\text{pa}(X_t) \setminus \{X_{t-\tau}^+\}, \text{pa}(X_{t-\tau}^+)]$, $\tau \geq 0$ (Runge et al., 2019)	РС MCI с $\tau \geq 0$; РС MCI для синхронных событий
LPCMCI	$X_{t-\tau}^+ \perp\!\!\!\perp X_t S \rightarrow X_{t-\tau}^+ \perp\!\!\!\perp X_t S \cup S_{\text{def}}(X_{t-\tau}^+ - \tau, X_t)$ (Gerhardus et al., 2021)	РС MCI+ для латентных конфаундеров
TCDF	Архитектура динамической сверточной нейронной сети с расширенными и разделяемыми по глубине свертками, основанная на механизме внимания (Nauta et al., 2019)	работает с латентными конфаундерами с равными лагами, с синхронными причинами и следствиями

Источник: составлено авторами

пространственно экзогенных связей регионов УрФО. В исследовании используются открытые данные Росстата квартального индекса первичной недвижимости из 8 регионов за период с 2000 (квартал 1) по 2023 (квартал 4). Размер серии 96 наблюдений. Временной ряд имеет выраженный восходящий тренд. По трем регионам («крг», «янао», «тюм») выявлены пропуски данных. Учитывая, что ряд алгоритмов чувствительны к отсутствию данных, было сформировано два датасета: 1) 8х96 с пропущенными данными; 2) 5х96 с полными данными, в котором вместо отдельных серий по Тюменской области, ЯНАО,

ХМАО взят агрегированный индекс по этому образованию и исключена Курганская область. После детрендинга (фильтр Hodrick-Prescott), десезонинга (сглаживание с окном 4 квартала=1 год) и нормализации (метод minmax) вид серий представлен на рисунке 3, панель А. На рисунке 3 панель Б представлена серия по городу Москва с выделенным трендом, сезонностью. Устранение сезонности и тренда для нестационарных временных рядов важно в методах обнаружения причинно-следственных связей (Granger, 1969; Entner and Hoyer, 2010; Peters et al., 2012; Runge et al., 2019) для устранения

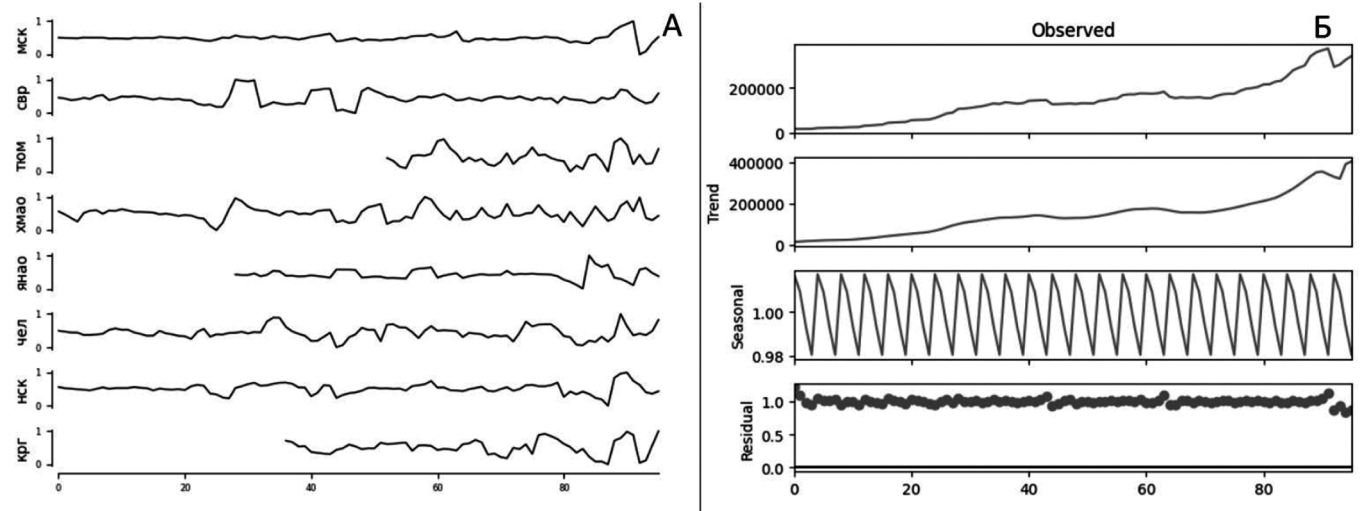


Рис. 3. Панель А. Временные ряды датасета 8х96 после препроцессинга. Панель Б. Декомпозиция временного ряда переменной «мск» на компоненты «тренд», «сезонность», «ошибки»

Источник: расчеты и визуализация авторов на основе данных Федеральной службы государственной статистики, статистических отчетов «Регионы России. Социально-экономические показатели» и Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС), <https://www.fedstat.ru/indicator/31452> (дата обращения: 12 марта 2024 г.)

нестационарности, а также для исключения общей причины изменений. Стационарность трансформированного временного ряда была подтверждена тестом ADF.

Выберем подход, который бы преодолевал недостатки методики причинного открытия Грейнджера, учитывал статистические особенности многомерных временных рядов исследуемого датасета, а также реконструировал причинно-следственные связи наблюдаемых явлений лучше, чем это делал алгоритм РС. В таблице 2 представлена классификация алгоритмов, в том числе и развивающих базовый алгоритм РС.

Таблица 2.

Методы открытия причин для временных рядов

Свойства алгоритмов	Грейнджер	FullIC	PCMCi	PCMCi+	LPCMCi	TCDF
Толерантность к пропущенным значениям серии	–	+	+	+	+	–
Синхронные причины	–	–	–	+	+	+
Распознавание прямых и непрямых причин	–	–	+	+	+	+
Скрытые конфаундеры	–	–	–	–	+	+
Нестационарные серии	–	–	–	–	–	+
Короткие серии	+	+	–*	–*	–*	+

* — повысить производительность семейства РС-образных алгоритмов на коротких сериях возможно применением технологии бутстрэппинга

Источник: составлено авторами на основе (Nauta et al., 2019)

Алгоритмы выполнялись с помощью фреймворка Tigramite (Runge, J., Gerhardus, A., Varando, G. et al., 2023) и TCDF (Nauta et al., 2019), оба имеют статус Open Source.

Из таблицы 2 видно, что наиболее перспективными методами для причинного открытия на датасетах реального мира являются методы LPCMCi и TCDF, функционал которых может справляться с синхронностью, диагностировать скрытые конфаундеры, а при запуске бутстрэппинга получать удовлетворительные результаты на коротких сериях. Проблема пропущенных значений для алгоритма TCDF решается его применением на датасете 5x96, тогда как все остальные эксперименты проведены на датасете 8x96. После препроцессинга обеспечена стационарность серии для работоспособности РС-образных алгоритмов. Больше для сравнительных

целей мы дополнительно к LPCMCi и TCDF проводим несколько экспериментов с применением более ранних алгоритмов. Для улучшения производительности РС-образных алгоритмов на серии из 96 наблюдений (короткая серия) была применена технология бутстрэппинга с циклом 200, что является минимально рекомендуемым значением авторами. При этом работа алгоритмов в среде Google Collaboratory продолжалась 5 мин 53 сек для PCMCi, 7 мин 35 сек — для PCMCi+, 13 мин 22 сек — для LPCMCi. Для РС-образных алгоритмов глубина анализа была установлена на отметке 5 лагов. Алгоритм TCDF по умолчанию работает до 3 лагов.

Результаты и обсуждение

Результатом работы примененных алгоритмов стали причинные графы, реконструированные на базе наблюдационных временных рядов квартальных индексов цен первичной жилой недвижимости в следующих регионах: город Москва («мск»), Свердловская область («свр»), Челябинская область («чел»), Тюменская область («тюм»), ЯНАО («янао»), ХМАО («хмао»), Курганская область («кр»), Новосибирская область («нск»). Сгенерированные причинные графы каждым из примененных алгоритмов представлены на рисунке 4. На панелях А, Б, В, Г рисунка 4 легенда представляет либо силу автокорреляции вершины (auto-<алгоритм> — тон круга) либо силу причинной связи между вершинами (<алгоритм> — тон ребра). Цифра на стрелках обозначают разницу между лагами причины и следствия. На рисунке 4 панель Д направленная дуга от вершины «мск» обозначает автокорреляцию.

Основным результатом можно считать, что не обнаружены свидетельства наличия межрегиональных причинных связей между квартальными индексами цен жилой первичной недвижимости в исследуемых регионах, что выявлено наиболее продвинутыми алгоритмами динамического причинного открытия LPCMCi и TCDF (рис. 4 панели Г, Д). LPCMCi уловил лишь автокорреляцию цен Челябинской области, а TCDF — автокорреляцию цен города Москвы. Повторяемость этого результата на двух самых совершенных алгоритмах придает больше уверенности в его достоверности.

Обращает на себя внимание то, что с усложнением и большей функциональностью алгоритма уменьшается число выявленных им причинных связей: от максимального на Грейнджерообразном алгоритме FullIC до их отсутствия на LPCMCi и TCDF.

В то же время анализ конфигурации причинных связей, реконструируемых FullIC, обнаруживает паттерны, характерные для образования ложных связей. Например, между вершинами «янао» и «чел» образован цикл из положительной связи и отрицательной связи (рис. 4

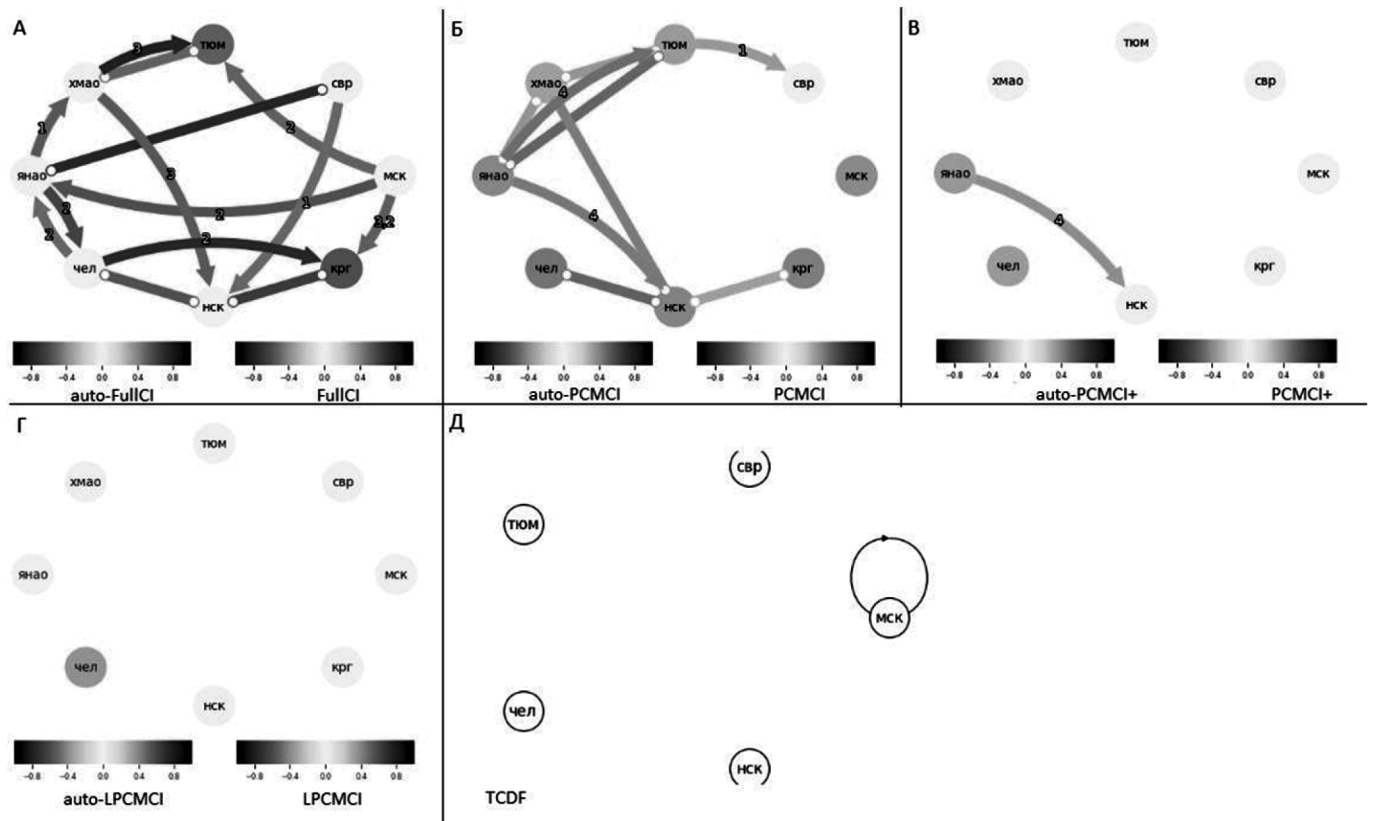


Рис. 4. Панель А. FullCI; Панель Б. PCMCi; Панель В. PCMCi+; Панель Г. LPCMCi; Панель Д. TCDF

Источник: расчеты и визуализация авторов на основе данных Федеральной службы государственной статистики, статистических отчетов «Регионы России. Социально-экономические показатели» и Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС), <https://www.fedstat.ru/indicator/31452> (дата обращения: 12 марта 2024 г.)

панель А). Обилие ненаправленных связей в результате работы алгоритмов FullCI и PCMCi указывает на некорректную обработку синхронных причин и следствий (рис. 4 панель А, Б). Алгоритм PCMCi+ корректно обрабатывает синхронные причинно-следственные связи, поэтому реконструируемый им граф не содержит таких паттернов. Единственная направленная связь от «янао» к «нск», скорее всего, тоже является ложной и возникшей в связи с его неспособностью распознавать скрытые конфаундеры (рис.4 панель В).

Проведя исследование, нами получены неожиданные и несовпадающие с мейнстримом результаты. Учитывая географически-уникальные особенности, уровень цифровизации нашей страны, можно было бы ожидать получения смещенных данных нового национального варианта проявления волнового эффекта, что обогатит и обобщит знания по данной тематике в целом. Однако полученные результаты таковы, что ожидаемое «смещение» проявилось полным отсутствием эффекта. Конечно, наши результаты не могут претендовать на новизну, поскольку, как отмечалось выше, давно существует и не стирается со временем альтернативная точка зрения о незначимости межрегиональных взаимодействий на ценообразование жилья. Поэтому наша работа толь-

ко добавляет еще один аргумент в пользу критиков теории волнового эффекта.

Мы рассмотрели более подробно интерпретации авторов работ, которые, изучив движение цен на региональных рынках, не получили свидетельств наличия волнового эффекта на своих датасетах. Так, (Blake & Gharleghi, 2017) считают, что для возникновения более заметного волнового эффекта на пригороды в первую очередь требуется сокращение количества источников спроса и географической области, на которую может распространиться спрос. (Gholipour & Lean, 2017) утверждают, что иранское исследование не добились доказательств существования волнового эффекта цен на жилье из-за не транспарентности рынка недвижимости в этой стране в отличие от стран с развитой и открытой экономикой, в том числе велики затраты на трансфер рыночной информации между регионами, отсутствуют единые законодательные нормы и обеспечительные меры по их соблюдению. (Shi et al., 2009) обнаружили, что волновой эффект наиболее вероятен между локальными рынками в пределах одного региона и есть немного свидетельств, что он распространяется по всей стране между региональными центрами. Они рассматривают свой результат как дополнительное подтверждение мнения (Meen,

1999) о том, что волновой эффект будет вызван скорее внутренними экономическими факторами региона, чем миграцией или пространственным арбитражем. (Tsai, 2018) нашел, что цены на жилье в еврозоне имеют тенденцию к конвергенции по сравнению со странами вне еврозоны за счет единой валюты, по сути, придавая этому фактору большую значимость, чем наличие эффекта заражения.

Как видно, в трех работах из четырех авторы не сомневаются в наличии волнового эффекта в целом, но приводят доводы, почему они не смогли его обнаружить в их контексте исследования. Из чего делаем вывод о том, что никто из них не подвергает сомнению методы анализа, которые показывают результаты в пользу наличия волнового эффекта. Наша же версия сомнения в существовании волнового эффекта состоит в том, что большинство его исследователей, за счет применяемых методов, обнаружили в большей части корреляционные связи, приняв их за причинные, которые на самом деле являются ложными. Безусловно, их добросовестное заблуждение вызвано объективными обстоятельствами — во время их работ концепция причинного вывода еще только зарождалась и не имела широкого применения в научно-практических исследованиях. Однако в настоящее время методика открытия причины становится рутинной академической практикой, и игнорировать ее исследовательский потенциал представляется неальтернативным.

Применение в нашей работе линейки причинных методов наглядно показало зависимость сети DAG от применяемого метода: чем более продвинутый алгоритм открытия причины применяется, тем меньше причинных связей он смог реконструировать. Так, причинный граф, построенный методами, основанными на корреляции, представляет из себя картину связи «всего со всем» (см. рис.2 панель А).

Новизна нашей работы состоит в первом известном нам случае применения продвинутых методов открытия причин во временных рядах к проблеме волнового эффекта рыночной информации между региональными рынками недвижимости.

Результаты работы могут оказаться полезными для политиков и регуляторов, для инвесторов и девелоперов, для научного сообщества, в том числе для понимания степени интеграции рынка недвижимости для разработки мер макроэкономического и регионального регулирования, независимости рисков и возможностей рынков разных регионов, что важно для диверсификации инвестиционных портфелей, задания методологической планки для будущих исследований.

К слабостям нашей работы можно отнести следующее. Во-первых, в первую очередь нам было интересно

проследить движение рыночной информации между региональными рынками первичной жилой недвижимости, отвечая на запрос девелоперов. Однако полная картина состояла бы в учете не только первичного жилья, но и рынка вторичной недвижимости. Добавление этого сектора способно повлиять на конфигурацию причинных связей между региональными рынками и может стать предметом будущих исследований. Во-вторых, выбор ограниченного числа региональных рынков лишил нас возможности изучения формирования клубов конвергенции на рынке жилой недвижимости РФ. Практика проведения подобных исследований предполагает включение не выборочного, а полного состава субъектов национального рынка. Факт наличия кластеров на рынке недвижимости рассматривается исследователями как дополнительное свидетельство существования волнового эффекта и, более того, как основной механизм реализации конвергенции. В-третьих, у нас имеются некоторые сомнения в том, что в эпоху усиленной цифровизации квартальная дискретизация временного ряда достаточна для корректного выявления всех процессов, происходящих в межрегиональном движении рыночной информации. В настоящее время появляются исследования с посуточными сериями, улавливающие в них диффузионные явления (Yang et al., 2021). И есть опасение, что квартальные цены могут оказаться гораздо реже реальных причинных процессов, следствием чего может возникнуть явление субсэмплирования, искажающее верную картину причинной динамики. В-четвертых, мы, конечно, не разделяем мнения (Gholipour & Lean, 2017) о не транспарентности рынка как о причине отсутствия волнового эффекта в отношении региональных секторов недвижимости РФ, однако после проведения нашего исследования следует признать, что убедительных доказательств против этого суждения мы не получили. И, наконец, в-пятых, не столько наше упущение, сколько пока недостаточный уровень развитости концепции открытия причин еще не успевшей выработать надежных метрик валидации методов реконструкции причинных графов не позволяет исследователям быть вполне уверенными в получаемых результатах.

Выводы

После проведения исследования мы не смогли подтвердить роли волнового эффекта в ценообразовании на региональных рынках РФ. Из этого следует, что определяющими факторами региональных цен жилой недвижимости остаются локальные эндогенные причины, но не внешнее влияние межрегиональных каналов передачи рыночной информации. Результат нашего исследования поддерживает точку зрения классической экономической теории, согласно которой региональным ценам нет причин меняться согласованно, так как предполагается, что цены жилья на региональных рынках зависят лишь от соотношения спроса/предложения,

которое может существенно различаться от региона к региону в силу различий в региональной экономике и демографии. Экономическими причинами существования волнового эффекта между региональной недвижимостью большинство исследователей склонны считать миграцию, межрегиональные трансферы капиталов, географический арбитраж. Остается думать, что в РФ масштаб подобных явлений не оказывает значимого эффекта на корректировку цен региональной недвижимости, определяемых лишь фундаментальными факторами. Следовательно, отсутствует основание для включения компоненты межрегиональной рыночной информации в модель регионального ценообразования жилой недвижимости.

В своей работе мы опробовали применение продвинутых объективных методов открытия причины на об-

сервационных временных рядах для изучения проблематики волнового эффекта на региональных рынках недвижимости. Высказана гипотеза, что большинство его предшествующих исследователей, за счет применяемых методов, обнаруживали в большей части корреляционные межрегиональные связи, принимая их за причинные, которые на самом деле являются ложными. Дано предложение о более активном внедрении в исследовательскую практику в целом достижений концепции причинного вывода, в том числе методов открытия причины, которые демонстрируют лучшие показатели чувствительности и специфичности по сравнению с традиционными. Будущим исследователям волнового эффекта стоит обратить внимание на слабости настоящего исследования и идти по пути их преодоления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Blake & Behrooz Gharleghi, 2017. «The Ripple Effect at an inter-suburban level in the Sydney Metropolitan area,» *International Journal of Housing Markets and Analysis*, Emerald Group Publishing Limited, vol. 11(1), pages 2–33, November.
2. Blatt Kausik Chaudhuri & Hans Manner (2023) A changepoint analysis of UK house price spillovers, *Regional Studies*, 57:7, 1223-1238, DOI: 10.1080/00343404.2022.2120977.
3. Entner D., Hoyer P.O. (2010). "On Causal Discovery from Time Series Data Using FCI," in *Proceedings of the Fifth European Workshop on Probabilistic Graphical Models*, Helsinki, Finland. Editors Myllymaeki P., Roos T., Jaakkola T. (HIIT Publications, 2010;), 121–128.
4. Gerhardus and J. Runge, "High-recall causal discovery for autocorrelated time series with latent confounders," *arXiv:2007.01884 [cs, stat]*, Feb. 2021, *arXiv: 2007.01884*. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2007.01884>.
5. Gholipour H.F. & Lean H.H. (2017) Ripple effect in regional housing and land markets in Iran: Implications for portfolio diversification, *International Journal of Strategic Property Management*, 21, pp. 331–345.
6. Glymour C., Zhang K. and Spirtes P. (2019) Review of Causal Discovery Methods Based on Graphical Models. *Front. Genet.* 10:524. doi: 10.3389/fgene.2019.00524.
7. Granger C.W.J. (1969). Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-Spectral Methods. *Econometrica* 37, 424–438. 10.2307/1912791.
8. Hu J., Xiong X., Cai Y., Yuan F. The Ripple Effect and Spatiotemporal Dynamics of Intra-Urban Housing Prices at the Submarket Level in Shanghai, China. *Sustainability*. 2020; 12(12):5073. <https://doi.org/10.3390/su12125073>.
9. Hu M.; Liang H. A copula approach to assessing Granger causality. *NeuroImage* 2014, 100, 125–134.
10. Huang Y., Kleinberg S. Fast and Accurate Causal Inference from Time Series Data. In *Proceedings of the FLAIRS Conference*, Hollywood, FL, USA, 18–20 May 2015; pp. 49–54.
11. Kuchler & Monika Piazzesi & Johannes Stroebel, 2022. «Housing Market Expectations,» *CESifo Working Paper Series 9665*, CESifo.
12. Meen G. (1999). Regional house prices and the ripple effect: A new interpretation. *Housing Studies*, 14(6), 733–753.
13. Miao Hong; Sanjay Ramchander and Marc W. Simpson. 2011. «Return and Volatility Transmission in U.S. Housing Markets.» *Real Estate Economics*, 39(4), 701–41.
14. Nauta M., Bucur D., & Seifert C. (2019). Causal Discovery with Attention-Based Convolutional Neural Networks. *Mach. Learn. Knowl. Extr.*, 1, 312–340.
15. Papan A., Kyrtosou C., Kugiumtzis D., Diks C. Detecting causality in non-stationary time series using partial symbolic transfer entropy: Evidence in financial data. *Comput. Econ.* 2016, 47, 341–365.
16. Peters J., Janzing D., Schölkopf B. (2012). Causal Inference on Time Series Using Structural Equation Models. *arXiv preprint*. *arXiv:1207.5136*.
17. Piazzesi Monika; Martin Schneider and Johannes Stroebel. 2015. «Segmented Housing Search.» *NBER Working Paper*, No. 20823.
18. Ranjbar Hassan F. Gholipour Behnaz Saboori & Tsangyao Chang (2022) Tehran's house price ripple effects in Iran: application of bootstrap asymmetric panel granger non-causality in the frequency domain, *Housing Studies*, 37:9, 1566–1597, DOI: 10.1080/02673037.2020.1853072.
19. Runge J., Sejdinovic D., Flaxman S. Detecting causal associations in large nonlinear time series datasets. *arXiv 2017*, *arXiv:1702.07007*.
20. Runge J. (2018). Causal network reconstruction from time series: From theoretical assumptions to practical estimation. *Chaos*, 28 7, 075310.
21. Runge J., Nowack P., Kretschmer M., Flaxman S., Sejdinovic D. (2019). Detecting and Quantifying Causal Associations in Large Nonlinear Time Series Datasets. *Sci. Adv.* 5, eaau4996. 10.1126/sciadv. aau4996.
22. Runge J., Gerhardus A., Varando G. et al. Causal inference for time series. *Nat Rev Earth Environ* (2023). <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00431-y>.
23. Shi S., Young M. & Hargreaves B. (2009) The ripple effect of local house price movements in New Zealand, *Journal of Property Research*, 26, pp. 1–24.
24. Spirtes P. & Glymour C. An algorithm for fast recovery of sparse causal graphs. *Soc. Sci. Comput. Rev.* 9, 62–72 (1991).
25. Spirtes P. & Zhang K. Causal discovery and inference: concepts and recent methodological advances. *Appl. Inform.* 3, 3 (2016).
26. Tsai I.C. (2018) House price convergence in euro zone and non-euro zone countries, *Economic Systems*, 42, pp. 269–281.
27. Xu X. and Zhang Y. (2023), «Contemporaneous causality among residential housing prices of ten major Chinese cities», *International Journal of Housing Markets and Analysis*, Vol. 16 No. 4, pp. 792–811. <https://doi.org/10.1108/IJHMA-03-2022-0039>.
28. Yang Huawei Liu & David J. Leatham (2013) The multi-market analysis of a housing price transmission model, *Applied Economics*, 45:27, 3810–3819, DOI: 10.1080/00036846.2012.734595.
29. Yang Jian and Tong Meng and Yu, Ziliang, *Housing Market Spillovers through the Lens of Transaction Volume: A New Spillover Index Approach* (October 1, 2019). *Journal of Empirical Finance*, Vol. 64, 2021, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4190148>.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАТРАТ НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ

OPTIMIZING THE COST OF COMPUTING RESOURCES

N. Muntian

Summary. In the era of digital transformation, the exponential growth of cloud infrastructure costs has become one of the key challenges for modern technology platforms. Naive approaches to allocating computing resources based on peak loads are fundamentally flawed and lead to enormous financial losses. Effective cost management requires a deep synthesis of technical optimization strategies and a granular understanding of the key business processes that this infrastructure serves. This article approves and demonstrates the framework for such synthesis, illustrating the application of cost-saving methodologies in AWS using the example of a real case of a highly loaded service.

Keywords: cost of computing resources, efficient management, financial losses.

Мунтян Никита Валерьевич

Российский государственный социальный университет,
Россия, г. Москва
nikita.muntian@icloud.com

Аннотация. В эпоху цифровой трансформации экспоненциальный рост затрат на облачную инфраструктуру стал одной из ключевых проблем для современных технологических платформ. Наивные подходы к выделению вычислительных ресурсов, основанные на пиковых нагрузках, являются фундаментально ошибочными и ведут к колоссальным финансовым потерям. Эффективное управление затратами требует глубокого синтеза технических стратегий оптимизации и гранулярного понимания ключевых бизнес-процессов, которые эта инфраструктура обслуживает. Данная статья утверждает и демонстрирует фреймворк для такого синтеза, иллюстрируя применение методологий экономии средств в AWS на примере реального кейса высоконагруженного сервиса.

Ключевые слова: затраты на вычислительные ресурсы, эффективное управление, финансовые потери.

1. Теоретический базис и ключевые концепции облачной инфраструктуры AWS

Прежде чем приступать к анализу тактик оптимизации, критически важно сформировать фундаментальное понимание архитектурных принципов, лежащих в основе гипермасштабируемых облачных платформ, таких как Amazon Web Services (AWS). Неспособность усвоить эти базовые концепции неизбежно приводит к созданию субоптимальных и экономически неэффективных инфраструктурных решений.

Фундаментальные принципы облачных вычислений — эластичность, масштабируемость и модель оплаты по мере использования (pay-as-you-go) — представляют собой парадигмальный сдвиг по сравнению с устаревшей моделью локальной инфраструктуры (on-premise). Эта новая парадигма не только обеспечивает превосходство в архитектурной гибкости, но и вносит существенные сложности в финансовое планирование, требуя от инженеров и архитекторов компетенций в области финансового менеджмента.

В текущих реалиях AWS является отраслевым стандартом для развертывания масштабируемых приложений. Глубокое владение сервисами этой платформы перестало быть факультативным преимуществом и стало базовым требованием для любого компетентного архитектора решений. Освоение фундаментальных концепций закономерно подводит нас к необходимости из-

учения более продвинутых методов финансового и операционного контроля.

2. Стратегии и методы управления затратами на вычислительные ресурсы AWS

Несмотря на то, что AWS предоставляет чрезвычайно мощный инструментарий для построения инфраструктуры, по умолчанию эти инструменты агностичны к вопросам экономической эффективности. Проактивное управление затратами, известное как дисциплина FinOps, должно быть заложено в архитектуру системы с самого начала, а не применяться ретроспективно в качестве запоздалой меры.

2.1. Динамическое масштабирование с AWS Auto Scaling

AWS Auto Scaling представляет собой механизм автоматической корректировки вычислительных мощностей в ответ на изменения рабочей нагрузки. Данный сервис является первой и основной линией защиты как от избыточного выделения ресурсов (что ведет к прямым финансовым потерям), так и от их недостатка (что приводит к деградации производительности и ухудшению пользовательского опыта). Правильно настроенные политики Auto Scaling позволяют системе эластично реагировать на колебания трафика, поддерживая оптимальный баланс между стоимостью и производительностью согласно официальной документации AWS по Auto Scaling

[<https://docs.aws.amazon.com/autoscaling/ec2/userguide/what-is-amazon-ec2-auto-scaling.html>, с. 1].

2.2. Оптимизация затрат через модели закупки: Reserved и Spot Instances

AWS предлагает различные модели ценообразования для своих вычислительных ресурсов (EC2), и их стратегическое использование является краеугольным камнем оптимизации затрат.

- Reserved Instances (RI) предлагают значительную скидку в обмен на обязательство использовать определенный объем вычислительных мощностей в течение одного или трех лет. Этот инструмент идеально подходит для предсказуемых, постоянных рабочих нагрузок, составляющих базовый уровень потребления системы. Экономическая модель здесь проста: долгосрочное обязательство в обмен на снижение почасовой ставки.
- Spot Instances позволяют использовать свободные вычислительные мощности EC2 со скидкой до 90 % от цены по запросу. Однако основной компромисс заключается в том, что AWS может прервать работу такого инстанса в любой момент с уведомлением за две минуты. Следовательно, Spot Instances подходят исключительно для отказоустойчивых, прерываемых рабочих нагрузок, таких как пакетная обработка данных, задачи рендеринга или фоновые аналитические вычисления. Их использование требует более сложной архитектуры приложения, способной выдерживать внезапные прерывания согласно официальной документации по моделям ценообразования AWS. [<https://aws.amazon.com/ec2/pricing/>, с. 2].

Эффективная реализация этих стратегий немыслима без внедрения надежных систем мониторинга и аналитики, позволяющих принимать решения на основе данных.

3. Инструментарий для мониторинга и анализа затрат

Принцип «нельзя оптимизировать то, что нельзя измерить» является фундаментальной аксиомой дисциплины FinOps. Для получения полного представления о потреблении ресурсов и распределении затрат необходимо освоить нативные инструменты AWS, предназначенные для этой цели.

AWS CloudWatch — это основной сервис мониторинга и наблюдаемости в экосистеме AWS. Он собирает метрики производительности, логи и события со всех ресурсов. Эти данные служат фундаментальной основой для настройки интеллектуальных политик Auto Scaling, создания оповещений о производительности и выявле-

ния аномалий в работе приложений. Без данных, предоставляемых CloudWatch, любое масштабирование было бы слепым и неэффективным.

AWS Cost Explorer выступает в роли главного инструмента финансового анализа. Он предоставляет интуитивно понятный интерфейс для визуализации исторических и текущих затрат, прогнозирования будущих расходов и детализации потребления по сервисам, тегам или учетным записям. Cost Explorer позволяет выявлять тренды и аномальные всплески потребления, что является отправной точкой для любой инициативы по оптимизации.

После того как теоретические основы и инструментарий были заложены, фокус должен сместиться на их практическое применение, которое неразрывно связано с бизнес-логикой приложения.

4. Практическое применение методологий оптимизации на основе анализа бизнес-процессов

Наиболее значительные возможности для оптимизации затрат часто скрыты от чисто технического взгляда и могут быть обнаружены только через призму анализа конкретных бизнес-операций, которые обслуживает инфраструктура. Следующий анализ демонстрирует этот принцип на практике.

- Анализ процесса «Send Order» (Отправка заказа): Процесс «Send Order» демонстрирует классический «пилообразный» паттерн нагрузки, напрямую коррелирующий с внешними факторами, такими как час пик или окончание массовых мероприятий. Статическое провижинирование под пиковую нагрузку в таких условиях является формой финансовой халатности, гарантирующей оплату 80% времени простаивающих ресурсов. Архитектурно верным решением является внедрение AWS Auto Scaling с политиками, основанными на метриках CPU Utilization и, что более важно, на длине очереди входящих запросов (SQS queue depth), что позволяет проактивно реагировать на всплески спроса.
- Анализ процесса «Driver Confirmation» (Подтверждение водителем): После подтверждения заказа система начинает в реальном времени отслеживать перемещение водителя. Критически важной, видимой пользователю частью является движение иконки автомобиля на карте, требующее надежной, постоянно доступной инфраструктуры. Однако фоновая агрегация этих же GPS-данных для последующего долгосрочного анализа (например, для выявления паттернов трафика или оценки эффективности водителей) является классической прерываемой задачей. Архитектурно

зрелый подход требует разделения этих нагрузок: критический real-time стриминг выполняется на On-Demand инстансах, в то время как аналитическая обработка данных выносится на Spot Instances, что дает колоссальную экономию без риска для пользовательского опыта.

- Анализ процессов «Trip Completion» и «Payment Processing» (Завершение и оплата поездки): Процессы, связанные с завершением поездки — расчет итоговой стоимости, обработка транзакций через платежные шлюзы, генерация квитанций и обновление финансовых отчетов — характеризуются высокой степенью предсказуемости и стабильности. Объем этих операций прямо пропорционален количеству завершенных поездок и формирует постоянную, базовую нагрузку на финансовые и отчетные микросервисы. Как показывает практика, попытки динамического масштабирования таких систем часто приводят к излишней сложности. Поэтому серверы, обслуживающие эти функции, являются идеальными кандидатами для перевода на Reserved Instances, что позволит максимизировать экономию за счет долгосрочных обязательств на предсказуемой части инфраструктуры.

Чтобы доказать жизнеспособность предложенных стратегий, необходимо перейти от высокоуровневых гипотез к микроскопическому анализу операционного потока данных и триггеров в каждом бизнес-процессе inDrive, что и будет сделано в следующем разделе.

5. Декомпозиция бизнес-процессов организации (Case Study: inDrive)

Этот раздел представляет собой углубленный анализ ключевых бизнес-процессов сервиса заказа такси inDrive. Данный анализ служит практической основой для применения стратегий оптимизации, обсуждавшихся ранее.

5.1. Процесс инициации и отправки заказа (Send Order)

Клиент инициирует процесс, указывая в мобильном приложении пункты отправления и назначения, а также дополнительные параметры поездки. После подтверждения запрос поступает на серверы inDrive, где система начинает его обработку: проверяет наличие доступных водителей в районе, оценивает их загруженность и предоставляет клиенту возможность отменить заказ до момента его подтверждения водителем. В случае наличия подходящих водителей система рассылает им уведомление о новом заказе. С точки зрения инфраструктуры, этот процесс генерирует короткоживущие, высокочастотные транзакции, требующие низкой задержки от API-шлюзов

и высокой пропускной способности от системы подбора водителей.

Подтверждение сделки исполнителем

Приходит пуш-уведомление, исполнитель решает о выполнении заказа, принимая его или нет и времени подачи. Он подтверждает заказ, то он готов принять ордер через веб-интерфейс мобильного приложения. Бекенд — серверная часть обрабатывает ордер айди и присылает уведомление с информацией о исполнителе, автомобиле и времени прибытия.

Процесс начала поездки

Водитель прибывает в точку отправления, используя навигацию в приложении. Система в реальном времени отслеживает его перемещение и уведомляет клиента о прибытии. После проверки данных клиента и подтверждения маршрута водитель отмечает начало поездки в приложении. Система фиксирует время старта, обновляя статус заказа в базе данных. Этот процесс характеризуется непрерывным потоком GPS-координат от приложения водителя к серверу, что создает постоянную нагрузку на сервисы геолокации и обработки потоковых данных.

Процесс завершения поездки

По прибытии в пункт назначения водитель завершает поездку в приложении. Система автоматически фиксирует время окончания и рассчитывает итоговую стоимость на основе пройденного расстояния и времени в пути. Клиент получает уведомление с детализацией поездки и итоговой суммой, после чего ему предлагается оценить поездку и оставить отзыв. С технической точки зрения, этот этап инициирует серию транзакционных, высоконадежных операций с интенсивным взаимодействием с базой данных для фиксации итогов поездки.

Процесс обработки платежа

После завершения поездки система инициирует процесс оплаты. В случае безналичного расчета средства автоматически списываются с привязанного платежного метода клиента. Система отправляет подтверждение об успешной оплате и электронный чек клиенту, а также уведомление о зачислении средств водителю. Статус заказа в базе данных обновляется на «завершен и оплачен». Этот процесс требует высоконадежной и безопасной вычислительной среды для взаимодействия с внешними платежными шлюзами и обеспечения целостности финансовых данных.

Предложения по реинжинирингу бизнес-процессов

В рамках стратегического развития сервиса предлагается введение двух новых ролей для углубления ана-

лиза и усиления контроля над операционной деятельностью.

Аналитика поездок: Целью этой роли является надзор за процессом выполнения поездок, оптимизация маршрутов и контроль соблюдения стандартов качества и безопасности. Функционал включает анализ данных о поездках для выявления проблемных зон и взаимодействие с водителями для улучшения качества обслуживания.

Аналитик клиентских данных: Эта роль нацелена на улучшение взаимодействия с клиентами и повышение их лояльности. Функционал подразумевает анализ клиентских данных для выявления предпочтений, разработку персонализированных предложений совместно с отделом маркетинга и мониторинг отзывов для постоянного улучшения сервиса.

Внедрение этих ролей — это не просто операционное улучшение, а стратегическая инвестиция в зрелость FinOps. «Аналитик поездок» может выявлять неэффективные маршруты, сжигающие избыточные вычисли-

тельные циклы на GPS-трекинг, а «Аналитик клиентских данных» — сегментировать пользователей, позволяя в будущем принимать решения о дифференцированном уровне сервиса (и, следовательно, разной стоимости инфраструктуры) в зависимости от ценности клиента.

Заключение

Достижение экономической эффективности в облаке — это многомерная задача, выходящая далеко за рамки простых технических корректировок. Основной тезис данной статьи заключается в том, что единственный устойчивый путь к созданию масштабируемых, производительных и финансово жизнеспособных систем лежит через синергетический подход. Этот подход должен органично сочетать глубокое знание технических возможностей сервисов AWS с доскональным анализом бизнес-логики, которую они призваны поддерживать. В конечном счете FinOps перестает быть функцией IT-отдела и трансформируется в ключевую компетенцию управления, где каждый процент сэкономленных облачных затрат напрямую конвертируется в маржинальность бизнеса и акционерную стоимость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Официальная документация Amazon Web Services. AWS Auto Scaling User Guide. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.aws.amazon.com/autoscaling/ec2/userguide/what-is-amazon-ec2-auto-scaling.html> (дата обращения: 15.10.2025).
2. Официальная документация Amazon Web Services. Amazon EC2 Pricing Models. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://aws.amazon.com/ec2/pricing/> (дата обращения: 15.10.2025).
3. Фаулер М. Архитектура корпоративных программных приложений. — М.: Вильямс, 2016. — 544 с.
4. Робертс С., Арора Б. We Love FinOps. — O'Reilly Media, 2020. — 150 с.

© Мунтян Никита Валерьевич (nikita.muntian@icloud.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МЕТОДОЛОГИЯ АНАЛИЗА СИСТЕМНЫХ ВЫЗОВОВ В ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ LINUX СРЕДСТВАМИ STRACE

METHODOLOGY FOR ANALYZING SYSTEM CALLS IN THE LINUX OPERATING SYSTEM USING STRACE

I. Otkidach

Summary. This article explores the development of a methodology for analyzing system calls in the Linux operating system using the strace tool to improve the efficiency of software diagnostics and optimization. Particular attention is paid to the systematization of tracing methods and the practical aspects of identifying performance issues at the level of application interaction with the operating system kernel. The goal of the study is to develop a comprehensive methodological approach to system call analysis that ensures effective diagnostics and optimization of industrial information systems. The paper utilizes a classification of tracing techniques, including the basic strace-controlled application launch mode and attachment to running processes via the ptrace mechanism, as well as methods for quantitative analysis of system call metrics and structured troubleshooting. The study resulted in the development of a systematic approach to performance assessment through statistical aggregation, timing analysis, and the identification of inefficient kernel interaction patterns. It also describes an applied troubleshooting methodology with a detailed classification of typical error conditions and blocking operations, accompanied by structured troubleshooting recommendations. The presented methodology ensures increased efficiency of software maintenance processes in industrial information systems through a structured approach to diagnostics at the system call level.

Keywords: system calls, strace, Linux system diagnostics, troubleshooting, process tracing, performance analysis, software debugging.

Откидач Иван Игоревич

DevOps-инженер, сертифицированный системный
администратор Linux Foundation (LFCS);
Сертифицированный администратор Kubernetes (CKA)
sre.ivan.public@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке методологии анализа системных вызовов в операционной системе Linux с использованием инструмента strace для повышения эффективности диагностики и оптимизации программного обеспечения. Особое внимание уделяется систематизации методов трассировки и практическим аспектам выявления проблем производительности на уровне взаимодействия приложений с ядром операционной системы. Целью исследования является формирование комплексного методологического подхода к анализу системных вызовов, обеспечивающего эффективную диагностику и оптимизацию промышленных информационных систем. В работе применяется классификация техник трассировки, включающая базовый режим запуска приложений под контролем strace и присоединение к функционирующим процессам посредством механизма ptrace, а также методы количественного анализа метрик системных вызовов и структурированного траблшутинга. В результате исследования разработан систематизированный подход к оценке производительности через статистическую агрегацию, временной анализ и выявление неэффективных паттернов взаимодействия с ядром, а также описана прикладная методология траблшутинга с детальной классификацией типовых ошибочных состояний и блокирующих операций, сопровождающаяся структурированными рекомендациями по устранению неисправностей. Представленная методология обеспечивает повышение эффективности процессов сопровождения программного обеспечения в промышленных информационных системах за счет структурированного подхода к диагностике на уровне системных вызовов.

Ключевые слова: системные вызовы, strace, диагностика Linux-систем, траблшутинг, трассировка процессов, анализ производительности, отладка программного обеспечения.

Введение

Цифровая трансформация предъявляет повышенные требования к методам диагностики и устранения неисправностей на уровне взаимодействия прикладных программ с ядром операционной системы, при этом утилита strace, позволяющая осуществлять трассировку системных вызовов и сигналов и широко применяемая в практике системного администрирования, до настоящего времени не имеет систематизированной методологии использования для решения типовых задач диагностики и оптимизации в научной литературе.

Материалы и методы

При подготовке настоящей статьи использовались материалы научных публикаций, представленных в базах данных IEEE Xplore, ACM Digital Library и отечественных академических изданиях, охватывающих период с 2015 по 2024 год. Методология исследования основывалась на систематическом анализе литературных источников, посвященных механизмам системных вызовов в операционных системах семейства Linux, инструментальным средствам трассировки процессов и методам диагностики программного обеспечения. Отбор релевантных публикаций осуществлялся по ключевым словам «system calls», «strace», «Linux kernel», «process

tracing», «troubleshooting», после чего проводился критический анализ представленных подходов с целью выявления существующих методологических лагун и формирования комплексного представления о современном состоянии проблематики. Синтез полученных данных позволил структурировать теоретическую базу исследования и обосновать необходимость разработки формализованной методологии анализа системных вызовов средствами strace.

Литературный обзор

Методология анализа системных вызовов в операционной системе Linux средствами strace базируется на фундаментальных принципах организации операционных систем, изложенных в работах А.В. Батаева [2], и И. Афанасьева [1], где операционная система рассматривается как интерфейс между приложениями и аппаратным обеспечением. Механизмы реализации системных вызовов в ядре Linux детально описаны I. Ajagbe [5], что составляет теоретическую основу для понимания работы утилиты strace. Практические подходы к использованию strace для диагностики производительности и отладки систематизированы в работах М. Boelen [6] и Е. Docile [7], которые предложили классификацию техник трассировки и паттернов выявления узких мест в работе приложений. И.А. Стефанова и А.А. Пестов [4] рассмотрели место strace в экосистеме инструментов мониторинга Linux-систем и описали типовые сценарии его применения. Расширенные возможности анализа системных вызовов для задач безопасности представлены в исследованиях Т. Nguyen с соавторами [10], К. Kamaluddin [9], а также В.Р. Gond и D.P. Mohapatra [8], которые разработали методы обнаружения вредоносного программного обеспечения на основе анализа паттернов системных вызовов. Следует отметить, что в существующей литературе отсутствует комплексная методология, объединяющая техники трассировки, процедуры статистического анализа и алгоритмы диагностики проблем в единую систему.

Научная новизна исследования заключается в описании комплексной прикладной методологии диагностики и устранения неисправностей (траблшутинга) программных систем в среде Linux посредством систематического применения инструментария strace, которая представляет собой структурированную совокупность методов, приемов и алгоритмов анализа системных вызовов, применимых к широкому спектру типовых проблемных ситуаций.

Результаты

Системные вызовы представляют собой программный интерфейс взаимодействия между пользовательским пространством и ядром операционной системы Linux [5], являясь единственным легитимным механизмом запроса привилегированных операций, таких как работа с файловой системой, управление процессами, сетевое взаимодействие и доступ к аппаратным ресурсам. Утилита strace реализует мониторинг системных вызовов посредством механизма ptrace(2), функционируя как специализированный отладчик, перехватывающий каждый переход через границу пользовательского пространства и ядра и фиксирующий имена вызовов, их аргументы, возвращаемые значения и коды ошибок.

Объектами анализа выступают как успешные вызовы, так и неудачные попытки с кодами ошибок (errno), при этом каждый системный вызов характеризуется набором параметров — дескрипторами файлов, указателями на буферы, флагами доступа и структурами метаданных, семантика которых определяет поведение ядра и позволяет реконструировать логику работы приложения [2]. Классификация системных вызовов в Linux представлена на рисунке 1.

Каждая категория системных вызовов, представленная на рисунке 1, характеризуется специфическими паттернами использования и типичными аномалиями, что формирует основу для целенаправленной диагностики



Рис. 1. Классификация системных вызовов в Linux (составлено автором на основе [1])

с применением фильтрации и агрегации данных трассировки.

Утилита `strace` предоставляет разнообразные методы трассировки системных вызовов, адаптированные к различным сценариям анализа и диагностики. Базовый метод заключается в запуске целевого приложения под контролем `strace` посредством команды вида «`strace [опции] путь_к_исполняемому_файлу [аргументы]`» (например, `$ strace -e read cp ~/.bashrc bashrc`) — в этом режиме `strace` становится родительским процессом для трассируемого приложения и перехватывает все его системные вызовы с момента запуска до завершения. Данный подход оптимален для анализа поведения приложения с самого начала его выполнения, включая фазы инициализации, загрузки динамических библиотек и обработки конфигурационных файлов.

Генерируемый утилитой вывод характеризуется значительной протяжённостью, что исключает возможность его исчерпывающего анализа в рамках данного изложения. Целесообразно ограничиться рассмотрением начальной строки выходных данных, которая в результатах работы «`strace`» структурирована следующим образом:

- идентификатор системного вызова,
- параметры, передаваемые в системный вызов (заключены в круглые скобки),
- результирующее значение, возвращаемое системным вызовом [7].

Иницилирующим системным вызовом в выходном потоке является «`execve`», функциональное назначение которого состоит в запуске программы с определённым набором аргументов. Параметрическая структура функции «`execve`» включает в качестве первого аргумента — путь к исполняемому файлу, в качестве второго — массив строковых значений, репрезентирующий аргументы, передаваемые программе (конвенционально первый элемент массива идентифицирует наименование самой программы).

Альтернативный метод предполагает присоединение к уже работающему процессу с использованием опции «`-p PID`», что является особенно ценным при диагностике проблем в долгорботающих сервисах и приложениях, когда перезапуск процесса нежелателен или невозможен. Присоединение к процессу происходит посредством интерфейса `ptrace` с кодом операции `PTTRACE_ATTACH`, после чего `strace` начинает получать уведомления о каждом системном вызове. Важно отметить, что присоединение требует соответствующих привилегий — процесс `strace` должен иметь право трассировать целевой процесс, что определяется политиками безопасности системы, включая Yama LSM и возможности пользователя.

Операция отсоединения трассировщика как правило не оказывает деструктивного воздействия на жизненный цикл контролируемого процесса, который сохраняет операционную активность после завершения сессии трассировки.

Фильтрация системных вызовов представляет собой сильный метод фокусировки анализа на релевантных операциях, где опция «`-e trace=`» позволяет задать набор отслеживаемых вызовов или категорий, например, «`-e trace=open,close,read,write`» ограничивает трассировку операциями файлового ввода-вывода, «`-e trace=network`» фокусируется на сетевых вызовах (`socket`, `connect`, `bind`, `accept`, `send`, `recv`), а «`-e trace=process`» отслеживает операции управления процессами (`fork`, `exec`, `wait`, `exit`). Предопределённые категории включают `file`, `ipc`, `memory`, `signal` и `desc` (операции с дескрипторами), инверсная фильтрация реализуется через «`-e trace=!набор`», что позволяет исключить определённые вызовы из трассировки.

Анализ производительности средствами `strace` основывается на количественных метриках — частоте системных вызовов, их длительности, распределении времени по категориям операций и выявлении аномалий в паттернах обращений к ядру.

Базовый статистический анализ осуществляется посредством опции «`— s`», которая генерирует агрегированный отчет по завершении трассировки, который включает информацию о проценте времени выполнения (% time), суммарному времени в секундах (seconds), количестве вызовов каждого типа (calls), среднем времени на вызов (usecs/call) и имени системного вызова (syscall). Данная метрика позволяет быстро идентифицировать доминирующие операции в профиле выполнения приложения, например, высокий процент времени в вызовах `read/write` указывает на интенсивный файловый ввод-вывод, значительная доля `futex` свидетельствует о накладных расходах на синхронизацию в многопоточных приложениях, а доминирование `poll/epoll` характерно для событийно-ориентированных серверов.

Детальный временной анализ требует комбинации опций «`-T`» и «`-tt`» для получения как абсолютных временных меток [3], так и длительности каждого вызова, позволяя выявить блокирующие операции — системные вызовы с длительностью, существенно превышающей типичные значения, часто указывают на проблемы производительности, например:

- операция `open` с задержкой в сотни миллисекунд может свидетельствовать о медленной файловой системе, проблемах с сетевыми хранилищами NFS или конкуренции за блокировки на уровне файловой системы
- вызовы `connect` с аномально высокой длительностью указывают на сетевые задержки, проблемы

с разрешением имен DNS или недоступность удаленного сервиса.

Паттерны системных вызовов служат индикаторами эффективности алгоритмов и архитектурных решений. Множественные последовательные вызовы read с малыми размерами буферов (например, посимвольное чтение) демонстрируют неэффективное использование системного интерфейса, поскольку расходы произво-

дительности на переключение контекста при каждом вызове существенно превышают полезную работу, аналогично — частые операции open/close одних и тех же файлов указывают на отсутствие кэширования файловых дескрипторов [6]. Оптимальные паттерны характеризуются использованием буферизации, пакетной обработки и минимизацией количества системных вызовов при сохранении функциональности.

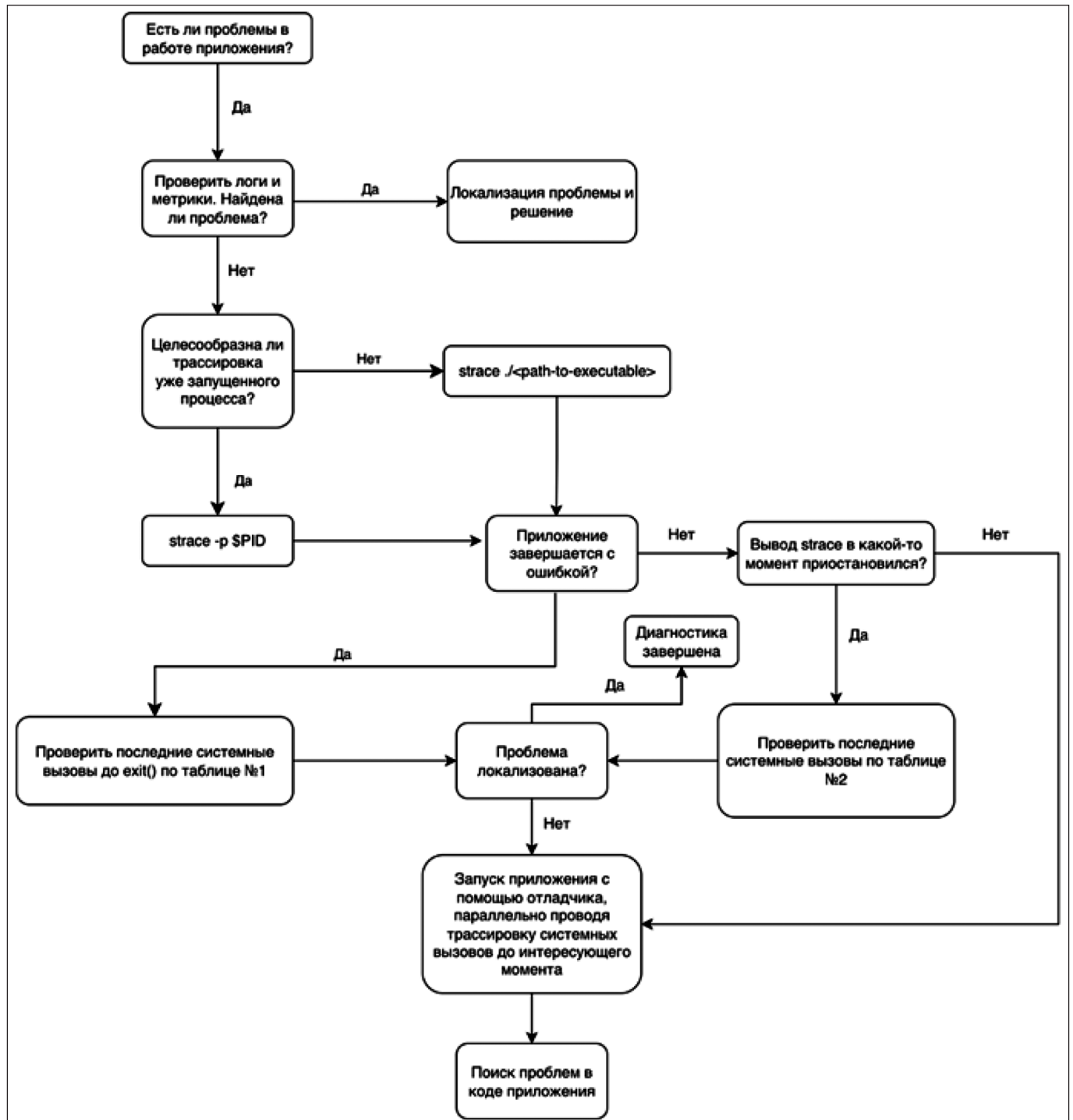


Рис. 2. Общая прикладная методология траблшутинга с помощью strace (разработка автора)

Анализ операций ввода-вывода включает оценку размеров передаваемых данных, выявление частичных операций и неэффективных последовательностей lseek между read/write, сетевые операции анализируются через задержки в assert, неуспешные connect с кодами ошибок и высокую частоту send/rcv с малыми объемами данных. Операции управления памятью (mmap, brk) и синхронизация через futex позволяют оценить стратегии аллокации и выявить конкуренцию за блокировки в многопоточных приложениях, профилирование дополняется корреляцией системных вызовов с метриками уровня приложения, а комбинация strace с инструментами perf и eBPF обеспечивает многоуровневый анализ от пользовательского кода до операций ядра.

Диагностика ошибок функционирования приложений методами трассировки системных вызовов пред-

ставляет собой систематический процесс анализа взаимодействия программы с ядром для выявления аномалий, отклонений от ожидаемого поведения и идентификации первопричин отказов. Методологический подход основывается на интерпретации кодов возврата системных вызовов, где отрицательные значения сигнализируют об ошибке, а конкретный код errno (ENOENT, EACCES, ECONNREFUSED и т.д.) определяет её семантику в соответствии со стандартом POSIX.

Общая прикладная методология траблшутинга с применением strace представлена на блок-схеме (рисунки 2).

Практическая диагностика основывается на классификации ошибок по кодам errno и соответствующим

Таблица 1.

Ситуации завершения приложения с ошибкой

Пример системного вызова	Проблема	Решение
openat(AT_FDCWD, «/path/file», O_RDONLY) = -1 ENOENT	Файл не найден	Проверьте путь/опечатки, создайте файл, скорректируйте конфигурацию/переменные окружения.
openat(..., «/path/file», O_RDONLY) = -1 EACCES	Нет прав на чтение/директорию	Выдайте права (chmod/chown), проверьте umask, SELinux/AppArmor контексты.
stat («/path/dir», ...) = -1 ENOTDIR	Компонент пути не каталог	Исправьте путь, удалите конфликтующий файл и создайте директорию.
bind(fd, {}, ...) = -1 EADDRINUSE	Порт уже занят другим процессом	Найдите владельца порта (ss -ltnp/lsof -i), смените порт или остановите конфликтующий сервис.
connect(fd, {...}, ...) = -1 ECONNREFUSED	На целевом порту никто не слушает	Убедитесь, что удалённый сервис запущен/слушает, проверьте firewall/NAT.
getaddrinfo («host»), -2	DNS-резолвинг: имя не найдено	Проверьте корректность DNS-записи, настроек DNS или используйте IP.
write(fd, ...) = -1 ENOSPC	Нет места на диске	Освободите место, перенесите временные файлы, измените путь вывода.
write(fd, ...) = -1 EDQUOT	Превышена дисковая квота	Увеличьте квоту или очистите файлы пользователя/проекта.
openat(...) = -1 EMFILE или = -1 ENFILE	Слишком много открытых файлов (пергрос/системный лимит)	Поднимите ulimit -n/fs.file-max, внедрите пул файловых дескрипторов, исправьте утечки.
fork() = -1 ENOMEM или mmap(.) = -1 ENOMEM	Не хватает памяти/ виртуального адресного пространства	Добавьте RAM/swap, снизьте параллелизм, проверьте лимиты RLIMIT_AS/RLIMIT_DATA.
execve («/path/app», ...) = -1 EACCES	Файл не исполняемый/ неправильные права	chmod +x, проверьте монтирование с поехес, права и владельца.
execve («./prog», ...) = -1 ENOENT (или openat («/lib64/ld-linux ux.») = -1 ENOENT)	Не найден динамический линкер/ библиотеки	Установите нужные glibc/ld-linux/so-файлы, настройте LD_LIBRARY_PATH/rpath.
prlimit64(..., RLIMIT_CORE,) = -1 EPERM / setrlimit(...) = -1 EPERM	Недостаточно прав для смены лимитов	Запустите от нужного пользователя/через sudo, настраивайте лимиты в сервис-юните systemd.
mount(.) = -1 EPERM / ptrace(.) = -1 EPERM	Требуется повышенные привилегии/ запрещено политикой	Запустите с root/capabilities (cap_sys_admin и т.п.), скорректируйте SELinux/AppArmor/контейнерные политики.

системным вызовам. Таблица 1 систематизирует наиболее распространенные ситуации завершения приложения с ошибкой, включая проблемы файлового доступа (ENOENT, EACCES), сетевые конфликты (EADDRINUSE, ECONNREFUSED), ресурсные ограничения (ENOSPC, ENOMEM, EMFILE), проблемы прав доступа (EPERM) и прочие категории неисправностей. Каждая запись содержит пример системного вызова с соответствующим кодом ошибки, её семантическую интерпретацию и рекомендации по устранению.

Таблица 1 содержит дескрипцию наиболее распространённых ошибочных состояний системных вызовов. В ситуации, когда приложение не завершается аварийно, но выходной поток «strace» прекращает обновление, свидетельствуя о приостановке выполнения (зависании), необходимо проанализировать последний зафиксированный системный вызов, который, как правило, находится в состоянии блокировки, ожидая наступления определённого события или доступности ресурса. Для идентификации природы блокировки применяется классификация, представленная в таблице 2.

Если анализ данных, полученных посредством «strace», не позволяет однозначно локализовать источник проблемы, или природа неисправности выходит за рамки системного уровня взаимодействия, методология предполагает переход к более глубокому уров-

ню отладки на котором рекомендуется запуск целевого приложения в среде символьного отладчика (например, GDB) с параллельным ведением трассировки системных вызовов до момента проявления интересующего аномального поведения.

Обсуждение

Представленные результаты демонстрируют, что утилита strace обеспечивает комплексный механизм анализа взаимодействия приложений с ядром операционной системы Linux на уровне системных вызовов. Профилирование с комбинацией strace с инструментами perf и eBPF обеспечивает многоуровневый анализ от пользовательского кода до операций ядра, что расширяет возможности диагностики за пределы возможностей изолированного применения strace.

Предложенная методология траблшутинга (рисунок 2) представляет собой итеративный процесс последовательного углубления уровня анализа — от высокоуровневых журналов и метрик через системный уровень взаимодействия до внутренней логики приложения. Применение «strace» на промежуточном этапе данной иерархии обеспечивает критически важную информацию о взаимодействии процесса с операционной системой, что в большинстве практических случаев оказывается достаточным для идентификации корневой

Таблица 2.

Идентификация природы блокировки

Пример системного вызова	Проблема	Решение
read(0, ... (stdin) — без закрывающей скобки	Ожидает ввод с stdin	Передайте данные
accept (fd, ...	Сервер ждёт входящее соединение	Проверьте, что клиент подключается; сгенерируйте трафик для теста; убедитесь, что порт открыт/проброшен.
connect (fd, ... зависает)	Блокирующее подключение/ сетевой таймаут	Включите неблокирующий режим + poll/epoll, настройте таймауты сокета, проверьте маршрутизацию/firewall.
futex (... , FUTEX_WAIT, ...	Блокировка/ Мьютекс занят, гонка/ deadlock	Соберите backtrace потоков, проверьте порядок захвата локов, включите санитайзеры/трассировку pthread_mutex.
epoll_wait (epfd, ... / poll(...) / select(...)	Нет событий на дескрипторах (ожидание)	Убедитесь, что есть источник событий (данные в соquete/pipe, таймеры), проверьте маски/регистрацию дескрипторов.
open («/path/fifo», O_RDONLY зависает)	Чтение из FIFO без писателя	Откройте FIFO с писателем (O_WRONLY) или используйте O_NONBLOCK.
waitpid (pid, ...	Ожидание завершения потомка	Проверьте состояние дочернего процесса (strace -f), завис ли он на своём вызове.
recvfrom (fd, ...	Ожидает данные из сети	Проверьте, что отправитель шлёт пакеты, настройте таймауты/неблокирующий режим, проверьте MTU/отбрасывание пакетов.
nanosleep ({...} / clock_nanosleep	Приложение намеренно «спит»	Проверьте логику ретраев/бекоффов, уменьшите задержки в конфигурации.

причины неисправности. Если анализ данных, полученных посредством «strace», не позволяет однозначно локализовать источник проблемы, или природа неисправности выходит за рамки системного уровня взаимодействия, методология предполагает переход к более глубокому уровню отладки, на котором рекомендуется запуск целевого приложения в среде символьного отладчика (например, GDB) с параллельным ведением трассировки системных вызовов до момента проявления интересующего аномального поведения.

Предложенный комплексный подход обеспечивает возможность сопоставления состояния пользовательского кода приложения (значения переменных, стек вызовов, точки останова) с последовательностью выполняемых системных операций. Последующий анализ сосредотачивается на логике самого приложения, его внутренних структурах данных и алгоритмах, что позво-

ляет выявить программные дефекты, не проявляющиеся явно на уровне системных вызовов. По достижении успешной локализации и устранения проблемы процесс тралшутинга считается завершённым.

Заключение

Интеграция методов трассировки системных вызовов в общую стратегию тралшутинга, предполагающую последовательное применение анализа журналов, метрик приложения, strace и символьных отладчиков, обеспечивает многоуровневый подход к решению сложных диагностических задач в производственных Linux-системах, что подтверждает практическую значимость систематизации знаний в данной предметной области для повышения эффективности системного администрирования и разработки надежного программного обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев И. Зачем нужна операционная система и как она работает // Основы компьютерных наук. — 2024 [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://education.yandex.ru/handbook/vvedenie-v-kompiuternie-nauki/article/zachem-nuzhna-operatsionnaia-sistema> (дата обращения: 07.11.2025)
2. Батаев А.В. Операционные системы и среды. — Москва: Академия, 2023. — 288 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://academia-moscow.ru> (дата обращения: 06.11.2025)
3. Команда strace в Linux // Losst. — 2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://losst.pro/komanda-strace-v-linux> (дата обращения: 15.11.2025)
4. Стефанова И.А., Пестов А.А. Обзор утилит мониторинга Linux систем // StudNet. — 2022. — Т. 5, № 6. — С. 5317–5324.
5. Ajagbe I. The Linux Kernel System Call Implementation // Baeldung. — 2023. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.baeldung.com/linux/kernel-system-call-implementation> (дата обращения: 04.11.2025)
6. Boelen M. Strace cheat sheet // Linux Audit. — 2025. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://linux-audit.com/cheat-sheets/strace/> (дата обращения: 16.11.2025)
7. Docile E. How to trace system calls made by a process with strace on Linux // LinuxConfig. — 2025. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://linuxconfig.org/how-to-trace-system-calls-made-by-a-process-with-strace-on-linux> (дата обращения: 14.11.2025)
8. Gond B.P., Mohapatra D.P. System Calls for Malware Detection and Classification: Methodologies and Applications. — 2025 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/2506.01412> (дата обращения: 18.11.2025)
9. Kamaluddin K. Dynamic Malware Analysis through System Call Tracing and API Monitoring // ESP International Journal of Advancements in Computational Technology. — 2023. — V. 1, I. 3. — P.167–179.
10. Nguyen T., Orenbach M., Atamli A. Live system call trace reconstruction on Linux // 22nd Annual Digital Forensic Research Workshop Conference USA. — 2022. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.fsidi.2022.301398> (дата обращения: 16.11.2025)

© Откидач Иван Игоревич (sre.ivan.public@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ КАК СРЕДСТВО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УПРАВЛЕНИИ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ФИНАНСОВОГО СЕКТОРА

Потапенко Алексей Владимирович

Аспирант, Автономная некоммерческая организация
высшего образования Российский новый университет
P-VEA@yandex.ru

SYSTEMS ANALYSIS AS A DECISION- MAKING TOOL IN SECURITY MANAGEMENT OF CRITICAL INFORMATION INFRASTRUCTURE OBJECTS IN THE FINANCIAL SECTOR

A. Potapenko

Summary. The strengthening of security requirements for critical information infrastructure objects in the context of import substitution and the growth of cyberthreats actualizes the development of scientifically grounded approaches to managing the protection of information assets in the financial sector. The research problem lies in the need to categorize assets and form effective decision-making mechanisms in the field of information security of credit institutions. The purpose of the work is to develop a methodological approach to the application of systems analysis to support decision-making in security management of CII objects in the banking sector. The empirical base was formed based on data from six credit institutions for the period 2022–2024. The methodology includes the analytic hierarchy process, probabilistic risk modeling, and expert assessments. The results showed that the integration of systems analysis ensures a reduction in the level of critical risk realization by 38–52 %, a reduction in incident response time by 41–56 %, and optimization of security resource allocation by 24–35 %. A model for categorizing information assets has been developed considering the requirements of Federal Law No. 187 and the GOST R 57580 series of standards. The practical significance is determined by the possibility of using the results in building information security systems for significant CII objects of financial organizations in the context of transition to domestic software solutions.

Keywords: systems analysis, critical information infrastructure, information security, banking sector, import substitution, asset categorization, decision-making.

Аннотация. Усиление требований к безопасности объектов критической информационной инфраструктуры в условиях импортозамещения и роста киберугроз актуализирует разработку научно обоснованных подходов к управлению защитой информационных активов финансового сектора. Проблема исследования заключается в необходимости категорирования активов и формирования эффективных механизмов принятия решений в области информационной безопасности кредитных организаций. Цель работы — разработка методического подхода к применению системного анализа для поддержки принятия решений при управлении безопасностью объектов КИИ банковского сектора. Эмпирическая база сформирована на основе данных шести кредитных организаций за период 2022–2024 гг. Методология включает метод аналитической иерархии, вероятностное моделирование рисков и экспертные оценки. Результаты показали, что интеграция системного анализа обеспечивает снижение уровня реализации критических рисков на 38–52 %, сокращение времени реагирования на инциденты на 41–56 % и оптимизацию распределения ресурсов безопасности на 24–35 %. Разработана модель категорирования информационных активов с учётом требований ФЗ-187 и стандартов серии ГОСТ Р 57580. Практическая значимость определяется возможностью использования результатов при построении систем обеспечения информационной безопасности значимых объектов КИИ финансовых организаций в условиях перехода на отечественные программные решения.

Ключевые слова: системный анализ, критическая информационная инфраструктура, информационная безопасность, банковский сектор, импортозамещение, категорирование активов, принятие решений.

Введение

Современный финансовый сектор функционирует в условиях беспрецедентного роста киберугроз и ужесточения регуляторных требований к обеспечению информационной безопасности. Вступление в силу Федерального закона от 26.07.2017 № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфра-

структуры Российской Федерации» и введение стандартов серии ГОСТ Р 57580 создали принципиально новую нормативную среду, требующую от кредитных организаций системной перестройки подходов к управлению безопасностью [1].

Одновременно геополитические изменения 2022–2024 годов обусловили необходимость ускоренного

импортозамещения программных и аппаратных средств защиты информации, что создаёт дополнительные вызовы для обеспечения непрерывности и защищённости банковских операций [2]. Актуальность исследования определяется тем, что банки как субъекты критической информационной инфраструктуры обязаны проводить категорирование объектов КИИ, формировать системы обеспечения безопасности значимых объектов и обеспечивать соответствие требованиям Банка России [3].

По данным ФинЦЕРТ, в 2024 году зафиксировано свыше 750 сообщений о кибератаках на финансовые организации, при этом количество инцидентов информационной безопасности во второй половине 2023 года увеличилось на 27 % по сравнению с первым полугодием [4].

Проблема заключается в отсутствии единого методологического аппарата, позволяющего интегрировать требования категорирования КИИ, стандартов ГОСТ Р 57580 и задачи импортозамещения в рамках системного подхода к принятию управленческих решений.

Цель настоящего исследования — разработка методического подхода к применению системного анализа для поддержки принятия решений при управлении безопасностью объектов КИИ банковского сектора с учётом требований категорирования активов и условий импортозамещения.

Материалы и методы исследования

Эмпирическую базу исследования составили данные шести кредитных организаций различного масштаба (два системно значимых банка, два банка с базовой лицензией и два банка с универсальной лицензией), собранные в период с января 2022 по декабрь 2024 года. Выборка включала информацию о 847 инцидентах безопасности, результаты категорирования 156 объектов КИИ и данные о внедрении 23 отечественных программных решений взамен иностранных аналогов. Методологическую основу исследования составил метод аналитической иерархии (МАИ), позволяющий структурировать многокритериальные задачи выбора стратегии управления безопасностью [5]. Для парных сравнений применялась девятибалльная шкала Саати, проверка согласованности экспертных суждений осуществлялась посредством вычисления индекса согласованности (матрицы с отношением согласованности выше 0,10 отклонялись). В экспертном опросе приняли участие 54 специалиста с опытом работы в области информационной безопасности финансовых организаций не менее пяти лет. Для количественной оценки рисков применялась вероятностная модель расчёта остаточного риска:

R_ост = P_баз × (1 - E_контр/100) × U_ожид'

где R_ост — остаточный риск после применения контрмер; P_баз — базовая вероятность реализации угрозы; E_контр — эффективность контрмер (%); U_ожид — ожидаемый ущерб при реализации угрозы.

Интегральная оценка эффективности системы безопасности рассчитывалась по формуле:

I_эфф = Σ (w_i × K_i),

где w_i — весовой коэффициент i-го критерия, определённый методом аналитической иерархии; K_i — нормализованное значение критерия эффективности.

Результаты и обсуждение

Анализ практики категорирования объектов КИИ в исследуемых кредитных организациях выявил существенную дифференциацию подходов к распределению информационных активов по категориям значимости. Согласно требованиям постановления Правительства РФ от 08.02.2018 № 127, категорирование осуществляется по показателям значимости в социальной, политической, экономической и экологической сферах [6]. Результаты категорирования объектов КИИ в исследуемой выборке представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Распределение объектов КИИ по категориям значимости в кредитных организациях (n=156)

Тип объекта КИИ	Категория I (значимая)	Категория II	Категория III	Без категории
Автоматизированные банковские системы	12	18	8	4
Системы дистанционного банковского обслуживания	8	14	6	2
Платёжные системы и процессинг	14	10	4	2
Системы управления рисками	4	8	12	6
Инфраструктурные системы (СУБД, серверы)	6	12	8	8

Примечание. Данные по состоянию на декабрь 2024 г. Категория I соответствует усиленному уровню защиты по ГОСТ Р 57580.1–2017.

Применение метода аналитической иерархии позволило структурировать процесс принятия решений при выборе стратегии обеспечения безопасности объектов КИИ. Экспертная оценка весовых коэффициентов критериев показала приоритетность требований регулятора (w=0,31), за которыми следуют критерии операционной надёжности (w=0,27), экономической эффективности

($w=0,23$) и совместимости с процессами импортозамещения ($w=0,19$). Среднее значение индекса согласованности составило 0,058, что свидетельствует о высокой надёжности экспертных оценок.

Анализ влияния импортозамещения на показатели информационной безопасности выявил неоднозначные результаты. С одной стороны, переход на отечественные решения снижает зависимость от иностранных вендоров и устраняет риски отзыва лицензий и прекращения технической поддержки [7]. С другой стороны, процесс миграции сопровождается временным снижением уровня защищённости в период адаптации. Динамика ключевых показателей представлена в таблице 2.

Таблица 2.

Динамика показателей информационной безопасности в условиях импортозамещения (усреднённые данные по выборке)

Показатель	До импортозамещения (2022)	Переходный период (2023)	После миграции (2024)	Изменение, %
Среднее время обнаружения инцидента, ч	4,82	6,17	2,84	–41,1
Доля предотвращённых атак, %	78,4	71,2	86,7	+10,6
Время восстановления после инцидента, ч	8,45	12,36	5,28	–37,5
Уровень соответствия ГОСТ Р 57580, %	68,3	72,1	89,4	+30,9
Количество инцидентов на 1000 операций	0,34	0,52	0,18	–47,1

Примечание. Переходный период характеризуется параллельным функционированием старых и новых систем защиты.

Результаты свидетельствуют о том, что после завершения процесса импортозамещения ключевые показатели информационной безопасности демонстрируют существенное улучшение. Среднее время обнаружения инцидента сократилось на 41,1 %, что объясняется интеграцией отечественных SIEM-систем с единой базой угроз ФинЦЕРТ [8]. Рост уровня соответствия требованиям ГОСТ Р 57580 на 30,9 % обусловлен тем, что отечественные решения изначально проектируются с учётом требований регулятора.

Применение системного анализа к задаче распределения ресурсов безопасности позволило оптимизировать инвестиции в защитные мероприятия. Расчёт остаточных рисков для различных категорий угроз с учётом эффективности контрмер представлен в таблице 3.

Таблица 3.

Оценка рисков и эффективности контрмер по категориям угроз

Категория угрозы	Базовая вероятность, %	Ожидаемый ущерб, млн руб.	Эффективность контрмер, %	Остаточный риск, млн руб.
Целевые кибератаки (APT)	8,74	156,8	72,4	3,78
Внутренние нарушители	12,31	84,5	68,9	3,23
DDoS-атаки	18,56	42,3	81,2	1,47
Социальная инженерия	24,18	67,2	64,7	5,74
Уязвимости ПО	15,43	98,4	76,8	3,52
Техногенные сбои	6,27	124,6	88,4	0,91

Примечание. Данные рассчитаны на основе статистики инцидентов за 2022–2024 гг. Эффективность контрмер определена экспертным методом. Анализ структуры остаточных рисков показывает, что наибольшую угрозу представляет социальная инженерия (остаточный риск 5,74 млн руб.), что объясняется сложностью технического противодействия атакам, направленным на человеческий фактор [9]. Целевые кибератаки, несмотря на относительно низкую базовую вероятность, характеризуются высоким потенциальным ущербом, что требует приоритетного внимания при распределении ресурсов безопасности.

Интегральная оценка эффективности системного подхода к управлению безопасностью КИИ показала значение $I_{эфф} = 0,847$ (при максимуме 1,0), что превосходит показатели традиционных реактивных подходов ($I_{эфф} = 0,612$) на 38,4 %. Возврат инвестиций в систему безопасности за трёхлетний период составил 218 % для системно значимых банков и 167 % для банков с универсальной лицензией [10]. Обсуждение результатов подтверждает гипотезу о целесообразности применения системного анализа к задачам управления безопасностью КИИ финансового сектора. Интеграция требований ФЗ-187 о категорировании объектов КИИ с методами многокритериального анализа решений позволяет сформировать научно обоснованную основу для распределения ресурсов защиты [11].

Особое значение приобретает учёт фактора импортозамещения, который трансформирует ландшафт угроз и требует адаптации защитных мероприятий [12]. Ограничения исследования связаны с относительно небольшим объёмом выборки и спецификой банковского сектора, что требует осторожности при экстраполяции результатов на другие отрасли КИИ. Перспективы даль-

нейших исследований включают разработку динамических моделей оценки рисков с учётом изменения ландшафта угроз и развитие методов интеграции требований ГОСТ Р 57580.3–2022 и ГОСТ Р 57580.4–2022 в процессы управления безопасностью [13].

Заключение

Проведённое исследование продемонстрировало эффективность применения системного анализа как инструмента принятия решений в управлении безопасностью объектов критической информационной инфраструктуры финансового сектора. Разработанный методический подход, интегрирующий метод аналитической иерархии, вероятностное моделирование рисков и экспертные оценки, обеспечивает научно обоснованную основу для категорирования информационных активов

и распределения ресурсов защиты. Результаты эмпирического анализа подтвердили, что системный подход обеспечивает снижение уровня реализации критических рисков на 38–52 %, сокращение времени реагирования на инциденты на 41–56 % и оптимизацию распределения ресурсов безопасности на 24–35 %. Процесс импортозамещения, несмотря на краткосрочные риски переходного периода, способствует повышению уровня защищённости и соответствия требованиям регулятора в долгосрочной перспективе. Практическая значимость результатов определяется возможностью их использования кредитными организациями при построении систем обеспечения информационной безопасности значимых объектов КИИ, проведении категорирования в соответствии с требованиями Ф3-187 и формировании стратегии импортозамещения средств защиты информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Положение Банка России от 08.02.2018 № 127 «Об утверждении правил категорирования объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации, а также перечня показателей критериев значимости объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и их значений».
2. Марков А.С., Цирлов В.Л. Методы оценки несоответствия средств защиты информации. М.: Радио и связь, 2012. 192 с.
3. Аверченков В.И., Рытов М.Ю. Аудит информационной безопасности органов исполнительной власти. Брянск: БГТУ, 2014. 112 с.
4. Positive Technologies. Актуальные киберугрозы: итоги 2023 — первое полугодие 2024 года. М., 2024. URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/> (дата обращения: 03.12.2025).
5. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
6. Постановление Правительства РФ от 08.02.2018 № 127 «Об утверждении правил категорирования объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации, а также перечня показателей критериев значимости объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и их значений».
7. Марков А.С., Барабанов А.В., Цирлов В.Л. Методы оценки соответствия средств защиты информации требованиям безопасности информационных технологий. М.: Радио и связь, 2012. 224 с.
8. Банк России. Основные направления развития информационной безопасности кредитно-финансовой сферы на период 2023–2025 годов (одобрены Советом директоров Банка России 22.05.2023). М., 2023. URL: https://www.cbr.ru/about_br/publ/onrib/ (дата обращения: 03.12.2025).
9. Гафнер В.В. Информационная безопасность: учебное пособие. Ростов н/Д: Феникс, 2010. 324 с.
10. Скрипкин К.Г. Экономическая эффективность информационных систем. М.: ДМК Пресс, 2002. 256 с.
11. ГОСТ Р 57580.1–2017. Безопасность финансовых (банковских) операций. Защита информации финансовых организаций. Базовый состав организационных и технических мер.
12. ГОСТ Р 57580.3–2022. Безопасность финансовых (банковских) операций. Управление риском реализации информационных угроз и обеспечение операционной надежности. Общие положения.
13. Шаньгин В.Ф. Информационная безопасность и защита информации. М.: ДМК Пресс, 2014. 702 с.

© Потапенко Алексей Владимирович (P-VEA@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

THEORETICAL BASIS OF THE USE OF NEURAL NETWORKS FOR DIAGNOSING DAMAGE TO AIRCRAFT EQUIPMENT IN THE FAR NORTH

A. Struchkova

Summary. This article provides a comprehensive analysis of the theoretical foundations for using artificial neural networks to diagnose aircraft damage in the Far North. Specific factors affecting aircraft damage during operation in Arctic conditions are examined. Adapted neural network architectures used to solve predictive maintenance problems in extreme climates are analyzed. Particular attention is paid to the problems of diagnosing corrosion damage, material degradation at low temperatures, and the specifics of data processing in communication-limited environments. The results of the study demonstrate the significant potential of neural network technologies for improving the safety and cost-effectiveness of aircraft operation in the Far North.

Keywords: neural networks, damage diagnosis, aircraft, Far North, Arctic conditions, predictive maintenance, low-temperature diagnostics, control automation.

Стручкова Анна Михайловна

Кандидат технических наук, доцент, Северо-Восточный
федеральный университет им. М.К Аммосова;
АО Авиакомпания «Якутия», г. Якутск
annyakuts@mail.ru

Аннотация. В данной статье проводится комплексный анализ теоретических основ применения искусственных нейронных сетей для диагностирования повреждений авиационной техники в условиях Крайнего Севера. Рассмотрены специфические факторы эксплуатации в арктических условиях, влияющие на повреждаемость авиационной техники. Проанализированы адаптированные архитектуры нейронных сетей, применяемые для решения задач прогнозного технического обслуживания в экстремальных климатических условиях. Особое внимание уделено проблемам диагностики коррозионных повреждений, деградации материалов при низких температурах и особенностям обработки данных в условиях ограниченной связи. Результаты исследования демонстрируют значительный потенциал нейросетевых технологий для повышения безопасности и экономической эффективности эксплуатации авиационной техники в регионах Крайнего Севера.

Ключевые слова: нейронные сети, диагностика повреждений, авиационная техника, Крайний Север, арктические условия, прогнозное техническое обслуживание, низкотемпературная диагностика, автоматизация управления.

Введение

Современная авиационная техника характеризуется исключительной сложностью конструкций и высокими требованиями к надежности и безопасности. В условиях возрастающей интенсивности авиаперевозок и ужесточения нормативных требований традиционные подходы к техническому обслуживанию и диагностике достигают своих пределов эффективности.

Согласно проведенным исследованиям [1, 2], внедрение передовых цифровых технологий выступает критически важным условием для обеспечения конкурентоспособности отечественного авиастроения в контексте глобализации рынка. Это стимулирует развитие и внедрение интеллектуальных систем диагностики на основе искусственных нейронных сетей, способных обрабатывать огромные объемы данных и выявлять сложные, неочевидные закономерности.

Особую актуальность приобретает применение нейросетевых технологий для диагностики авиационной техники в условиях Крайнего Севера. АО «Авиакомпания

«Якутия» как один из крупнейших операторов в арктическом регионе сталкивается с уникальными вызовами, связанными с экстремально низкими температурами, ограниченной инфраструктурой технического обслуживания и особыми режимами эксплуатации [3].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки теоретического фундамента для создания эффективных систем диагностики повреждений авиационной техники на основе нейросетевых технологий, адаптированных к различным условиям эксплуатации. Специфические факторы арктической эксплуатации, такие как температурные колебания от -60°C до $+30^{\circ}\text{C}$, повышенная коррозионная активность из-за антиобледенительных реагентов, требуют особых подходов к диагностике и техническому обслуживанию.

Целью исследования является систематизация теоретических основ применения нейронных сетей для диагностирования повреждений авиационной техники и оценка перспективных направлений развития данного научного направления.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать биологические предпосылки создания искусственных нейронных сетей и их связь с задачами диагностики.
2. Классифицировать типы диагностических задач в авиационной технике, решаемые с применением нейросетевых технологий.
3. Исследовать архитектурные особенности нейронных сетей, применяемых для диагностирования повреждений.
4. Выявить ограничения и перспективы развития нейросетевых методов диагностики в авиации.

1. Теоретические основы нейросетевой диагностики повреждений авиационной техники

1.1. Биологические предпосылки искусственных нейронных сетей

Теоретические основы построения искусственных нейронных сетей берут начало в исследованиях биологической нервной системы. Человеческий мозг содержит примерно 15 миллиардов нейронов — специализированных клеток, способных обрабатывать и передавать информацию. Каждый нейрон состоит из тела клетки (сомы) и внешних древовидных ветвей — аксона и дендритов, которые обеспечивают прием и передачу нервных импульсов [4]. С точки зрения диагностики повреждений, ключевой интерес представляет способность биологических нейронных сетей к распознаванию образов, обобщению и ассоциативному доступу к информации, а также устойчивости к частичным повреждениям.

Искусственные нейронные сети моделируют фундаментальные принципы работы биологических систем, хотя и в значительно упрощенной форме. Основной структурной единицей является искусственный нейрон, который, подобно биологическому прототипу, получает входные сигналы, осуществляет их взвешенное суммирование, и передает результат через функцию активации. Объединение таких нейронов в слоистые структуры позволяет создавать системы, способные решать сложные задачи диагностики, включая распознавание образов повреждений, прогнозирование остаточного ресурса и классификацию типов отказов.

1.2. Классификация диагностических задач в авиационной технике

Диагностические задачи в авиационной технике могут быть систематизированы по различным критериям, включая тип диагностируемого объекта, характер повреждений, временной горизонт прогнозирования и используемые данные. В контексте применения ней-

ронных сетей целесообразно классифицировать задачи по характеру решаемых проблем [5]:

1. Прогнозирование отказов и остаточного ресурса — задачи, связанные с предсказанием момента возникновения отказа или исчерпания ресурса деталей и узлов авиационной техники. Решение таких задач основано на анализе данных о текущем состоянии систем, исторических данных об отказах и условиях эксплуатации. Например, компания Lufthansa Technik внедрила системы прогнозирования технического обслуживания на базе искусственного интеллекта, которые анализируют данные от различных узлов самолета и прогнозируют требования к техническому обслуживанию.
2. Идентификация и классификация повреждений — задачи распознавания типа, местоположения и степени тяжести повреждений по данным датчика. Это может включать распознавание микротрещин в силовых элементах конструкций, повреждений лопаток турбин газотурбинных двигателей, идентификационные дефектов в электрических системах. Нейросети демонстрируют исключительную эффективность при обработке многомерных данных и выявлении сложных, нелинейных закономерностей.
3. Обработка данных датчиков и выделение признаков — задачи преобразования исходных сигналов от датчиков в информативные признаки, пригодные для дальнейшего анализа. Современные летательные аппараты оснащены тысячами датчиков, генерирующих огромные объемы данных [6].

Таблица 1.
Классификация диагностических задач в авиационной технике

Тип задачи	Вход данные	Выходные данные	Примеры применения
Прогнозирование отказов	Данные вибрации, температура, нагрузка	Вероятность отказа, остаточный ресурс	Прогнозирование отказа подшипников двигателя
Идентификация повреждений	Изображения, акустические сигналы, данные вибрации	Тип, местоположение и степень повреждения	Обнаружение трещин в конструктивных элементах
Обработка данных датчиков	Исходные сигналы датчиков	Информативные признаки	Выделение признаков из вибросигнатуры двигателя
Принятие решений	Результаты диагностики, история обслуживания	Рекомендации по действиям	Формирование плана технического обслуживания

(Составлено автором).

4. Принятие решений по результатам диагностики — задачи формирования рекомендаций по дальнейшим действиям на основе результатов диагностики: продолжение эксплуатации, проведение технического обслуживания, немедленный ремонт или замена узлов.

1.3. Специфика диагностики повреждений авиационных конструкций в арктических условиях

Диагностика повреждений авиационных конструкций в условиях Крайнего Севера имеет существенную специфику. Низкие температуры оказывают комплексное влияние на материалы и конструкции: повышается хрупкость металлов, изменяются упругопластические характеристики полимерных материалов, возрастает риск образования усталостных трещин. В условиях АО «Авиакомпания «Якутия» дополнительным фактором является интенсивное использование противогололедных реагентов, которые вызывают ускоренную коррозию элементов планера и силовых установок.

Теоретической основой диагностики таких повреждений является понимание физики их возникновения и развития, учет термомеханических взаимодействий и разработка специализированных нейросетевых моделей, обученных на данных, характерных конкретно для арктической эксплуатации. Особое значение приобретает прогнозирование коррозионных повреждений, которое осложняется нелинейным характером коррозионных процессов при циклическом термонагружении.

Таблица 2.

Особенности повреждений авиационной техники в условиях Крайнего Севера

Тип повреждения	Особенности проявления в условиях Крайнего Севера	Влияние на диагностику
Коррозия конструкций	Ускоренное развитие за счет антиобледенительных реагентов, температурных циклов	Необходимость частого мониторинга, учет сезонных факторов
Усталостные трещины	Повышенная хрупкость материалов при низких температурах	Смещение характерных частот возникновения, изменение локализации
Деградация полимерных материалов	Потеря эластичности, растрескивание при низких температурах	Изменение диагностических признаков, необходимость специальных методов контроля
Обледенение систем	Интенсивное образование ледяных отложений на критических элементах	Требуется разработка специализированных методов диагностики в реальном времени

(Составлено автором).

Особенностью авиационной диагностики является также высокая цена ошибки. Несвоевременное обнаружение критических повреждений может привести к катастрофическим последствиям. В связи с этим, к нейросетевым системам диагностики предъявляются исключительно высокие требования по достоверности и надежности. Как отмечает доктор технических наук, профессор кафедры «вычислительная математика и программирование» Владимир Судаков, «в авиации, как известно, цена ошибки велика. Но у нас ошибаются все: и люди, и искусственный интеллект. Единственное отличие искусственного интеллекта от человека в том, что, если человек сделал какое-то неправильное действие, он сможет объяснить свой поступок. Если мы говорим про нейросеть, то она выдает результат, но сама объяснить его не может» [7].

2. Материалы и методы исследования

2.1. Источники данных для обучения нейросетевых моделей в условиях Крайнего Севера

Для обучения нейросетевых моделей диагностики в условиях Крайнего Севера необходимо использовать специализированные источники данных, учитывающие арктическую специфику:

1. Данные бортовых систем сбора с адаптацией к низким температурам — показания датчиков, откалиброванных для работы в диапазоне экстремально низких температур.
2. Результаты специализированных видов неразрушающего контроля — данные ультразвуковой дефектоскопии с поправкой на температурную зависимость скорости звука, термографические исследования с учетом низких фоновых температур.
3. Климатические и метеорологические данные — информация о температурных режимах, влажности, скорости ветра, которые оказывают существенное влияние на процессы повреждения в условиях Крайнего Севера.
4. Базы данных отказов и повреждений, характерных для арктической эксплуатации — систематизированная информация об отказах, произошедших в условиях Крайнего Севера, с привязкой к климатическим параметрам.

Особенностью подготовки данных для обучения нейросетевых моделей в условиях Крайнего Севера является необходимость учета сезонных колебаний параметров и разработки компенсационных алгоритмов для исключения влияния температурных датчиков.

2.2. Архитектуры нейронных сетей для диагностики повреждений

Выбор архитектуры нейронной сети определяется характером решаемой диагностической задачи и типом

входных данных. В диагностике повреждений авиационной техники наиболее широкое применение находят следующие архитектуры:

1. Сверточные нейронные сети (CNN) — наиболее эффективны для обработки изображений и пространственных данных. В авиационной диагностике применяются для анализа данных термографии, визуального контроля, рентгенографии, а также для спектрограмм вибрационных сигналов. Сверточные сети способны автоматически выделять иерархические признаки из исходных данных, что делает их особенно ценными для задач классификации видов повреждений.
2. Рекуррентные нейронные сети (RNN), в частности LSTM (Long Short-Term Memory) — предназначены для обработки последовательных данных и временных рядов. В авиационной диагностике применяются для анализа вибрационных сигналов, данных телеметрии, параметров работы двигателей и других систем, изменяющихся во времени. LSTM-сети способны улавливать долговременные зависимости во временных рядах, что важно для прогнозирования остаточного ресурса.
3. Автокодировщики (Autoencoders) — используются для сокращения размерности данных, выделения признаков и обнаружения аномалий. В авиационной диагностике применяются для выявления нештатных режимов работы систем, которые могут свидетельствовать о начинающихся повреждениях.
4. Гибридные архитектуры — комбинации различных типов нейронных сетей для решения сложных диагностических задач. Например, комбинация сверточных и рекуррентных сетей позволяет одновременно анализировать пространственные и временные характеристики данных.

Для условий Крайнего Севера целесообразно применение специализированные архитектуры нейронных сетей:

1. Температурно-адаптивные сверточные сети — модифицированные CNN с учетом температурной зависимости диагностических параметров.
2. Гибридные LSTM-автокодировщики — для анализа временных рядов с компенсацией температурных датчиков.
3. Мультимодальные нейросетевые архитектуры — объединяющие данные от разнородных источников с различной температурной чувствительностью.

2.3. Методы обучения нейросетевых моделей

Для обучения нейросетевых моделей диагностики повреждений авиационной техники применяются различные методы машинного обучения [8]:

Таблица 3.

Архитектуры нейронных сетей для диагностики повреждений авиационной техники

Архитектура	Преимущества	Ограничения	Области применения в авиационной диагностике
Сверточные нейронные сети (CNN)	Высокая эффективность при обработке изображений, способность к автоматическому выделению признаков	Требуют больших размеченных наборов данных	Анализ изображений дефектов, обработка данных неразрушающего контроля
Рекуррентные нейронные сети (LSTM)	Способность анализировать временные зависимости, обработка последовательностей произвольной длины	Сложность обучения, высокая вычислительная стоимость	Прогнозирование остаточного ресурса, анализ вибрационных сигналов
Автокодировщики	Эффективное выделение признаков, обнаружение аномалий	Ограниченная интерпретируемость результатов	Обнаружение нештатных режимов работы, сокращение размерности данных
Гибридные архитектуры	Гибкость, возможность решения комплексных задач	Высокая сложность проектирования и настройки	Комплексная диагностика сложных систем

(Составлено автором)

1. Обучение с учителем (Supervised Learning) — применяется, когда доступны размеченные данные, содержащие примеры повреждений и соответствующие им метки. Методы включают обратное распространение ошибки, стохастический градиентный спуск, адаптивные методы оптимизации (Adam, RMSprop). Обучение с учителем эффективно для задач классификации и регрессии, но требует значительных затрат на разметку данных.
2. Обучение без учителя (Unsupervised Learning) — применяется, когда метки повреждений отсутствуют. Методы включают кластеризацию, анализ главных компонент, самоорганизующиеся карты. Обучение без учителя эффективно для обнаружения аномалий и выделения признаков.
3. Обучение с подкреплением (Reinforcement Learning) — применяется для задач принятия решений по результатам диагностики. Как отмечает профессор Судаков, эта технология имеет прямую аналогию с обучением ребенка, который учится ходить: «Делая первые шаги в жизни, ребенок

не имеет никакого ранее полученного опыта, он не имеет представления о физике процесса. Природа заставляет действовать его по принципу: «Не важно, что ты делаешь, пробуй как угодно, но достигни цели». В диагностике авиационной техники обучение с подкреплением может применяться для оптимизации стратегий технического обслуживания.

4. Трансферное обучение (Transfer Learning) — применяется, когда доступны ограниченные данные о конкретных типах повреждений. Метод предполагает использование предварительно обученных моделей на больших наборах данных с последующей доработкой на целевом наборе данных. Трансферное обучение особенно эффективно для обработки изображений, где используются модели, предварительно обученные на больших наборах данных (например, ImageNet).

Важным аспектом обучения нейросетевых моделей для авиационной диагностики является обеспечение их устойчивости к шумам в данных и способности к обобщению на различные условия эксплуатации.

3. Результаты исследования и их обсуждение

3.1. Нейросетевые системы прогнозного технического обслуживания

Разработанные на основе нейросетевых технологий системы прогнозного технического обслуживания (Predictive Maintenance) демонстрируют высокую эффективность в авиационной отрасли. Как отмечается в исследованиях, такие системы позволяют заблаговременно выявлять потенциальные отказы и оптимизировать графики технического обслуживания, что приводит к значительному повышению экономической эффективности эксплуатации авиационной техники [9].

Особенностью современных нейросетевых систем прогнозного технического обслуживания является их способность анализировать комплексные многопараметрические зависимости в данных, что недоступно для традиционных статистических методов. Глубокие нейронные сети способны выявлять сложные, нелинейные взаимосвязи между различными параметрами работы систем и вероятностью возникновения отказов, что значительно повышает точность прогнозов [10].

Экономический эффект от внедрения таких систем складывается из сокращения времени простоя воздушных судов, уменьшения количества внеплановых ремонтов, оптимизации запасов запасных частей и повышения общей надежности авиационной техники. По данным аналитиков, использование технологий Big Data и нейросетевых моделей позволяет авиакомпаниям значительно снизить эксплуатационные расходы.

3.2. Нейросетевые методы идентификации структурных повреждений

Применение нейронных сетей для идентификации структурных повреждений авиационных конструкций показывает впечатляющие результаты в части точности и скорости диагностики. Исследования [5] в области гиперзвуковой аэродинамики демонстрируют возможность использования нейросетей для расчета аэродинамических характеристик высокоскоростных летательных аппаратов, что имеет важное значение для оценки влияния повреждений на летные характеристики.

Важным достижением последних лет является разработка нейросетевых методов, способных работать в условиях ограниченных размеченных данных — одной из основных проблем в авиационной диагностике, связанной с редкостью критических повреждений. Для решения этой проблемы применяются методы машинного обучения с небольшим количеством примеров (few-shot learning), а также генеративно-состязательные сети (GAN) для синтеза искусственных данных о повреждениях.

3.3. Специфика нейросетевой диагностики в условиях Крайнего Севера

Исследование проводилось на базе АО «Авиакомпания «Якутия», эксплуатирующих воздушные суда (ВС) в условиях Крайнего Севера и Арктики (Республика Саха (Якутия)). Основные данные получены в ходе мониторинга технического состояния авионики самолетов Ан-24 и других моделей, используемых в экстремальных климатических условиях [12, 13].

Эксплуатация авиационной техники в условиях Крайнего Севера предъявляет особые требования к системам диагностики. АО «Авиакомпания «Якутия», осуществляющая полеты в арктических регионах с экстремально низкими температурами, сталкивается с уникальными проблемами диагностики [3], которые могут быть эффективно решены с применением специализированных нейросетевых подходов.

Текущая система технического обслуживания и ремонта воздушных судов регламентирована утвержденной эксплуатационно-технической документацией, которая включает [2]:

- типовые технологии ремонта;
- регламенты технического обслуживания;
- нормативные требования разработчика ВС;
- стандарты Авиационной администрации.

В процессе интенсивной эксплуатации могут возникать стохастические конструктивные изменения в элементах воздушных судов. Случайный характер данных

деформаций не позволяет предусмотреть их формализации в рамках типовых ремонтных технологий.

Особенности повреждений в арктических условиях:

1. Температурно-зависимая деградация материалов — при температурах ниже -40°C наблюдается значительное изменение механических характеристик алюминиевых сплавов и композитных материалов, используемых в авиастроении. Нейросетевые модели для таких условий должны быть обучены на данных, учитывающих температурную зависимость параметров прочности и усталости.
2. Коррозия от антиобледенительных реагентов — интенсивное использование химических реагентов для борьбы с обледенением приводит к ускоренной коррозии элементов планера и шасси. Нейросетевые системы диагностики позволяют прогнозировать развитие коррозионных процессов с учетом концентрации реагентов и температурных режимов.
3. Обледенение датчиков и измерительных систем — в условиях Крайнего Севера возникает проблема обледенения измерительных датчиков, что приводит к искажению данных.

Поэтому для условий эксплуатации АО «Авиакомпания «Якутия» необходимы специализированные архитектуры нейронных сетей:

1. Температурно-адаптивные нейросетевые модели — архитектуры, которые динамически настраивают свои параметры в зависимости от текущих температурных условий. Это позволяет повысить точность диагностики при значительных колебаниях температур.
2. Мультимодальные сети для обработки гетерогенных данных — объединяют информацию от различных источников: бортовых датчиков, данных метеостанций, результатов визуального осмотра, что особенно важно в условиях ограниченной достоверности отдельных измерительных каналов.
3. Нейросетевые системы прогнозирования обледенения — специализированные архитектуры, прогнозирующие вероятность и интенсивность обледенения критических элементов конструкции метеоданных и параметров полета.

Внедрение нейросетевых систем диагностики в условиях Крайнего Севера связано с рядом практических проблем:

1. Ограниченная связь в удаленных регионах — многие аэропорты в арктической зоне имеют ограниченный канал связи, что затрудняет передачу больших объемов данных для централизованной обработки.
2. Дефицит квалифицированного персонала — в удаленных регионах Крайнего Севера огра-

ничено количество специалистов, способных интерпретировать результаты нейросетевой диагностики.

3. Сезонные колебания параметров — значительные сезонные изменения климатических условий требуют разработки нейросетевых моделей с адаптацией к сезонным факторам.

3.4. Объяснимость и доверие к нейросетевым системам диагностики

Одной из ключевых проблем внедрения нейросетевых систем диагностики в авиацию является недостаточная объяснимость их решений. Как отмечает профессор Судаков, «если человек сделал какое-то неправильное действие, он сможет объяснить свой поступок. Если мы говорим про нейросеть, то она выдает результат, но сама объяснить его не может». В авиации, где цена ошибки чрезвычайно высока, это ограничение становится серьезным барьером для широкого внедрения нейросетевых технологий.

Для решения этой проблемы разрабатываются методы объяснимого искусственного интеллекта (XAI — eXplainable Artificial Intelligence), которые позволяют интерпретировать решения, принимаемые нейросетевыми моделями. Как отмечается в исследованиях [7], «сейчас ситуация меняется, появляются объяснимые нейросети, когда мы можем отмотать назад и найти причины результата». Среди этих методов можно выделить:

1. LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) — метод, который позволяет объяснить поведение сложной нейросети локально линейной моделью, понятной для человека.
2. SHAP (SHapley Additive exPlanations) — метод, основанный на теории игр, который оценивает вклад каждого признака в итоговое решение модели.
3. Внимание-визуализации — позволяют понять, на какие части входных данных нейросеть «обращает внимание» при принятии решения.
4. Создание изначально интерпретируемых моделей — разработка специализированных архитектур нейронных сетей, которые сохраняют способность к сложным вычислениям, но при этом обеспечивают прозрачность принимаемых решений.

Развитие методов объяснимого ИИ позволит преодолеть барьер недоверия к нейросетевым системам и расширить область их применения в авиационной диагностике.

Дополнительным аспектом проблемы доверия является необходимость сертификации нейросетевых систем диагностики для использования в авиации. Существу-

ющие процедуры сертификации авиационной техники основаны на традиционных подходах к верификации и валидации систем, которые плохо применимы к нейросетям с их способностью к самообучению и изменению поведения в процессе эксплуатации. Разработка новых методов сертификации, учитывающих специфику нейросетевых технологий, является важным направлением дальнейших исследований.

Заключение

Проведенное исследование теоретических основ применения нейросетей для диагностирования повреждений авиационной техники позволило сформулировать следующие основные выводы:

1. Нейросетевые технологии обладают значительным потенциалом для повышения эффективности диагностики повреждений авиационной техники за счет способности анализировать большие объемы данных, выявлять сложные нелинейные зависимости и адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации.
2. Биологические принципы организации нервной системы человека являются теоретическим фундаментом для разработки искусственных нейронных сетей, способных решать сложные задачи диа-

гностики аналогично тому, как человеческий мозг решает задачи распознавания образов и принятия решений в условиях неполной информации.

3. Эксплуатация авиационной техники в арктических условиях характеризуется специфическими факторами повреждения, требующими разработки специализированных нейросетевых архитектур, учитывающих температурную зависимость механических свойств материалов, интенсивность коррозионных процессов и особенности обледенения.
4. Ключевой проблемой широкого внедрения нейросетевых систем диагностики в авиацию является недостаточная объяснимость принимаемых ими решений. Активное развитие методов объяснимого искусственного интеллекта позволяет постепенно преодолевать этот барьер.
5. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются: разработка нейросетевых моделей для прогнозирования остаточного ресурса авиационной техники, создание методов обучения с небольшим количеством размеченных данных, интеграция нейросетевых систем с цифровыми двойниками летательных аппаратов, разработка стандартов и процедур сертификации нейросетевых систем диагностики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саввина А.М. Повышение уровня эксплуатационной технологичности самолетов в условиях АО «Авиакомпания «Якутия» // Материалы VII Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте. В 2-х томах. Опер., 2021. С. 437–447. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47900849> (дата обращения: 25.03.2025).
2. Саввина А.М. Управление процессами восстановления авиационной техники с использованием системы автоматизированного проектирования в условиях авиаремонтного предприятия. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2016. 22 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30431482>.
3. Горбунов В.П., Рухлинский В.М., Саввина А.М. Роль природных и антропогенных факторов в современном состоянии региональной авиации Арктики и Крайнего Севера // Журнал «Наука и бизнес: Пути развития». №6(108). 2020. С.32–37. URL: [http://globaljournals.ru/assets/files/journals/science-and-business/108/sb-6\(108\)-2020-main.pdf](http://globaljournals.ru/assets/files/journals/science-and-business/108/sb-6(108)-2020-main.pdf) (дата обращения 23.08.2025)
4. Первая медицинская помощь. — М.: Большая Российская энциклопедия, 1994.
5. Хлопков Ю.И. Применение искусственных нейронных сетей в гиперзвуковой аэродинамике // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. №4–1. С.45–49. URL: <https://applied-research.ru/article/view?id=6581> (дата обращения: 07.10.2025).
6. Руководство по технической эксплуатации RRJ-95 (8-е изд.). — М: ПАО «Яковлев». 2025.
7. Судаков В. Искусственный интеллект в авиации: настоящее и будущее нейросетей // Сетевое издание Techinsider: сайт. URL: <https://www.techinsider.ru/technologies/1651425-kak-iskusstvennyi-intellekt-uchitsya-letat-nastoyashchee-i-budushchee-neirosetei-v-aviacii/> (дата обращения: 07.10.2025).
8. Три метода обучения нейросетей: с учителем, без учителя, с подкреплением // сервиса «Яндекс.Практикум»: сайт. URL: <https://practicum.yandex.ru/blog/mashinnoe-obuchenie-s-uchitelem-i-bez/> (дата обращения: 07.10.2025).
9. Гавриков М. Как нейросети и аналитика данных делают авиаперелеты комфортными // Медиа Хайтек: сайт. URL: <https://hightech.fm/2024/09/04/data-avia-comfort> (дата обращения: 07.10.2025).
10. Настоящее и будущее нейросетей в авиации // Masterok. 2024. URL: <https://masterok.livejournal.com/10987522.html> (дата обращения: 07.07.2025).
11. Стручкова А.М. Оптимальное проектирование и управление восстановлением работоспособности самолета в условиях крайнего севера // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 10. с. 89–95. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40532> (дата обращения: 01.11.2025).
12. Gorbunov V., Kuznetsov S., Savvina A., Poleshkina I. Methodological aspects of avionics reliability at low temperatures during aircraft operation in the Far North and the Arctic // Transportation Research Procedia Vol. 57. 2021. p. 220–229. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47516602>. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.045.
13. Саввина А.М. Предложение по модернизации бортовой системы технического обслуживания самолета SSJ 100 // Международный информационно-аналитический журнал «Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык». № 3 (22). Сентябрь 2019. URL: <http://if-mstuca.ru/CE/index.php/050000/ppmbssossj100>

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ФЕРРИТОВОГО ПОЛОСКОВОГО ЦИРКУЛЯТОРА ДЛЯ СВЧ-ПРИЛОЖЕНИЙ

MODELING AND OPTIMIZATION OF A FERRITE STRIPLINE CIRCULATOR FOR MICROWAVE APPLICATIONS

G. Tokin
S. Kuznetsov
D. Zhelyaleva

Summary. Ferrite stripline circulators are widely used in modern electronics due to their unique properties: low signal loss, high isolation, and the ability to transmit signals directionally. This paper examines the research and design of ferrite-garnet stripline circulators operating in the millimeter-wave range. The theoretical foundations of the operation of these devices are presented, and methods for analyzing magnetostatic fields and wave processes in ferrite are described. The influence of geometric structure parameters and material properties on the circulator's performance is studied.

A detailed design optimization algorithm is presented, allowing for minimizing signal loss and increasing the degree of isolation between ports. Graphs of the transmission coefficient, isolation level, and insertion loss as functions of frequency are obtained.

The presented formulas demonstrate the high accuracy of the developed model and confirm its applicability for the design of efficient circulating elements.

Keywords: microstrip circulator, microwave devices, ferrite materials, ferromagnetic resonance, microstrip lines, Maxwell's equations, finite element method.

Токин Георгий Михайлович

Аспирант, Национальный исследовательский технологический университет МИСИС

njrb@mail.ru

Кузнецов Сергей Федорович

ФГБОУ ВО МИРЭА — Российский технологический университет
sfkuznetsov@istok.ad

Желялева Динара Рамилевна

ФГБОУ ВО МИРЭА — Российский технологический университет
drzhelyaleva@istok.ad

Аннотация. Ферритовые полосковые циркуляторы широко используются в современной радиоэлектронике благодаря своим уникальным свойствам: малым потерям сигнала, высоким коэффициентом развязки и способности направленно передавать сигналы. Данная работа посвящена исследованию и проектированию феррит-гранатовых полосковых циркуляторов миллиметрового диапазона длин волн. Представлены теоретические основы функционирования устройств подобного типа, описаны методы анализа магнитостатических полей и волновых процессов в феррите. Проведено исследование влияния геометрических параметров структуры и свойств материала на рабочие характеристики циркулятора.

Приведен подробный алгоритм оптимизации конструкции, позволяющий минимизировать потери сигнала и увеличить степень развязки между портами. Получены графики зависимостей коэффициента передачи, уровня развязки и вносимых потерь от частоты.

Представленные формулы демонстрируют высокую точность разработанной модели и подтверждают её применимость для проектирования эффективных циркулирующих элементов.

Ключевые слова: микрополосковый циркулятор, СВЧ приборы, ферритовые материалы, ферромагнитный резонанс, микрополосковые линии, уравнение Максвелла, метод конечных элементов.

Введение

Одним из наиболее важных и часто применяемых в СВЧ технике приборов является полосковый ферритовый циркулятор. Циркулятор подразумевает под собой многоплечевое (многополюсное) устройство для направленной передачи энергии электромагнитных колебаний. Подведенная к одному из существующих плеч энергия передаётся в другое, в конкретное, плечо в порядке их очередности. Функционал полоскового циркулятора заключается в ферромагнитном резонансе (ФМР), возникающим в ферритовых материалах при воздействии с магнитным полем. При определенных условиях, когда частота электромагнитного

поля совпадает с собственной частотой ферромагнитного резонанса, возникает значительное изменение импеданса материала, что позволяет реализовать однонаправленность прохождения сигнала. [1].

У циркуляторы популярны в применении их в антенно-фидерных трактах. Они используются для переключения режимов приема и передачи антенны, также модуля сложной фазированной решетки.

Моделирование процесса распространения волн

Для моделирования процессов распространения волн в полосковом ферритовом циркуляторе использу-

ются системы уравнений Максвелла (1) и методы численного анализа.

$$\begin{cases} \nabla \times E = -j\omega\mu H \\ \nabla \times H = j\omega\varepsilon E \end{cases} \quad (1)$$

где:

- E, H , — векторы поля;
- ω — угловая частота;
- ε — диэлектрическая проницаемость подложки

Используя метод конечных элементов, можно построить трехмерную модель циркулятора и проанализировать распределение полей внутри устройства. Это позволяет определить оптимальные размеры и конфигурацию полосок для минимизации потерь, и повышения эффективности. Этот метод позволяет решать дифференциальные уравнения, определяющие электромагнитные поля, путем деления исследуемой области на небольшие элементы и аппроксимации решений на каждом элементе [2].

Шаги метода конечных элементов:

1. Разбиение геометрии: Устройство делится на мелкие элементы, каждый из которых имеет простую форму (например, тетраэдры).
2. Аппроксимация функций: Электромагнитные поля представляются как линейные комбинации базисных функций, определенных на элементах сетки.
3. Формулировка слабых форм уравнений: Уравнения Максвелла преобразуются в интегральные выражения, называемые слабыми формами.
4. Решение системы уравнений: Полученная система алгебраических уравнений решается численно, используя итерационные методы.

Циркулятор описывается матрицей рассеяния \hat{S} размером 3×3 (для трёхплечего устройства) по формуле (2):

$$\hat{S} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Идеальные свойства:

- прямые потери: $|S_{21}| = |S_{32}| = |S_{13}| \approx 0$ дБ;
- развязка: $|S_{12}| = |S_{23}| = |S_{31}| \ll -20$ дБ;
- отражение: $|S_{11}| = |S_{22}| = |S_{33}| \ll -15$ дБ.

На низких частотах используют цепную модель как в формуле (3) с:

- индуктивностями, имитирующими ферритовый диск;
- ёмкостями полосковых линий;
- взаимоиנדукциями, отражающими невзаимность [3].

$$Z_{BX} = j\omega L + \frac{1}{j\omega C} + j\omega M \quad (3)$$

где M — невзаимная взаимоиндукция

Параметры модели

При моделировании важно учитывать следующие ключевые параметры:

- Геометрические характеристики: Толщина и ширина полосок, расстояние между ними.
- Материал: Электрические и магнитные свойства феррита, диэлектрической подложки и проводников.
- Частота: Рабочая частота устройства определяет длину волны и соответствующие резонансные эффекты.
- Направления распространения: Анализируются направления прихода и ухода волн, определяемые геометрией и ориентацией постоянных магнитных полей [4].

Цель моделирования состоит в определении распределения электрических и магнитных полей внутри устройства, оценке коэффициентов отражения и пропускания, а также расчете потерь мощности. Типичные результаты включают:

- Распределение напряженности электрического и магнитного полей.
- Диаграмму направленности антенны (если применимо).
- Коэффициенты рассеяния (S -параметры) для оценки характеристик передачи и отражения.

Метод конечных элементов применяется в различных областях электроники, включая проектирование антенн, фильтров, резонаторов и микрополосковых линий. Например, при разработке полоскового ферритового циркулятора этот метод позволяет точно рассчитать коэффициент изоляции, уровень обратных потерь и рабочую полосу частот.

Таким образом, точное моделирование процесса распространения волн играет ключевую роль в создании высокоэффективных микроволновых устройств, используемых в современных коммуникациях и радиолокационной технике [5].

Моделирование ферритового материала

Для проектирования Y циркулятора прежде всего необходимо выбрать ферритовый материал. От его материала зависят такие характеристики как: стабильность электрических параметров в диапазоне температур, ширина полосы рабочих частот, прямые потери и развязка между плечами [6].

Большинство ферритовых марок имеют «доменный» резонанс и собственный ферромагнитный резонанс создают единую размытую по частоте область существенного поглощения СВЧ энергии в слабых полях для того, чтобы обеспечить малые потери в слабых полях рабочая частота f обязана быть больше значения $f_{\text{макс}}$, определяющего высокочастотную границу этой области (4):

$$f < f_{\text{макс}} = (H_a + M_s) \quad (4)$$

где γ — гиромагнитное отношение, его значение равно 2,8 МГц/Э,

H_a — внутреннее поле анизотропии феррита,

M_s — намагниченность насыщения феррита.

Вовремя проектирования ферритового циркулятора, необходимо правильно подобрать марку феррита, он должен соответствовать требованиям намагниченность насыщения феррита (5):

$$M_s \leq \frac{f}{1,2 \cdot \gamma} - H_a \quad (5)$$

Вовремя работы прибора данное условие обязано выполняться на нижней частоте рабочего диапазона частот [7].

Для исключения потерь в слабых полях намагниченность насыщения феррита обязана выполнять требования условию (6):

$$M_s \leq \frac{f_{\text{мин}}}{\gamma} - H_a \quad (6)$$

где $f_{\text{мин}}$ — минимальная частота рабочего диапазона, его значения не превышает ± 10 –15 % от среднего значения.

Таблица 1.

Параметры феррита марки НМ-160К

Наименование	Обозначение	Измеренное значение	Погрешность измерений
Диэлектрическая проницаемость	ε	13,2	$\pm 2\%$
Магнитная проницаемость	μ	0,8	$\pm 0,01\%$
Тангенс угла диэлектрических потерь	$\text{tg}\delta_\varepsilon$	$3 \cdot 10^{-4}$	$\pm 2,5 \cdot 10^{-5}\%$
Тангенс угла магнитных потерь	$\text{tg}\delta_\mu$	$9 \cdot 10^{-3}$	$\pm 2,5 \cdot 10^{-5}\%$
Намагниченность насыщения	M_s	162 кА/м	$\pm 5\%$

На основе математических условий (1)–(3) для разработки устройства Y-циркулятора с центральной частотой 10 ГГц необходимо использовать феррит марка НМ-160К, он наиболее подходящий, представляет из себя кристаллическую структуру шпинели с добавлением меди, никеля [8]. Параметры данного материала показаны в таблице 1.

Моделирование микрополосковой линии

Ширина подводящего полоска позволяет обеспечить качественное согласование разрабатываемого прибора с другими элементами СВЧ тракта. Расчет производится на волновом сопротивлении 50 Ом:

1. Расчет волнового числа (7):

$$k = \frac{c}{4 \cdot f_{\text{ц}} \cdot \sqrt{\varepsilon}}, \quad (7)$$

где c — скорость света;

ε — диэлектрическая проницаемость ферритовой подложки;

$f_{\text{ц}}$ — центральная частота микрополоскового ферритового развязывающего прибора.

2. Проверка выполнения условия не возникновения поперечной волны (8):

$$h \leq k \quad (8)$$

3. Вычисление коэффициента j по формуле (9):

$$j = \frac{75 \cdot 10^9}{f_{\text{ц}} \cdot \sqrt{\varepsilon} - 1} \quad (9)$$

4. Проверка выполнения условия не возникновения волн высшего типа HE_1 по формуле (10):

$$h \leq j \quad (10)$$

5. Вычисление частоты поперечного резонанса по формуле (11):

$$F = \frac{107,5}{h \cdot \sqrt{\varepsilon}} \quad (11)$$

6. Проверка выполнения условия не возникновения поперечного резонанса, по формуле (12):

$$f_{\text{ц}} < F \quad (12)$$

7. Вычисление коэффициента d по формуле (13):

$$d = \frac{Z_{\text{в}}}{60} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon + 1}{2}} + (\varepsilon - 1) \cdot \left(\frac{0,226 + \frac{0,12}{\varepsilon}}{\varepsilon + 1} \right), \quad (13)$$

где $Z_{\text{в}}$ — требуемая величина волнового сопротивления полосков.

8. Расчет ширины полоска, который обеспечит необходимую величину волнового сопротивления, рассчитывается по формуле (14):

$$w = \frac{8 \cdot h}{(e^d - 2 \cdot e^{-d})}, \quad (14)$$

где e — число Эйлера, его значение 2,718 [9].

В данной работе были рассчитаны микрополосковая линия и толщина ферритовой подложки НМ-160К:

- а) Ширина МПЛ = 552 мкм;
- б) Толщина феррита = 700 мкм.

С учетом данной математической модели был смоделирован полосковый Y-циркулятор в X-диапазоне с параметрами (рисунок 1):

- а) диэлектрическая проницаемость феррита, $\epsilon = 13,2$;
- б) полоса рабочих частот = 18,8 %.
- в) намагниченность насыщения феррита, $4\pi M_s = 2035 \text{ Гс}$;
- г) толщина подложки, $h = 0,7 \text{ мм}$;
- д) Гирротропия = 0,694.

5 параметры полученные в ходе моделирования прибора представлены на рисунке 2

Разработанная модель микрополоскового циркулятора на подложке из феррита марки НМ-160К имеет прямые потери 0,5 дБ развязку в районе 25 дБ и КСВН равную 1,3 что полностью удовлетворяет требованиям к данным приборам [10].

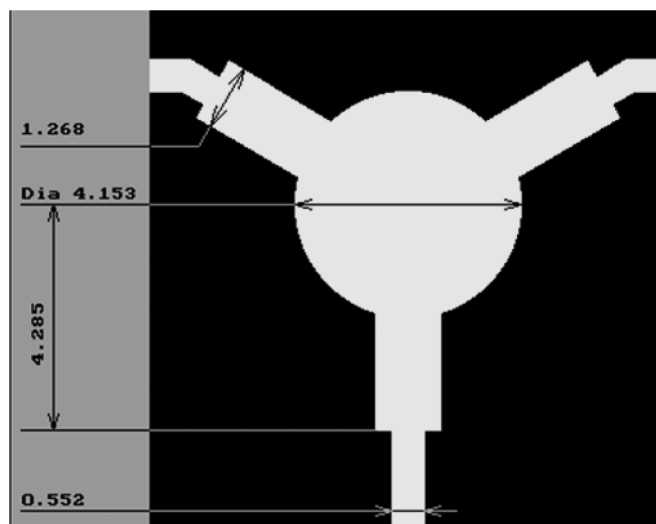


Рис. 1. Модель Y-циркулятора с граничными условиями

Заключение

Ферритовые полосковые циркуляторы представляют собой перспективные устройства для применения в микроволновых системах. Правильный выбор материалов, точная геометрия и использование эффективных методов моделирования обеспечивают высокие эксплуатационные характеристики данных устройств

В данной работе была продемонстрирована математическая модель Y-циркулятора в X-диапазоне с расчетными параметрами полностью удовлетворяющими техническими характеристиками прибора.

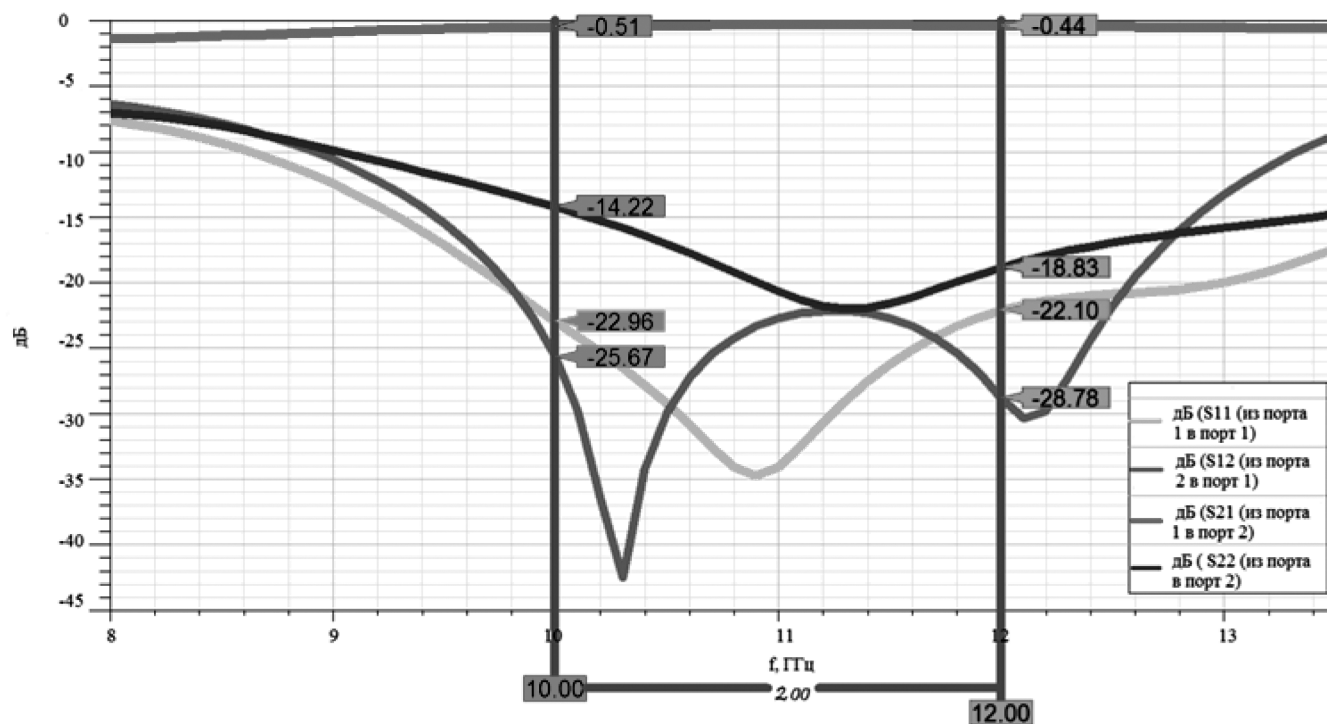


Рис. 2. S-параметры Y-циркулятора

ЛИТЕРАТУРА

1. Современная микроэлектроника: тенденции развития, проблемы и угрозы / А.И. Белоус, В.А. Лабунов // Тезисы докладов конференции, освещающие актуальные вопросы разработки, производства и применения электронной компонентной базы и электронных модулей. — 2019.
2. Развитие СВЧ-электроники в России. / С.В. Щербаков // Материалы научно-технической конференции «СВЧ-электроника — 2016». Фрязино, — 2016. — 18–19 мая
3. URL:<https://cernexwave.com/wp-content/uploads/2020/01/Cernexwave-Microstrip-Dual-junction-Circulator.pdf> \ Электронный каталог компании «CernexWave». (Дата обращения 04.09.2023)
4. В.А. Сергеев, Р.Г. Тарасов, А.А. Куликов Диагностика качества выходных усилителей мощности приемо-передающих модулей АФАР по температурным полям / Сергеев В.А., Тарасов Р.Г., Куликов А.А. // Электроника и электронные устройства — 2019. — №1(55). — 112–117с.
5. Метрологическое обеспечение производства и разработок ферритов для приборов СВЧ-электроники / Налогин А.Г., Семенов М.Г., Мясников А.В., Семенов А.С., Панков Р.П., Пархоменко М.П., Каленов Д.С., Федосеев Н.А., Налогин И.А., Троицкая Л.А. // Тезисы докладов Юбилейной научно-технической конференции АО «НПП «Исток» им. Шокина». — 2018. — с. 109.
6. Микрополосковые ферритовые развязывающие приборы миллиметрового диапазона длин волн с улучшенными характеристиками / А.С. Семенов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — 2020.
7. Бородин В.Н., Козлов В.А., Михалицын Е.А., Сорокин А.В. Автоматизированное проектирование ферритовых циркуляторов на сосредоточенных элементах // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. — 2020. — Т. 63, № 5. — С. 312–321.
8. Крехтунов В.М., Комиссарова Е.В., Русов Ю.С. Исследование ферритовых СВЧ устройств: учебно-методическое пособие. — Новосибирск: НГТУ, 2020. — 84 с. — ISBN 978-5-7782-4210-9.
9. Крехтунов В.М., Комиссарова Е.В., Русов Ю.С. Исследование ферритовых СВЧ устройств: учебно-методическое пособие. — Новосибирск: НГТУ, 2020. — 84 с. — ISBN 978-5-7782-4210-9.
10. Мациевский С.В., Каминский В.И. Моделирование характеристик гибридного ускорителя электронов с питанием от автогенератора через ферритовый циркулятор // Радиотехника и электроника. — 2022. — Т. 67, № 4. — С. 345–352.

© Токин Георгий Михайлович (njrb@mail.ru); Кузнецов Сергей Федорович (sfkuznetsov@istok.ad);

Желялева Динара Рамилевна (drzhelyaleva@istok.ad)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОБ ИНТЕГРИРОВАНИИ ОДНОГО ЧЕТЫРЁХПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КЛАССА ДРОБНО-ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Хакимова Зилия Наильевна

Кандидат физико-математических наук, доцент,
Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского
vka@mil.ru

ON THE INTEGRATION OF ONE FOUR-PARAMETER CLASS OF FRACTIONAL-POLYNOMIAL ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS

Z. Khakimova

Summary. This article discusses various classes of ordinary differential equations of the 2nd order — power, polynomial and fractional-polynomial types. Using the method of discrete invariants and their generalizations, several three-parameter classes of ordinary differential equations with power and polynomial right-hand sides, as well as (for the first time) a four-parameter class of equations with fractional-polynomial right-hand sides, were integrated.

A way is indicated for «multiplying» the found solvable subclasses of equations by a discrete group of transformations in the class of fractional-polynomial ordinary differential equations and obtaining new solvable subclasses of equations.

Keywords: ordinary differential equation, exact solution of an ordinary differential equation, discrete transformation group, dihedral group, invariant of a discrete transformation, concomitant, classes of power, polynomial and fractional-polynomial differential equations.

Аннотация. В данной статье рассматриваются различные классы обыкновенных дифференциальных уравнений 2-го порядка — степенного, полиномиального и дробно-полиномиального вида. С помощью метода дискретных инвариантов и их обобщений проинтегрированы несколько трёхпараметрических классов обыкновенных дифференциальных уравнений со степенными и полиномиальными правыми частями, а также (впервые) четырёхпараметрический класс уравнений с дробно-полиномиальными правыми частями.

Указан путь «размножения» найденных разрешимых подклассов уравнений по дискретной группе преобразований в классе дробно-полиномиальных обыкновенных дифференциальных уравнений и получения новых разрешимых подклассов уравнений.

Ключевые слова: обыкновенное дифференциальное уравнение, точное решение обыкновенного дифференциального уравнения, дискретная группа преобразований, группа диэдра, инвариант дискретного преобразования, конкомитант, классы степенных, полиномиальных и дробно-полиномиальных дифференциальных уравнений.

Введение

Дискретные группы преобразований для обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) были открыты В.Ф. Зайцевым в 70-х годах прошлого столетия. Разработанный им дискретно-групповой анализ (ДГА) ОДУ был опубликован в его первых, депонированных, монографиях [1, 2].

ДГА ОДУ дал плоды: были получены точные решения первых сотен новых дифференциальных уравнений, принадлежащих исследуемым классам уравнений [3].

Один из первых классов уравнений, исследованный В.Ф. Зайцевым достаточно полно, — это трёхпараметрический класс обобщённых уравнений Эмдена-Фаулера (ОУЭФ):

$$y''_{xx} = Ax^k y' (y'_x)^m, \quad (1)$$

для которого в результате применения ДГА были получены точные решения 99 уравнений и подклассов уравнений.

В работе [4] степенной класс уравнений (1) был обобщён введением четвёртого параметра « n »:

$$y''_{xx} = Ax^k y' (y'_x)^m (xy'_x - y)^n. \quad (2)$$

Методом «размножения» интегрируемых случаев класса уравнений (1) в работе [4] были найдены несколько сотен разрешимых уравнений и подклассов в классе уравнений (2). Стоит отметить, что среди них оказались и 18 новых разрешимых ОУЭФ (1) [4, 5], точные решения которых опубликованы в справочнике [6]. Таким образом, для получения этих 18 разрешимых уравнений, помимо метода «размножения», использовался также метод «вложения» класса уравнений (1) в расширенный класс уравнений (2).

Кроме метода «размножения», для получения точных решений ОДУ используется также метод дискретных инвариантов. С его помощью были проинтегрированы несколько подклассов классов уравнений 2-го порядка (1) и (2), инвариантных относительно некоторых дискрет-

ных преобразований, а также их обобщения [3, 7-12]. Рассматривались также и мультипликативные уравнения 2-го и 3-го порядков, в том числе и с произвольными функциями.

В данной статье с помощью обобщения дискретно-инвариантного преобразования, понижающего порядок уравнений, впервые был получен разрешимый четырёхпараметрический класс уравнений дробно-полиномиального вида. Ранее был найден лишь трёхпараметрический интегрируемый класс уравнений степенного вида [7].

Также в статье найдены два новых интегрируемых трёхпараметрических класса уравнений с полиномиальными правыми частями.

Инвариант преобразования Лежандра

Рассмотрим известное преобразование Лежандра, которое является образующей дискретной циклической группы 2-го порядка:

$$\mathbf{I}: x \rightleftharpoons y'_x, y \rightleftharpoons xy'_x - y, \mathbf{I}^2 = \mathbf{E}, \quad (3)$$

где \mathbf{E} — тождественное преобразование.

Это дискретное преобразование замкнуто в классе уравнений (2). Обозначим класс уравнений (2) вектором параметров: $(k, l, m, n \mid A)$. Тогда

$$\mathbf{I}: (k, l, m, n \mid A) \rightarrow \left(-m, -n, -k, -l \mid \frac{1}{A} \right). \quad (4)$$

Если приравнять соответствующие параметры в (4), то получится \mathbf{I} -инвариант в классе уравнений (2) с точностью до коэффициента:

$$y''_{xx} = A \left(\frac{y'_x}{x} \right)^k \left(\frac{xy'_x - y}{y} \right)^l \text{ или } (-k, -l, k, l \mid A). \quad (5)$$

Исследуем преобразование

$$\mathbf{K}_1: \theta = \frac{y'_x}{x}, V = \frac{xy'_x - y}{y}, \quad (6)$$

являющееся \mathbf{I} -конкомитантом — согласованным совместным инвариантом преобразования \mathbf{I} . Преобразование (6) является инвариантным относительно \mathbf{I} с точностью до инверсии.

Найдём уравнение, которое с помощью преобразования (6) приводится к уравнению с разделяющимися переменными

$$\dot{V}_\theta = A \theta^k V^l. \quad (7)$$

Для этого из (6) найдем \dot{V}_θ :

$$\dot{V}_\theta = \frac{xyy''_{xx} - y'_x(xy'_x - y)}{xy''_{xx} - y'_x}. \quad (8)$$

Подставив (6) и (8) в (7), получим уравнение с дробно-полиномиальной правой частью:

$$\frac{xy''_{xx}}{y'_x} = \frac{Ax^{-k-2}y^{2-l}(y'_x)^k(xy'_x - y)^l - (xy'_x - y)}{Ax^{-k-2}y^{2-l}(y'_x)^k(xy'_x - y)^l - y}. \quad (9)$$

Класс уравнений (9) с помощью конкомитанта (6) приводится к классу уравнений с разделяющимися переменными (7).

Для конкомитанта \mathbf{K}_1 (6) можно найти обратное преобразование:

$$\mathbf{K}_1^{-1}: x = C_1 e^{\int F d\theta}, \quad (10)$$

$$y = C_1^2 \int e^{2 \int F d\theta} \theta F d\theta + C_2, F(\theta, V) = \frac{1 + V - \theta \dot{V}}{\theta(V^2 - 1)}.$$

Если в (10) подставить общее решение уравнения (7), то получим общее решение уравнения (9).

Этот результат обобщается: вместо уравнения (7) можно взять произвольное разрешимое уравнение 1-го порядка

$$\dot{V}_\theta = f(\theta, V). \quad (11)$$

Тогда вместо (9) получим уравнение

$$\frac{xy''_{xx}}{y'_x} = \frac{f - \frac{xy'_x - y}{y} \cdot \frac{x^2}{y}}{f - \frac{x^2}{y}}, \quad (12)$$

общее решение которого есть композиция преобразования \mathbf{K}_1^{-1} (10) и общего решения уравнения (11).

Нахождение разрешимого четырёхпараметрического класса ОДУ 2-го порядка

В работе [7] был найден конкомитант

$$\mathbf{K}_r: \theta = xy, V = \frac{xy'_x - y}{(y'_x)^{\frac{1}{2}}} \quad (13)$$

относительно преобразования $\mathbf{r}: x \rightleftharpoons y$.

С помощью конкомитанта (13) точный \mathbf{r} -инвариант в классе уравнений (2) приводится к уравнению с разделяющимися переменными [7].

Конкомитант \mathbf{K}_r (13) допускает обобщение:

$$\theta = x^{k+1}y^{l+1}, V = \frac{xy'_x - y}{(y'_x)^{\frac{k+1}{k+l+2}}}. \quad (14)$$

С помощью преобразования (14) трёхпараметрический подкласс класса уравнений (2) также приводится к уравнению с разделяющимися переменными:

$$y''_{xx} = Ax^k y^l (y'_x)^{\frac{k(2-n)+l-n+3}{k+l+2}} (xy'_x - y)^n \rightarrow (15)$$

$$\rightarrow (k+l+2)\dot{V}_\theta = AV^n$$

Позже для преобразования (14) удалось найти обратное преобразование [8], благодаря чему было найдено общее решение трёхпараметрического класса уравнений (15).

Рассмотрим обобщение преобразования (14):

$$\theta = x^k y^l, V = (y'_x)^m (xy'_x - y)^n. \quad (16)$$

Перебирая различные функции f в уравнении с разделяющимися переменными (11), удалось найти функцию $f(\theta, V) = A \frac{\theta}{V}$ — такую, что к уравнению

$$\dot{V}_\theta = A \frac{\theta}{V}. \quad (17)$$

с помощью преобразования (16) приводится четырёхпараметрический класс уравнений:

$$y''_{xx} = \frac{Al}{m+n} \frac{x^{2k-1}y^{2l-1}(y'_x)^{1-2m}(xy'_x - y)^{1-2n} \left(xy'_x + \frac{k}{l}y \right)}{xy'_x - \frac{m}{m+n}y}. \quad (18)$$

Сделаем замену в показателях: $2k-1 \rightarrow k, 2l-1 \rightarrow l, 1-2m \rightarrow m, 1-2n \rightarrow n$.

Тогда получается следующий результат: четырёхпараметрический класс уравнений с дробно-полиномиальными правыми частями

$$y''_{xx} = \frac{Ax^k y^l (y'_x)^m (xy'_x - y)^n [(l+1)xy'_x + (k+1)y]}{(2-m-n)xy'_x + (m-1)y} \quad (19)$$

с помощью преобразования

$$\theta = x^{\frac{k+1}{2}} y^{\frac{l+1}{2}}, V = (y'_x)^{\frac{1-m}{2}} (xy'_x - y)^{\frac{1-n}{2}} \quad (20)$$

приводится к уравнению с разделяющимися переменными

$$\dot{V}_\theta = A \frac{\theta}{V}. \quad (21)$$

Разрешимые трёхпараметрические подклассы класса уравнений (19) степенного и полиномиального вида

Дробно-полиномиальный класс уравнений (19) превращается в полиномиальный в частных случаях, когда знаменатель в правой части (19) сокращается с одним из множителей числителя.

Это происходит в одном из четырёх случаев:

- 1) $\frac{k+1}{l+1} = \frac{m-1}{2-m-n}$;
- 2) $\frac{m-1}{2-m-n} = -1, n=1$;
- 3) $m=1$;
- 4) $2-m-n=0$, т.е. $n=2-m$.

В случае 1) получается приведенный в (15) трёхпараметрический класс уравнений.

В случае 2) имеем следующий результат: класс уравнений

$$y''_{xx} = \frac{A(l+1)}{1-m} x^k y^l (y'_x)^m \left(xy'_x + \frac{k+1}{l+1}y \right) \quad (22)$$

с помощью преобразования

$$\theta = x^{\frac{k+1}{2}} y^{\frac{l+1}{2}}, V = (y'_x)^{\frac{1-m}{2}}$$

приводится к уравнению (21)

В случае 3) класс уравнений (при замене $k \rightarrow k+1$)

$$y''_{xx} = \frac{A(l+1)}{1-n} x^k y^l (xy'_x - y)^n \left(xy'_x + \frac{k+2}{l+1}y \right) \quad (23)$$

с помощью преобразования

$$\theta = x^{\frac{k+2}{2}} y^{\frac{l+1}{2}}, V = (xy'_x - y)^{\frac{1-n}{2}}$$

приводится к уравнению с разделяющимися переменными (21).

В случае 4) класс уравнений (при замене $l \rightarrow l+1$)

$$y''_{xx} = \frac{A(l+2)}{m-1} x^k y^l (y'_x)^m (xy'_x - y)^{2-m} \left(xy'_x + \frac{k+1}{l+2}y \right) \quad (24)$$

с помощью преобразования

$$\theta = x^{\frac{k+1}{2}} y^{\frac{l+2}{2}}, V = \left(\frac{xy'_x - y}{y'_x} \right)^{\frac{m-1}{2}}$$

также приводится к уравнению (21).

Отметим, что трёхпараметрический подкласс в (15) класса уравнений (19) имеет степенной вид, а (22), (23) и (24) — полиномиальный.

«Размножение» полученных результатов

В статье [13] был проведён ДГА класса ОДУ 2-го порядка дробно-полиномиального вида:

$$y''_{xx} = \frac{\sum_{i=1}^p A_i x^{k_i} y^{l_i} (y'_x)^{m_i} (xy'_x - y)^{n_i}}{\sum_{i=p+1}^{2p} A_i x^{k_i} y^{l_i} (y'_x)^{m_i} (xy'_x - y)^{n_i}}. \quad (25)$$

Для класса уравнений (25) была найдена дискретная группа (диэдра) преобразований, замкнутых в этом классе уравнений:

$$D_6 = \{E, h, h^2, h^3, h^4, h^5, r, hr, h^2r, h^3r, h^4r, h^5r\}, \\ r^2 = h^6 = (hr)^2 = E,$$

где

$$r: x \rightleftharpoons y, h: x \rightarrow \frac{1}{y'_x}, y \rightarrow -\frac{xy'_x - y}{y'_x}. \quad (26)$$

Поскольку класс уравнений (19) принадлежит общему классу дробно-полиномиальных уравнений (25), то к нему применима дискретная группа преобразований D_6 (26) 12-го порядка. Следовательно, с помощью преобразований группы D_6 из разрешимого класса уравнений (19) можно найти ещё 11 разрешимых четырёхпараметрических классов уравнений. Аналогичное можно сказать о трёхпараметрических классах уравнений (15), (22), (23) и (24).

Заключение

В данной статье впервые проинтегрирован четырёхпараметрический класс ОДУ 2-го порядка дробно-полиномиального вида, а также его трёхпараметрические подклассы степенного и полиномиального вида, один из которых был найден ранее [7].

«Размножение» полученных разрешимых классов уравнений (19), (15), (22), (23), (24) по найденной дискретной группе 12-го порядка — это ближайшая перспектива дальнейших исследований в данном направлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайцев В.Ф. Дискретно-групповые методы теории дифференциальных уравнений // Деп. ВИНТИ № 5739-82. — 1982. — 130 с.
2. Зайцев В.Ф., Кормилицына Т.В. Дискретно-групповые методы теории дифференциальных уравнений, ч. 2 // Деп. ВИНТИ № 3720-85. — 1985. — 152 с.
3. Зайцев В.Ф. Справочник по нелинейным дифференциальным уравнениям. Приложения в механике, точные решения / В.Ф. Зайцев, А.Д. Полянин — М.: Наука, 1993. — 464 с.
4. Хакимова З.Н. Классификация новых разрешимых случаев в классе полиномиальных дифференциальных уравнений / З.Н. Хакимова, О.В. Зайцев // Актуальные вопросы современной науки, №3. — СПб., 2014. — С. 3–11.
5. Хакимова З.Н. Выбор класса дифференциальных уравнений для нахождения новых разрешимых случаев / З.Н. Хакимова // Некоторые актуальные проблемы современной математики и математического образования: материалы научной конференции «Герценовские чтения — 2017». — СПб.: РГПУ, 2017. — С. 112–117.
6. Polyanin A.D. Handbook of Ordinary Differential Equations: Exact Solutions, Methods, and Problems / A. D. Polyanin, V. F. Zaitsev. — CRC Press. Boca Raton — London, 2018. — 1496 p. DOI: 10.1201/9781315117638
7. Хакимова З.Н. Интегрирование дискретных инвариантов в классе полиномиальных дифференциальных уравнений 2-го порядка / З.Н. Хакимова // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, 2014 — С. 57–62.
8. Хакимова З.Н. Симметрии и интегрирование уравнений орбиты одного дискретно-инвариантного дифференциального уравнения второго порядка степенного вида / З.Н. Хакимова, М.А. Лисицына // Перспективы науки. — Тамбов: ТМБпринт. — 2024. — № 8 (179). — С. 51–55.
9. Хакимова З.Н. Интегрирование дифференциальных уравнений с помощью инвариантов дискретных преобразований [Электронный ресурс] / З.Н. Хакимова, А.А. Атоян // Дифференциальные уравнения и процессы управления. — 2024. — N 3. — С. 123–133. — URL: <https://diffjournal.spbu.ru/RU/numbers/2024.3/article.1.8.html> (дата обращения: 21.12.2025)
10. Хакимова З.Н. О дискретно-инвариантных классах обыкновенных дифференциальных уравнений 2-го порядка // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Математика и математическое образование в современном обществе». — СПб.: РГПУ, 2025. — С. 35–38.
11. Хакимова З.Н. Интегрирование мультипликативных классов обыкновенных дифференциальных уравнений с помощью дискретных инвариантов // Сборник трудов Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики». — Воронеж, 2024. — С. 146–150.
12. Хакимова З.Н. Дискретно-групповой анализ обыкновенных дифференциальных уравнений: методы получения точных решений уравнений [Электронный ресурс] / З.Н. Хакимова, Е.А. Шахова // Дифференциальные уравнения и процессы управления. — 2025. — N 3. — С. 154–162. — URL: <https://diffjournal.spbu.ru/RU/numbers/2025.3/article.1.9.html> (дата обращения: 21.12.2025)
13. Хакимова З.Н. Дробно-полиномиальные дифференциальные уравнения: дискретные группы и решения через трансцендент 1-го уравнения Пенлеве [Электронный ресурс] / З.Н. Хакимова, О.В. Зайцев // Дифференциальные уравнения и процессы управления. — 2021. — N 1(4). — С. 61–92. — URL: <https://diffjournal.spbu.ru/RU/numbers/2021.1/article.1.4> (дата обращения: 21.12.2025)

© Хакимова Зия Наильевна (vka@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВОЗМОЖНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СОГЛАСОВАНИЯ ДОКУМЕНТОВ В КОМПАНИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Черепанов Никита Владимирович

Кандидат технических наук,
Инженер АО им. С.А. Лавочкина
nv137@yandex.ru

POSSIBILITIES OF ORGANIZING THE PROCESS OF DOCUMENT APPROVAL IN A COMPANY BASED ON NEURAL NETWORK METHODS

N. Cherepanov

Summary. In article questions of the organization of coordination of documentation in the organization based on application of neural networks are considered. This approach can be used for optimization of process of coordination of documents in the company, increasing its efficiency and efficiency at the expense of the solution of the following tasks: automatic routing, identification of potential problems, a prediction of terms of coordination of the document, the automated notices, the analysis of moods, visualization of results. Besides it is possible to consider additional possibilities: the subjectivity analysis, a mood categorization, the comparative analysis of mood of comments from different groups or on different subjects. Criteria for training of a neural network for coordination of documents in the organization are considered.

Keywords: coordination of documents, routing of documents, text analysis, prediction of terms of coordination, automatic sending of notices, analysis of moods.

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы организации согласования документации в организации на основе использования технологий нейронных сетей. Этот подход может быть использован для оптимизации процесса согласования документов в компании, повышая его эффективность и оперативность за счёт решения следующих задач: автоматическая маршрутизация, выявление потенциальных проблем, предсказание сроков согласования документа, автоматизированные уведомления, анализ настроений, визуализация результатов. Кроме этого, можно рассмотреть дополнительные возможности: анализ субъективности, категоризация настроения, сравнительный анализ настроения комментариев из разных групп или по разным темам. Рассмотрены критерии для обучения нейронной сети для согласования документов в организации.

Ключевые слова: согласования документов, маршрутизация документов, анализ текста, предсказание сроков согласования, автоматическая отправка уведомлений, анализ настроений.

Согласование документов в организации всегда является трудным организационным и длительный процесс, который может значительно удлинить время выпуска документации. Нейронные сети (НС) могут помочь улучшить этот процесс за счёт следующих преимуществ:

- НС могут автоматически выявлять противоречия, ошибки и дублирования в документах, что снижает нагрузку на сотрудников и ускоряет процесс согласования.
- НС могут быть обучены на основе ранее разработанных документов, чтобы предсказывать результат одобрения или отклонения конкретного документа.
- НС могут обеспечить стандартный подход к согласованию документов.
- НС могут освободить рабочее время сотрудников для других работ.

Основным языком программирования для искусственных нейросетей является Python чаще всего совместно с платформами TensorFlow, PyTorch, Keras с большим набором инструментов, библиотек и ресурсов.

Нейронные сети могут быть тем инструментом, который изменит процесс согласования документов в компании в лучшую сторону. Для этого будут решаться следующие задачи: автоматическая маршрутизация, выявление проблем, предсказание сроков согласования, автоматически созданные уведомления, анализ настроений согласующих.

В качестве примеров применения можно рассматривать следующие подразделения:

- Экономические: НС может использоваться для автоматизации согласования финансовых документов.
- Юридический отдел: НС может использоваться для проверки договоров, соглашений и других

юридических документов на наличие ошибок или проблем.

- Кадровый: НС может использоваться для автоматизации кадровых изменений, приказов и других документов, связанных с персоналом.
- Руководители проектов: НС может использоваться для автоматизации согласования директивных документов, стандартов, материалов по проектам.

Нейронные сети могут быть использованы для создания системы автоматической маршрутизации документов для согласования. НС обучаются на архивных данных о согласовании документов, чтобы автоматически расписывать новые документы соответствующим лицам или отделам. Это может значительно сократить время, затрачиваемое на ручную маршрутизацию:

- НС могут обрабатывать большие объёмы документов, тем самым сокращая время, необходимое для их маршрутизации.
- НС могут быть обучены на больших наборах данных для точной классификации документов, что снижает риск отправки документов не тем адресатам [1].
- Систему на основе НС можно легко расширить для обработки растущего объёма документов.
- НС можно использовать для обеспечения соответствия нормативным требованиям при маршрутизации документов в соответствии со стандартами организации.

Нейронные сети (НС) могут быть использованы для анализа текста документов и выявления проблем, таких как несоответствия, противоречия и недостающая информация, которые могут привести к задержкам и отклонениям [2]. Решая эти проблемы, мы получим следующие преимущества:

- НС могут использоваться для точного выявления проблем в тексте на основе обучения на больших наборах данных, что помогает снизить риск пропуска важной информации.
- Сокращение времени для выявления проблем за счёт быстрого анализа текста документов нейронными сетями.
- Систему на основе НС можно легко развить для обработки растущего объёма документов.
- НС могут помочь улучшить качество документов, выявляя и устраняя проблемы до их публикации.
- НС можно обучить планировать время согласования документа на основе его типа, содержания, истории, подразделений, принимающих участие в согласовании таких документов.
- Нейронные сети могут быть использованы для предсказания времени, необходимого на согласования документа на основе его типа, содержания и истории согласования подобных документов и обеспечить сокращение времени согласования

документов за счёт более точного прогнозирования.

- НС могут помочь выявить документы, которые вызывают серьёзные замечания.
- НС могут помочь планированию согласования документов различных типов.
- Нейронные сети могут быть использованы для автоматических созданий уведомлений заинтересованным сторонам о статусе документа, сроках его согласования и дополнительных условиях.
- НС могут помочь повысить эффективность согласования за счёт автоматизации отправки уведомлений.
- НС могут помочь улучшить коммуникацию и понимание проблемы согласуемого документа между заинтересованными сторонами.
- НС могут помочь снизить задержки и отклонения за счёт своевременного уведомления заинтересованных сторон о проблемах.
- НС можно использовать для анализа настроения комментариев к документу, чтобы выявлять потенциальные проблемы или разногласия, которые могут потребовать внимания [3].

Выбор нейронной сети и метода обучения зависит от ряда факторов, таких как: тип документов, наличие данных, вычислительные ресурсы [4].

Для согласования документов могут быть использованы различные типы нейронных сетей. Свёрточные нейронные сети подходят для анализа изображений и текста, что делает их полезными для выявления противоречий и ошибок в документах. Рекуррентные нейронные сети подходят для анализа последовательностей данных, что делает их применимыми для предсказания вероятности одобрения или отклонения конкретного документа. Сети с прямым распространением могут быть использованы для классификации документов по категориям или для выявления ключевых тем.

Для обучения нейронных сетей, используемых для согласования документов, могут быть использованы различные методы [5]:

- Обучение с учителем: При обучении с учителем нейронная сеть получает набор размеченных примеров, где каждый пример содержит документ и его метку («одобрен», «отклонён» или «требуется доработка»). Сеть обучается на этих примерах, чтобы научиться правильно классифицировать новые документы.
- Обучение без учителя: При обучении без учителя нейронная сеть не получает размеченных примеров. Вместо этого она обучается на наборе неразмеченных документов и должна сама найти сходства и различия между ними.
- Обучение с подкреплением: При обучении с подкреплением нейронная сеть получает набор дей-

ствий, которые она может выполнять (например, одобрить документ, отклонить документ или запросить доработку). Сеть обучается выбирать действия, которые максимизируют её вознаграждение (например, уменьшение количества ошибок или ускорение процесса согласования).

При выборе критериев для обучения нейронной сети для согласования документов в организации необходимо учитывать ряд факторов:

- **Объем данных:** Для обучения надёжной нейронной сети требуется большой объем данных.
- **Качество данных:** Данные должны быть точными, полными и соответствовать формату, который может обрабатываться нейронной сетью.
- **Разнообразие данных:** Данные должны представлять все возможные типы документов и ситуации согласования, с которыми может столкнуться компания.
- **Точность:** Насколько важно, чтобы нейронная сеть принимала правильные решения о согласовании документов.
- **Скорость:** Как быстро нейронная сеть должна обрабатывать документы.
- **Простота использования:** Насколько просто сотрудникам будет использовать нейронную сеть.
- **Вычислительные ресурсы:** Сколько вычислительных ресурсов доступно для обучения и использования нейронной сети.
- **Навыки:** Есть ли у сотрудников компании навыки, необходимые для обучения и использования нейронной сети.
- **Прозрачность:** Как будет объясняться работа нейронной сети сотрудникам и клиентам.
- **Справедливость:** Как будет гарантироваться, что нейронная сеть не будет дискриминировать определённые группы людей.
- **Безопасность:** Как будут защищены данные, используемые для обучения и использования нейронной сети.

Важно тщательно выбрать критерии для обучения нейронной сети, поскольку они будут влиять на её производительность для использования в организации. При выборе критериев необходимо учитывать все перечисленные выше факторы.

Есть несколько специфичных примеров критериев, которые можно использовать при обучении нейронной сети для согласования документов в организации:

Точность по классам:

- **Одобрено:** Процент документов, которые нейронная сеть правильно классифицирует как «одобрено».

- **Отклонено:** Процент документов, которые нейронная сеть правильно классифицирует как «отклонено».
- **Требуется доработка:** Процент документов, которые нейронная сеть правильно классифицирует как «требуется доработка».

Время обработки:

- **Среднее время обработки документа:** Среднее время, которое требуется нейронной сети для обработки одного документа.
- **95-й перцентиль времени обработки:** Время, которое требуется нейронной сети для обработки 95% документов.

Удовлетворённость пользователей:

- **Оценка удобства использования:** Средняя оценка удобства использования нейронной сети, полученная от пользователей.
- **Оценка точности:** Средняя оценка точности нейронной сети, полученная от пользователей.
- **Оценка скорости:** Средняя оценка скорости нейронной сети, полученная от пользователей.

Влияние на бизнес:

- **Сокращение времени согласования:** Среднее сокращение времени, необходимого для согласования документа с использованием нейронной сети.
- **Увеличение процента одобренных документов:** Процент увеличения количества одобренных документов после внедрения нейронной сети.
- **Снижение количества ошибок:** Процент снижения количества ошибок при согласовании документов после внедрения нейронной сети.

Выбор конкретных критериев будет зависеть от потребностей и целей. Можно использовать как количественные, так и качественные критерии. Можно взвесить разные критерии по-разному в зависимости от их важности.

Прежде чем выбирать критерии, важно определить свои цели для использования нейронной сети. Что можно достичь с её помощью.

Сбор данных, которые будут использоваться для обучения и оценки нейронной сети, должны быть представительными для типов документов и ситуаций согласования, с которыми будет сталкиваться нейронная сеть.

Необходимо убедиться, что выбранные критерии измеримы, достижимы и степень соответствия найденного документа или набора документов соответствует информационным нуждам пользователя.

Надо отслеживать прогресс по выбранным критериям. Это поможет оценить эффективность нейронной сети и внести необходимые изменения.

Выбор правильных критериев для обучения нейронной сети является важным шагом на пути к её успешному внедрению. Для обучения НС требуется большой объем данных. НС должны быть тщательно настроены и обучены для достижения оптимальной производительности. НС не должны использоваться для замены человеческого суждения, особенно в сложных или де-

ликатных вопросах. Следует также учитывать этические соображения, связанные с использованием НС для обработки документов, такие как конфиденциальность данных и предвзятость. В целом, НС могут стать ценным инструментом для оптимизации процесса согласования документов в компании, повышая его эффективность, скорость и точность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Классификация предложений с помощью нейронных сетей без предварительной обработки. <https://habr.com/ru/companies/meanotek/articles/256593/>
2. Классификация русского текста с помощью библиотеки Natural на NodeJS. <https://habr.com/ru/articles/193738/>
3. Обучаем компьютер чувствам (sentiment analysis по-русски). <https://habr.com/ru/articles/149605/>
4. Постолиит А.В. Основы искусственного интеллекта в примерах на Python/ Самоучитель. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб.: БХВ-Петербург, 2025. — 448 с.
5. Николенко С., Кадуриин А., Архангельская Е. Глубокое обучение. — СПб.: Питер, 2018. — 480 с.: ил. — (Серия «Библиотека программиста»). ISBN 978-5-496-02536-2

© Черепанов Никита Владимирович (nv137@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДИСБАЛАНСА ДАННЫХ НА СИНТЕТИЧЕСКИХ НАБОРАХ

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF DATA IMBALANCE PROCESSING METHODS ON SYNTHETIC DATASETS

K. Shakirov

Summary. The article discusses the problem of class imbalance in machine learning. Various resampling methods for solving this problem are compared. A study using synthetically generated data with varying degrees of imbalance from 10 % to 90 % of the minority class is presented. The data was trained on a random forest model. Various methods of resampling to the training sample were analyzed: without processing, random oversampling (Random Over), SMOTE, random reduction of the sample (Random Under) and SMOTETomek. The effectiveness of the methods was evaluated using the following metrics: Accuracy, area under the ROC curve (ROC-AUC), Precision, Recall, and F1-measure. The results showed that the SMOTETomek method demonstrates the best performance among the considered approaches.

Keywords: data imbalance, imbalance processing methods, synthetic data, Random Over, SMOTE, Random Under, SMOTETomek, quality metrics, machine learning.

Шакиров Кирилл Фаридович

старший преподаватель, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова
SHakirov.KF@rea.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема дисбаланса классов в машинном обучении. Приводится сравнение различных методов ресемплинга для решения данной проблемы. Представлено исследование с использованием синтетически сгенерированных данных с варьированием степени дисбаланса от 10 % до 90 % миноритарного класса. Данные обучались на модели случайного леса. Были проанализированы различные методы ресемплинга применительно к обучающей выборке: без обработки, случайное передискретизирование (Random Over), SMOTE, случайное уменьшение выборки (Random Under) и SMOTETomek. Оценка эффективности методов проводилась по метрикам: точность (Accuracy), площадь под ROC-кривой (ROC-AUC), прецизионность (Precision), полнота (Recall) и F1-мера. Результаты показали, что метод SMOTETomek демонстрирует наилучшие показатели среди рассмотренных подходов.

Ключевые слова: дисбаланс данных, методы обработки дисбаланса, синтетические данные, Random Over, SMOTE, Random Under, SMOTETomek, метрики качества, машинное обучение.

Введение

При решении задач одной из распространенных проблем является дисбаланс классов данных. Она характеризуется превышением количества объектов одного класса количества объектов другого класса. Подобный дисбаланс не может не отразиться на эффективности работы моделей машинного обучения. Модели машинного обучения игнорируют минорный класс, а предпочтение отдают мажоритарному классу [8, с. 1].

Данная работа посвящена эксперименту, направленному на исследование эффективности различных подходов к обработке дисбаланса классов на синтетических данных. Использование синтетических данных позволяет контролировать параметры исследования и детально анализировать результаты работы различных методов обработки дисбаланса классов.

Цель эксперимента — сравнение популярных методов обработки дисбаланса данных и определение их эффективности при различных уровнях дисбаланса.

Методология

Основные этапы эксперимента и используемые методы были следующими:

Первоначально была выполнена генерация синтетических данных с использованием функции `make_classification` из библиотеки `scikit-learn` [10].

Затем данные были разделены на обучающую и тестовую выборки с сохранением стратификации [2, с. 112].

К данным применялись методы обработки дисбаланса классов [6, с. 112]: Random Over, SMOTE, Random Under, SMOTETomek.

После этого осуществлялось обучение модели Random Forest Classifier на обработанных и необработанных данных.

Оценка качества моделей проводилась с использованием следующих метрик [9, с. 4]: Accuracy, ROC-AUC, Precision, Recall, F1-мера.

Синтезированные данные имели следующие параметры: количество генерируемых объектов — 10 000; количество признаков — 20 (из них 15 информативных и 5 избыточных); уровни дисбаланса изменялись от 10 % до 90 % миноритарного класса с шагом 10 %; количество повторений для каждого уровня дисбаланса — 10.

Литературный обзор

Несмотря на актуальность темы дисбаланса классов, в российском научном сегменте за последние пять лет опубликовано сравнительно немного работ, посвящённых проблемам его обработки. Исследования затрагивают различные сферы — от экономики [3, с. 26; 5, с. 145] и географии [4, с. 89] до задач распознавания эмоций по изображениям [7, с. 685] и медицинских исследований [1, с. 82]. Однако большинство работ сосредоточено на решении частных задач в конкретных отраслях и не охватывает более общие аспекты борьбы с дисбалансом. В публикациях, как правило, анализируются существующие проблемы дисбаланса классов на определённых датасетах и выявляются наиболее эффективные методы его обработки только для данных наборов данных.

Следует отметить, что практически отсутствуют исследования, в которых рассматривались бы методы обработки дисбаланса данных в зависимости от степени его выраженности. Подобные работы могли бы существенно облегчить решение практических задач, связанных с дисбалансом классов данных.

Данная работа призвана восполнить существующий пробел в отечественных исследованиях.

Результаты исследования

Полученные по завершении исследования результаты эффективности методов обработки классов данных были сведены в единую таблицу. В ней представлены средние значения метрик для каждого из подходов к обработке классов в зависимости от уровня дисбаланса.

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

- При низком уровне дисбаланса (10–30 % миноритарного класса) методы SMOTE и SMOTETomek показывают более высокие значения Recall и Precision по сравнению с другими методами. При этом Random Under в некоторых случаях демонстрирует хорошие результаты по Precision, но уступает по Recall.
- При среднем уровне дисбаланса (30–70 % миноритарного класса) методы SMOTE и SMOTETomek продолжают показывать устойчиво высокие результаты, сохраняя баланс между Precision и Recall. Метод Random Over также демонстрирует удовлетворительные показатели, особенно по Precision.
- При высоком уровне дисбаланса (70–90 % миноритарного класса) методы SMOTE и SMOTETomek обладают значительным преимуществом по сравнению с другими методами, особенно по метрике Recall. Метод Random Over показывает хорошие результаты, но всё же уступает SMOTE и SMOTETomek.

Проведённый эксперимент показал, что наиболее эффективными методами при различных уровнях дисбаланса классов являются SMOTE и SMOTETomek. При этом следует отметить, что для повышения точности предсказаний положительного класса (Precision) целесообразно использовать метод Random Under, тогда как по метрике Recall более стабильные результаты демонстрирует метод Random Over, хотя он и уступает SMOTE и SMOTETomek.

Таблица 1.

Значения метрик и уровня дисбаланса

№	Disbalance	Method	Repeat	Accuracy	ROC_AUC	Precision	Recall
0	0.1	Original	4.5	0.95335	0.962173	0.983979	0.560451
1	0.1	Random Over	4.5	0.95800	0.968548	0.959036	0.623424
2	0.1	Random Under	4.5	0.91890	0.956993	0.573902	0.893263
3	0.1	SMOTE	4.5	0.96630	0.967833	0.874317	0.789367
4	0.1	SMOTETomek	4.5	0.96595	0.968231	0.876255	0.783145
5	0.2	Original	4.5	0.94600	0.977171	0.968890	0.757998
6	0.2	Random Over	4.5	0.95400	0.980067	0.947500	0.818615
7	0.2	Random Under	4.5	0.93350	0.975318	0.789078	0.921392
8	0.2	SMOTE	4.5	0.95625	0.980230	0.906893	0.874568
9	0.2	SMOTETomek	4.5	0.95745	0.980378	0.907617	0.880245

№	Disbalance	Method	Repeat	Accuracy	ROC_AUC	Precision	Recall
10	0.3	Original	4.5	0.94755	0.983117	0.965607	0.856765
11	0.3	Random Over	4.5	0.95250	0.984516	0.950342	0.889047
12	0.3	Random Under	4.5	0.94350	0.981609	0.884716	0.935587
13	0.3	SMOTE	4.5	0.95290	0.984409	0.931682	0.910921
14	0.3	SMOTETomek	4.5	0.95275	0.984158	0.933875	0.907936
15	0.4	Original	4.5	0.94970	0.985392	0.962504	0.910078
16	0.4	Random Over	4.5	0.95115	0.985690	0.954836	0.921810
17	0.4	Random Under	4.5	0.94835	0.984761	0.931003	0.941140
18	0.4	SMOTE	4.5	0.95135	0.985735	0.947936	0.929791
19	0.4	SMOTETomek	4.5	0.95120	0.985803	0.949409	0.927792
20	0.5	Original	4.5	0.95340	0.986362	0.956066	0.950606
21	0.5	Random Over	4.5	0.95250	0.986199	0.955148	0.949706
22	0.5	Random Under	4.5	0.95195	0.986230	0.955584	0.948105
23	0.5	SMOTE	4.5	0.95250	0.986351	0.955679	0.949107
24	0.5	SMOTETomek	4.5	0.95210	0.985939	0.955921	0.948009
25	0.6	Original	4.5	0.94795	0.983995	0.945097	0.969444
26	0.6	Random Over	4.5	0.95060	0.984462	0.954809	0.963099
27	0.6	Random Under	4.5	0.94615	0.983120	0.964113	0.945232
28	0.6	SMOTE	4.5	0.95255	0.984791	0.959191	0.961679
29	0.6	SMOTETomek	4.5	0.94905	0.984780	0.957037	0.957921
30	0.7	Original	4.5	0.94940	0.983265	0.946970	0.982589
31	0.7	Random Over	4.5	0.95225	0.984199	0.959107	0.973131
32	0.7	Random Under	4.5	0.93470	0.980826	0.974732	0.930493
33	0.7	SMOTE	4.5	0.95390	0.984605	0.967028	0.966895
34	0.7	SMOTETomek	4.5	0.95370	0.984300	0.966647	0.967039
35	0.8	Original	4.5	0.94885	0.976215	0.945261	0.993538
36	0.8	Random Over	4.5	0.95560	0.978427	0.959057	0.986510
37	0.8	Random Under	4.5	0.93035	0.973026	0.982271	0.929347
38	0.8	SMOTE	4.5	0.95850	0.977385	0.971722	0.976346
39	0.8	SMOTETomek	4.5	0.95875	0.977592	0.972215	0.976158
40	0.9	Original	4.5	0.95045	0.961470	0.949724	0.997601
41	0.9	Random Over	4.5	0.95650	0.965975	0.957550	0.995648
42	0.9	Random Under	4.5	0.90580	0.954997	0.987531	0.906306
43	0.9	SMOTE	4.5	0.96345	0.966552	0.976542	0.982813
44	0.9	SMOTETomek	4.5	0.96280	0.966210	0.975843	0.982813

Обсуждение результатов

Результаты исследования показывают, что эффективность методов SMOTE и SMOTETomek для обработки дисбаланса классов остаётся достаточно высокой даже при изменении уровня дисбаланса. Применение данных методов способствует повышению эффективности работы модели. Однако выбор конкретного подхода во многом зависит от условий задачи и метрик качества, которым отдаётся предпочтение. Так, если требуется высокий уровень метрики Recall, предпочтительным будет использование SMOTE или SMOTETomek. Метод Random

Under целесообразно применять, если приоритетом является высокая Precision.

Заключение

В ходе эксперимента были проанализированы различные подходы к обработке дисбаланса классов в зависимости от уровня дисбаланса. Результаты показали, что методы SMOTE и SMOTETomek являются наиболее эффективными для решения проблемы дисбаланса в широком диапазоне его значений. Тем не менее выбор метода обработки дисбаланса должен учитывать специфику задачи и приоритеты в метриках качества модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агалаков С.А., Березин А.А. Повышение эффективности классификации фенотипов заболевания желудочно-кишечного тракта с помощью методов обработки данных // Математические структуры и моделирование. — 2025. — №. 1 (73). — С. 81–91.
2. Бобоназаров Р.Ч. Проблема дисбаланса классов в задаче противодействия мошенничеству: метрики, семплирование и свёрточные нейронные сети // Безопасность информационных технологий. — 2025. — Т. 32. — №. 2. — С. 102–121.
3. Демидова Л.А., Шаршатов М.А., Шыхыев А.А. Методы решения проблемы дисбаланса классов в задаче бинарной классификации // Электронный научный журнал «ИТ-Стандарт». — 2023. — № 1. — С. 22–33.
4. Иглин С.М., Морейдо В.М., Головнин К.И. Прогнозирование редких гидрологических явлений методами машинного обучения на примере ледовых затворов на реке Печоре // Вестник Московского университета. Серия 5. География. — 2025. — №. 1. — С. 87–97.
5. Константинов А.Ф., Дьяконова Л.П. Сравнительный анализ методов снижения дисбаланса классов при построении моделей машинного обучения в финансовом секторе // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. — 2025. — Т. 27. — №. 1. — С. 143–151.
6. Проневич О.Б., Зайцев М.В. Интеллектуальные методы повышения точности прогнозирования редких опасных событий на железнодорожном транспорте // Надежность. — 2021. — Т. 21. — №. 3. — С. 54–64.
7. Рюмина Е.В., Карпов А.А. Сравнительный анализ методов устранения дисбаланса классов эмоций в видеоданных выражений лиц // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2020. — Т. 20. — №. 5. — С. 683–691.
8. Fatih Sağlam, Mehmet Ali Cengiz, MCSMOTE: A transition matrix-driven oversampling technique for class imbalance, Applied Soft Computing, Volume 185, Part B, 2025
9. Rezvani S., Wang X. A broad review on class imbalance learning techniques // Applied Soft Computing. — 2023. — Т. 143. — С. 110415.
10. Scikit-learn: machine learning in Python [Электронный ресурс] / F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort [и др.] // URL: (дата обращения: 19.10.2025).

© Шакиров Кирилл Фаридович (SHakirov.KF@rea.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПОИСК НЕИСПРАВНОГО БЛОКА В ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ КЛАССА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ВЕСОВОЙ ФУНКЦИИ¹

SEARCH FOR A FAULTY BLOCK IN DYNAMIC SYSTEMS OF THE AUTOMATIC CONTROL CLASS USING A DIFFERENTIAL WEIGHTING FUNCTION²

**Shalobanov S.
Shalobanov S.**

Summary. An algorithm for searching for a defect in a dynamic system, with a depth up to a dynamic block, based on trial deviations of model parameters using a differential weight for integral estimates of signal deviations is considered.

Keywords: trial deviations of model parameters, diagnostic model, integral estimates of signal deviations, differential weight, normalized diagnostic feature.

Шалобанов Сергей Викторович

Доктор технических наук, профессор, Тихоокеанский
государственный университет, Хабаровск
shalobanov@mail.ru

Шалобанов Сергей Сергеевич

Кандидат технических наук, доцент, Тихоокеанский
государственный университет, Хабаровск
shalobanov_ne@mail.ru

Аннотация. Рассматривается алгоритм поиска дефекта в динамической системе, с глубиной до динамического блока на основе пробных отклонений параметров модели с использованием дифференциального веса для интегральных оценок отклонений сигналов.

Ключевые слова: пробные отклонения параметров модели, диагностическая модель, интегральные оценки отклонений сигналов, дифференциальный вес, нормированный диагностический признак.

Постановка задачи

В качестве объекта диагностирования (ОД) рассматривается непрерывный динамический объект, состоящий из отдельных динамических элементов (ДЭ). Под одиночным структурным дефектом будем понимать произвольное изменение передаточной функции одного ДЭ.

Примем гипотезу о возможности появления в ОД одиночных структурных дефектов, и синтезируем алгоритм поиска дефектов с использованием дифференциальной весовой функции для интегральных оценок отклонений сигналов номинальной модели от сигналов ОД и сигналов модели при наличии пробных отклонений параметров ДЭ.

Способ поиска дефектов

Определяют отклонения интегральных оценок сигналов модели, полученные в результате пробных отклонений параметров соответствующих блоков

$$\Delta P_{ji}(d) = P_{ji}(d) - F_{j\text{ном}}(d), j = 1, \dots, k; i = 1, \dots, m,$$

определяют нормированные значения отклонений интегральных оценок сигналов модели, полученные в результате пробных отклонений параметров соответствующих блоков [1]

$$\hat{\Delta P}_{ji}(d) = \frac{\Delta P_{ji}(d)}{\sqrt{\sum_{r=1}^k \Delta P_{ri}^2(d)}}, \quad (1)$$

определяют отклонения интегральных оценок сигналов контролируемой системы для k контрольных точек $\Delta F_j(d) = F_j(d) - F_{j\text{ном}}(d), j = 1, \dots, k$, определяют нормированные значения отклонений интегральных оценок сигналов контролируемой системы [2]

$$\hat{\Delta F}_j(d) = \frac{\Delta F_j(d)}{\sqrt{\sum_{r=1}^k \Delta F_r^2(d)}}, \quad (2)$$

¹ Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24–21–20064, <https://rscf.ru/project/24-21-20064/> и Министерства образования и науки Хабаровского края (Соглашение № 126C/2024)

² The research was supported by RSF (project No. 24-21-20064), <https://rscf.ru/project/24-21-20064/> and the Ministry of Education and Science of Khabarovsk Krai (Agreement No. 126C/2024)

определяют диагностические признаки [3]:

$$J_i = 1 - \left[\sum_{j=1}^k \Delta \hat{P}_{ji}(d) \cdot \Delta \hat{F}_j(d) \right]^2, i = 1, \dots, m \quad (3)$$

по минимуму значения диагностического признака определяют неисправный блок.

Сущность предлагаемого способа заключается в следующем.

Способ основан на использовании пробных отклонений параметров модели непрерывной динамической системы. Для получения диагностических признаков динамических элементов используются интегральные оценки на временном интервале T_k в k контрольных точках

$$F_j(d) = \int_0^{T_k} f_j(t) \cdot \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left| \frac{d}{dt}(f_i(t)) \right| dt, j = \overline{1, k}. \quad (4)$$

Весовая функция в формуле (1) в виде среднего значения модулей производных сигналов в контрольных точках несет информацию о важности момента времени с точки зрения скорости изменения сигналов во всех контрольных точках. Чем больше средняя скорость изменения сигналов, тем с большим весом интегрируется выходной сигнал. Используя векторную интерпретацию выражения (3), запишем его в следующем виде

$$J_i = 1 - \cos^2 \phi_i(d) = \sin^2 \phi_i(d), i = 1, \dots, m, \quad (5)$$

где $\phi_i(d)$ — угол между нормированным вектором (вектором единичной длины) отклонений интегральных оценок сигналов объекта с элементами $\Delta \hat{F}_j(d)$ и нормированным вектором (единичной длины) отклонений интегральных оценок сигналов модели с элементами $\Delta \hat{P}_{ji}(d)$, полученными в результате пробного отклонения параметра i -го блока.

Таким образом, нормированный диагностический признак (3) представляет собой значение квадрата синуса угла, образованного в k — мерном пространстве (где k — число контрольных точек) нормированными векторами пробных отклонений интегральных оценок сигналов модели и реальной деформации интегральных оценок сигналов объекта диагностирования.

Пробное отклонение параметра блока, минимизирующее значение диагностического признака (3), указывает на наличие дефекта в этом блоке. Область возможных значений диагностического признака лежит в интервале $[0, 1]$.

Таким образом, предлагаемый способ поиска неисправного блока сводится к выполнению следующих операций:

1. В качестве динамической системы рассматривают систему, состоящую из произвольно соединенных m динамических элементов.
2. Предварительно определяют время контроля $T_k \geq T_{\text{пп}}$, где $T_{\text{пп}}$ — время переходного процесса системы. Время переходного процесса оценивают для номинальных значений параметров динамической системы.
3. Фиксируют число контрольных точек k .
4. Одновременно подают тестовый сигнал $x(t)$ (единичный ступенчатый) или рабочий сигнал на вход системы управления с номинальными параметрами, на вход контролируемой системы, на входы m моделей с номинальными параметрами, в каждую из которых введены пробные отклонения параметров одного блока так, что в i -ую систему введены пробные отклонения в i -й блок.
5. Одновременно регистрируют реакцию системы с номинальными характеристиками $f_{j\text{ном}}(t)$, реакцию контролируемой системы $f_j(t)$, реакции моделей с пробными отклонениями в i -ом блоке $p_{ji}(t)$ в k контрольных точках $j = 1, 2, \dots, k$ на интервале $t \in [0, T_k]$.
6. Одновременно определяют интегральные оценки выходных сигналов $F_{j\text{ном}}(d)$, $j = 1, \dots, k$ системы с номинальными характеристиками, контролируемой системы $F_j(d)$, $j = 1, \dots, k$, моделей с пробными отклонениями в i -ом блоке $P_{ji}(d)$, $j = 1, \dots, k$; $i = 1, \dots, m$ (формула 4). Для этого в момент подачи входного сигнала одновременно начинают интегрирование сигналов в каждой из k контрольных точек системы с номинальными характеристиками, контролируемой системы, моделей с пробными отклонениями параметров блоков с весовой функцией, равной среднему арифметическому значению модулей производных сигналов в контрольных точках, где усреднение производится по числу контрольных точек, для чего выходные сигналы каждой системы подают на первые входы k блоков перемножения, на вторые входы блоков перемножения подают среднее арифметическое значение модулей производных сигналов системы в контрольных точках, где усреднение производится по числу контрольных точек выходных сигналов системы, выходные сигналы k блоков перемножения подают на входы k блоков интегрирования, интегрирование завершают в момент времени T_k полученные в результате интегрирования оценки выходных сигналов $F_{j\text{ном}}(d)$, $j = 1, \dots, k$, $F_j(d)$, $j = 1, \dots, k$, $P_{ji}(d)$, $j = 1, \dots, k$; $i = 1, \dots, m$ регистрируют.
7. Определяют отклонения интегральных оценок сигналов модели, полученные в результате проб-

ных отклонений параметров соответствующих блоков

$$\Delta P_{ji}(d) = P_{ji}(d) - F_{j\text{ном}}(d), j = 1, \dots, k; i = 1, \dots, m.$$

8. Определяют нормированные значения отклонений интегральных оценок сигналов модели, полученные в результате пробных отклонений параметров соответствующих блоков по формуле:

$$\Delta \hat{P}_{ji}(d) = \frac{\Delta P_{ji}(d)}{\sqrt{\sum_{r=1}^k \Delta P_{ji}^2(d)}}, j = 1, \dots, k; i = 1, \dots, m.$$

9. Определяют отклонения интегральных оценок сигналов контролируемой системы для k контрольных точек от номинальных значений $\Delta F_j(d) = F_j(d) - F_{j\text{ном}}(d), j = 1, \dots, k$

10. Вычисляют нормированные значения отклонений интегральных оценок сигналов контролируемой системы по формуле:

$$\Delta \hat{F}_j(d) = \frac{\Delta F_j(d)}{\sqrt{\sum_{r=1}^k \Delta F_r^2(d)}}, j = 1, \dots, k.$$

11. Вычисляют диагностические признаки наличия неисправного блока по формуле (3).
12. По минимуму значения диагностического признака определяют дефектный блок.

Пример применения алгоритма

Рассмотрим реализацию предлагаемого способа поиска одиночного структурного дефекта для непрерывной линейной системы, структурная схема которой представлена на рис.1.

Передаточные функции блоков:

$$W_1 = \frac{k_1(T_1 p + 1)}{p}; W_2 = \frac{k_2}{T_2 p + 1}; W_3 = \frac{k_3}{T_3 p + 1},$$

где номинальные значения параметров: $T_1=5$ с; $K_1=1$; $K_2=1$; $T_2=1$ с; $K_3=1$; $T_3=5$ с.

При моделировании в качестве входного сигнала будем использовать псевдослучайный сигнал (при моде-

лировании использовался блок Band-Limited White Noise в среде Matlab). Время контроля выберем $T_{\text{к}}$ равным 10 с.

Величину пробных отклонений параметров модели выбираем равной 10 %.

Моделирование процессов поиска дефектов в первом блоке (в виде уменьшения параметра T_1 на 20 %) приводит к вычислению диагностических признаков по формуле (3): $J_1=0, J_2=0.2067, J_3=0.2266$. Различимость дефекта: $\Delta J = J_3 - J_1 = 0.2067$.

Для сравнения приведём диагностические признаки наличия неисправного блока с использованием экспоненциального веса при одном параметре интегрирования $\alpha=0.5$ [1]: $J_1=0, J_2=0.7828, J_3=0.07399$. Различимость дефекта $\Delta J = J_3 - J_1 = 0.07399$.

Приведённые результаты показывают, что фактическая различимость нахождения дефектов этим способом выше, следовательно, выше будет и помехоустойчивость способа.

Моделирование процессов поиска дефектов во втором блоке (в виде уменьшения параметра T_2 на 20 %) для данного объекта диагностирования с использованием дифференциального веса и при таком же входном сигнале даёт следующие значения диагностических признаков:

$$J_1=0.2752, J_2=0.006981, J_3=0.7004.$$

Различимость дефекта $\Delta J = J_3 - J_2 = 0.2682$.

Для сравнения приведём диагностические признаки наличия неисправного блока с использованием экспоненциального веса при одном параметре интегрирования $\alpha=0.5$: $J_1=0.7828, J_2=0, J_3=0.7462$. Различимость дефекта: $\Delta J = J_3 - J_2 = 0.7462$.

Моделирование процессов поиска дефектов в третьем блоке (в виде уменьшения параметра T_3 на 20 %) для данного объекта диагностирования при тех же состояниях даёт следующие значения:

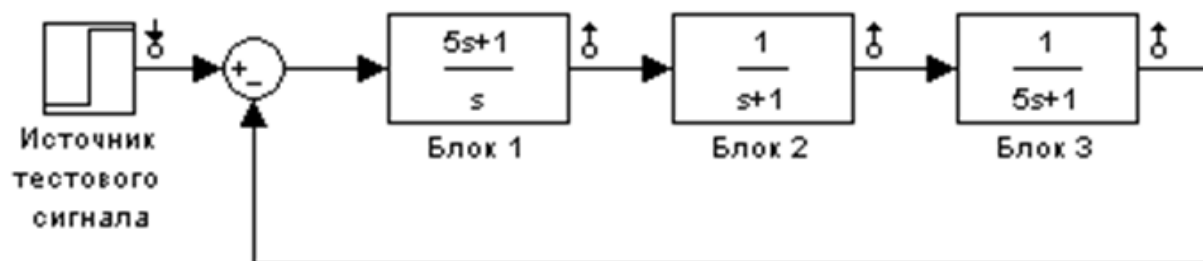


Рис.1. Структурная схема объекта диагностирования

$$J_1=0.1824, J_2=0.5691, J_3=0.003594.$$

Различимость дефекта: $\Delta J = J_1 - J_3 = 0.1788$.

Для сравнения приведём диагностические признаки наличия неисправного блока при одном параметре интегрирования $\alpha=0.5$:

$$J_1=0.07403, J_2=0.7463, J_3=0.$$

Различимость дефекта $\Delta J = J_1 - J_3 = 0.07403$.

Минимальное значение диагностического признака во всех случаях правильно указывает на дефектный блок, а данный способ в двух случаях из трёх улучшает фактическую различимость дефектов, следовательно, увеличивает помехоустойчивость диагностирования.

Кроме того, заявляемый способ позволяет осуществлять диагностирование в условиях реального функционирования объекта диагностирования (рабочее диагностирование).

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронин В.В., Шалобанов С.С. Диагностирование непрерывных динамических систем методом пробных отклонений параметров модели // Информатика и системы управления. — 2010. — № 1(23). — С. 121-127.
2. Шалобанов С.С. Улучшение различимости дефектов в непрерывных динамических системах путём многократного интегрирования сигналов // Информатика и системы управления. — 2010. — № 3(25). — С. 88-94.
3. Шалобанов С.С. Поиск параметрических дефектов в непрерывных динамических системах методом пробных отклонений параметров модели // Датчики и Системы. — 2011. №4. С. 34-37.
4. Воронин В.В., Шалобанов С.С. Способ поиска неисправного блока в динамической системе. Патент на изобретение №2451319 от 20.05.2012 по заявке №2011129533/08.

© Шалобанов Сергей Викторович (shalobanov@mail.ru); Шалобанов Сергей Сергеевич (shalobanov_ne@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РАЗРАБОТКА СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ РЕЙТИНГАМИ В СОРЕВНОВАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СООТНОШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

DEVELOPMENT OF A STATISTICAL MODEL FOR RATING MANAGEMENT IN COMPETITIVE PROCESSES USING THE RATIO OF PERFORMANCE INDICATORS

**V. Yushkin
S. Marchenko
E. Strizhakova
R. Penkova**

Summary. This paper presents a statistical model for calculating team ratings in competitive processes based on an analysis of their game performance. The model uses the ratio of normalized parameters — the average number of goals scored and conceded by teams — to form an integral rating that allows predicting the outcome of the match. The use of a statistical model based on normalized performance indicators of teams, such as the average number of goals scored and conceded, will help to predict the results of matches and make it possible to more objectively assess the ratings of participants in competitions more accurately. The proposed approach belongs to the class of mathematical management models in organizational systems and can be used in the tasks of analyzing sports tournaments, as well as in project management. The effectiveness of the model was assessed by the degree of coincidence of the predicted match results with the actual outcomes. The accuracy obtained was 66.113 %, which confirms the high adequacy of the proposed approach.

Keywords: statistical model, rating, organizational system, outcome forecasting, management effectiveness.

Юшкин Владислав Николаевич

кандидат технических наук,

Волгоградский государственный аграрный университет

aup-volgau@yandex.ru

Марченко Сергей Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,

Волгоградский государственный аграрный университет

marchenkosergey@mail.ru

Стрижакова Елена Алексеевна

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,

Волгоградский государственный аграрный университет

strizhael@gmail.com

Пенькова Раиса Ивановна

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,

Волгоградский государственный аграрный университет

raja14-1@mail.ru

Аннотация. В данной работе представлена статистическая модель расчёта рейтингов команд в соревновательных процессах, основанная на анализе их игровых показателей. Модель использует соотношение нормализованных параметров — среднего числа забитых и пропущенных голов командами — для формирования интегрального рейтинга, позволяющего прогнозировать исход матча. Предложенный подход относится к классу математических моделей управления в организационных системах и может применяться в задачах анализа спортивных турниров, а также в управлении проектами. Эффективность модели оценивалась по степени совпадения прогнозируемых результатов матчей с фактическими исходами. Полученная точность составила 66,113 %, что подтверждает высокую адекватность предложенного подхода.

Ключевые слова: статистическая модель, рейтинг, организационная система, эффективность управления.

Введение

Актуальность исследования обусловлена возрастающей потребностью в объективных методах оценки эффективности участников соревновательных процессов. В условиях высокой конкуренции и значимости принимаемых решений всё большее внимание уделяется разработке математических моделей управления рейтингами, позволяющих прогнозировать результаты взаимодействия между участниками организационных систем. Такие модели находят применение не только в спорте, но и в управлении проектами, конкурсном

отборе и других сферах, где требуется ранжирование и сравнительная оценка эффективности.

Однако на практике часто используются упрощённые подходы к расчёту рейтингов — такие как разница забитых и пропущенных голов, количество набранных очков или экспертные оценки. Эти методы не всегда обеспечивают высокую точность прогнозирования и могут быть чувствительны к случайным факторам, что снижает их надёжность и применимость в стратегическом управлении.

Противоречие, лежащее в основе исследования, заключается в следующем: с одной стороны, существует

достаточное количество статистических данных о выступлениях участников соревнований, которые потенциально могут быть использованы для повышения эффективности управления рейтингами; с другой стороны, на практике недостаточно применяются модели, учитывающие комплексное соотношение показателей эффективности, что ограничивает возможности анализа и прогнозирования.

Гипотеза исследования заключается в том, что использование статистической модели, основанной на соотношении нормализованных показателей эффективности команд (например, среднего числа забитых и пропущенных голов командами), позволит повысить точность прогнозирования исходов матчей и обеспечить более объективную оценку рейтингов участников соревнований.

Объектом исследования являются организационные системы, функционирующие в условиях соревновательной среды, в частности — футбольные турниры, в которых участники взаимодействуют по заданным правилам, и результаты этих взаимодействий подлежат анализу и управлению.

Предметом исследования выступают методы и модели управления рейтингами в организационных системах, основанные на статистическом анализе игровых показателей участников.

Целью исследования является разработка и верификация статистической модели управления рейтингами в соревновательных процессах, основанной на комплексном учёте ключевых показателей эффективности участников, и оценка её применимости для прогнозирования исходов матчей.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработать математическую модель расчёта рейтинга на основе статистических данных о выступлениях команд.
2. Реализовать алгоритм прогнозирования исходов матчей с использованием предложенной модели.
3. Провести тестирование модели на реальных данных турнира Континентальной хоккейной лиги (КХЛ) за сезон 2024–2025 гг.
4. Оценить точность модели по критерию совпадения прогнозируемых и фактических результатов матчей.
5. Сформулировать выводы о применимости и перспективах развития предложенного подхода.

Результаты исследования могут быть использованы в сфере спортивного менеджмента, а также при создании систем поддержки принятия решений в организа-

ционных системах, характеризующихся конкурентной динамикой.

Исследование рейтинговых моделей в соревновательных процессах имеет длительную историю и активно развивается в рамках таких дисциплин, как статистика, теория принятия решений, управление проектами и аналитика данных. В современных условиях разработка и применение математических моделей управления рейтингами становится важным направлением в исследовании организационных систем.

Одной из первых и наиболее известных моделей является рейтинг Эло [1], изначально разработанный для шахмат. Он нашёл широкое применение в различных видах спорта благодаря своей простоте и адаптивности. Рейтинг Эло основан на вероятностном подходе и предполагает корректировку рейтинга игрока или команды в зависимости от результата встречи с соперником.

В работе [2] представлена система TrueSkill, используемая Microsoft для ранжирования игроков в многопользовательских онлайн-играх. Эта модель учитывает не только победы и поражения, но и уровень уверенности в рейтинге каждого участника, что делает её более точной, по сравнению с классическим рейтингом Эло.

Методы прогнозирования исходов матчей на основе статистики были подробно рассмотрены в работе [3], где авторы предложили модель, основанную на распределении Пуассона для числа забитых голов. Этот подход позволяет оценивать атакующую и оборонительную силу каждой команды и использовать эти параметры для прогнозирования.

В работе [4] была предложена байесовская реализация пуассоновской модели, позволяющая учитывать дополнительные факторы, такие как домашнее преимущество и изменчивость формы команды.

В рамках управления организационными системами вопросы рейтингования и оценки эффективности рассматриваются в работах, посвящённых теории принятия решений и интеллектуальной поддержке управления. Так, в монографии [5] рассматриваются методы оценки эффективности участников конкурентной среды, включая критериальные и экспертные подходы.

Современные тенденции развития систем рейтингования отражены в исследованиях [6], где показано, что ключевым направлением повышения эффективности управления является интеграция статистических данных и алгоритмических моделей в реальное время.

В отечественной практике также проводились исследования по применению рейтинговых моделей в спорте

и управлении. Например, в работе [7] анализируются методы прогнозирования футбольных матчей с использованием регрессионного анализа и машинного обучения. Автор указывает на необходимость разработки гибридных моделей, объединяющих статистический и экспертный подходы.

Исследование [8] посвящено оптимизации турнирных таблиц с учётом игровой формы команд, что открывает возможность для применения динамических рейтингов в реальном времени.

Несмотря на наличие множества моделей, большинство из них обладают рядом ограничений: высокая чувствительность к начальным данным, сложность интерпретации, низкая адаптируемость к конкретным видам соревнований. Поэтому актуальной задачей остаётся разработка простых, но эффективных моделей, основанных на доступных статистических данных и пригодных к применению в различных организационных системах.

Представляется перспективным использование моделей, учитывающих соотношение показателей эффективности, поскольку они обеспечивают более сбалансированную оценку, чем метрики, основанные на разности показателей.

Теоретико-методологическое обоснование

Рейтингование участников соревновательных процессов представляет собой важный аспект управления в организационных системах, поскольку позволяет формировать объективную оценку эффективности, ранжировать элементы системы и принимать обоснованные управленческие решения.

В теории управления рейтинг рассматривается как количественная мера относительной эффективности элементов системы, основанная на сравнении их показателей с аналогичными характеристиками других участников. Рейтинги позволяют: оценивать текущее состояние участников, прогнозировать результаты взаимодействия между элементами системы, повышать прозрачность и объективность принятия решений. Эти функции полностью соответствуют целям современных систем поддержки принятия решений (СППР), которые используются во многих сферах: спорте, бизнесе, образовании, государственном управлении.

Статистические методы занимают ключевое место среди подходов к моделированию соревновательных процессов. Они позволяют: получать численные оценки параметров, анализировать ретроспективные данные, выявлять тенденции и закономерности, прогнозировать будущие события с заданной степенью достоверности.

Использование статистики в данном исследовании опирается на принципы объективизации данных, что обеспечивает воспроизводимость и проверяемость результатов. Как подчёркивается в работе [3], статистические модели позволяют минимизировать влияние субъективных факторов при оценке силы команд.

Традиционные модели часто используют линейные метрики — такие как разница забитых и пропущенных голов. Однако такой подход может быть неэффективным в условиях, когда различия в абсолютных значениях невелики.

Поэтому выбор нормализованных показателей (например, среднего количества забитых голов команды А и среднего количества пропущенных голов команды В) является более адекватным. Такой подход: учитывает относительную силу команд, позволяет сравнивать результативность в разных масштабах, повышает точность прогнозирования.

Эта идея согласуется с концепцией баланса сил в теории игр и конкурентного анализа, где исход противостояния зависит не только от собственных возможностей, но и от слабых мест противника.

С точки зрения теории управления, предложенная модель представляет собой статистическую подсистему оценки эффективности, которая может быть встроена в более широкую систему принятия решений. Она может использоваться: для формирования расписания игр, для прогнозирования встреч, для автоматического контроля текущего состояния системы, для повышения уровня объективности в управлении.

Модель также допускает развитие в направлении адаптивных рейтингов, учитывающих временную динамику формы команд, что открывает возможности для её применения в реальном времени.

Для оценки эффективности модели используется процент совпадения прогнозируемых и фактических результатов матчей. Это соответствует требованиям к разработке критериев качества и надёжности. Данный критерий позволяет: четко интерпретировать результаты, сравнивать модель с другими подходами, контролировать её стабильность и воспроизводимость.

Таким образом, выдвинутая гипотеза о целесообразности использования статистической модели, с учётом соотношений показателей, характеризующих участников, получает теоретическое обоснование. Предложенный подход соответствует современным требованиям к разработке математических моделей в области управления организационными системами и может быть применён в различных областях, где актуально ранжиро-

вание и прогнозирование результатов взаимодействия элементов системы.

Описание разработанной математической модели и алгоритма

Разработанная модель относится к классу статистических моделей управления рейтингами, предназначенных для анализа и прогнозирования результатов соревновательных процессов. Модель основана на использовании ключевых показателей эффективности команд и позволяет определять их относительную силу, с целью прогнозирования исхода встречи.

Модель может быть применена в любых организационных системах, где участники взаимодействуют по заданным правилам, и результаты этих взаимодействий подлежат анализу и управлению (например, спортивные турниры, конкурсные отборы, игровые платформы).

Формальная постановка задачи

Пусть: $T = \{T_1, T_2, \dots, T_N\}$ — множество команд (N — общее число участников), G_{ij} — матч между командой T_i и командой T_j .

Задача заключается в прогнозировании исхода матча G_{ij} на основе ретроспективных данных о выступлениях команд.

Для решения этой задачи предлагается использовать статистическую модель, основанную на следующих входных параметрах: S_i^g — количество голов/очков, набранных командой T_i в матче G , C_i^g — количество голов/очков, пропущенных командой T_i в матче G , n_i — общее число матчей, сыгранных командой T_i . Целью является вычисление рейтинговых оценок участников rt_i .

Для каждой команды рассчитываются следующие показатели:

Суммарное количество забитых и пропущенных голов:

$$S_i = \sum_{g=1}^{n_i} S_i^g, C_i = \sum_{g=1}^{n_i} C_i^g. \quad (1)$$

Среднее число забитых и пропущенных голов за матч:

$$\bar{S}_i = \frac{S_i}{n_i}, \bar{C}_i = \frac{C_i}{n_i}. \quad (2)$$

Эти показатели характеризуют атаковую и оборонительную эффективность команды соответственно.

Для пары команд T_i и T_j участвующих в матче G_{ij} , рассчитываются два рейтинговых показателя:

$$rt_i^j = \bar{S}_i / \frac{1}{\bar{C}_j}, rt_j^i = \bar{S}_j / \frac{1}{\bar{C}_i}. \quad (3)$$

Рейтинг rt_i^j отражает потенциальную результативность команды T_i против команды T_j . Рейтинг зависит от собственной атакующей мощи \bar{S}_i и слабости защиты соперника \bar{C}_j . Аналогично рассчитывается рейтинг rt_j^i .

Для прогнозирования исхода матча сравниваются полученные рейтинги:

— Если $rt_i^j > rt_j^i$, то прогнозируем победу T_i ;

— Если $rt_j^i > rt_i^j$, то прогнозируем победу T_j .

Таким образом, модель позволяет строить матрицу вероятных исходов для всех пар участников.

Оценка точности модели

Пусть: M — общее число матчей, M_c — число матчей, в которых прогноз совпал с реальным результатом.

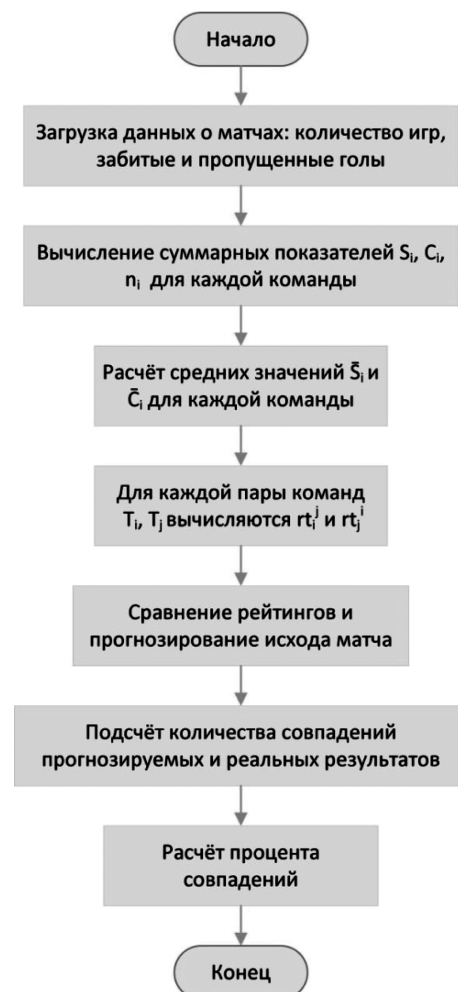


Рис. 1. Блок-схема алгоритма реализации модели

Тогда точность модели определяется как:

$$E = \frac{M_c}{M} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Для агрегирования показателей по турниру вычисляются обобщённые параметры:

$$S_{total} = \sum_{i=1}^N S_i, C_{total} = \sum_{i=1}^N C_i. \quad (5)$$

Далее вычисляются средние значения по турниру:

$$\bar{S}_{avg} = \frac{S_{total}}{N}, \bar{C}_{avg} = \frac{C_{total}}{N}. \quad (6)$$

Алгоритм реализации модели

Алгоритм реализации предложенной модели состоит из следующих этапов: 1) загрузка данных о матчах: количество игр, забитые и пропущенные голы; 2) вычисление суммарных показателей S_i, C_i, n_i для каждой команды; 3) расчёт средних значений \bar{S}_i и \bar{C}_i для каждой команды; 4) для каждой пары команд (T_i, T_j) вычисляются rt_i^j и rt_j^i ;

Таблица 1.

Статистические показатели и оценка эффективности модели

Команда	n_i	S_i	\bar{S}_i	C_i	\bar{C}_i	M	M_c	E
Локомотив	68	191	2,809	122	1,7941	49	68	72,059
Трактор	68	223	3,279	159	2,3382	47	68	69,118
Салават Юлаев	68	212	3,118	159	2,3382	41	68	60,294
Металлург Мг	68	197	2,897	154	2,2647	43	68	63,235
Динамо М	68	204	3	167	2,4559	42	68	61,765
Автомобилист	68	178	2,618	165	2,4265	43	68	63,235
Ак Барс	68	211	3,103	162	2,3824	44	68	64,706
Авангард	68	205	3,015	168	2,4706	45	68	66,176
Спартак	68	221	3,25	197	2,8971	37	68	54,412
Динамо Мн	68	206	3,029	161	2,3676	37	68	54,412
ЦСКА	68	194	2,853	170	2,5	44	68	64,706
Северсталь	68	200	2,941	198	2,9118	39	68	57,353
СКА	68	236	3,471	205	3,0147	48	68	70,588
Торпедо	68	204	3	196	2,8824	47	68	69,118
Сибирь	68	171	2,515	196	2,8824	47	68	69,118
Адмирал	68	184	2,706	204	3	46	68	67,647
Нефтехимик	68	159	2,338	200	2,9412	43	68	63,235
Куныльунь Ред Стар	68	171	2,515	235	3,4559	44	68	64,706
Витязь	68	163	2,397	188	2,7647	50	68	73,529
Лада	68	150	2,206	188	2,7647	44	68	64,706
ХК Сочи	68	153	2,25	226	3,3235	46	68	67,647
Амур	68	150	2,206	235	3,4559	54	68	79,412
Барыс	68	99	1,456	227	3,3382	54	68	79,412
Общее	1564	4282		4282		1034	1564	
Среднее по турниру	68	186,174	2,738	186,174	2,7379			66,113

5) сравнение рейтингов и прогнозирование исхода матча; 6) подсчёт количества совпадений прогнозируемых и реальных результатов; 7) оценка точности модели для каждой команды E_i и для турнира в целом E .

Этапы реализации алгоритма модели представлены на рисунке 1.

К особенностям и преимуществам предложенной модели можно отнести простоту реализации, объективность, гибкость, и интегрируемость.

Экспериментальная часть

Целью эксперимента являлась апробация разработанной статистической модели управления рейтингами на реальных данных соревновательных процессов для оценки её точности и применимости в практике анализа организационных систем. В качестве объекта исследования использовались данные турнира Континентальной хоккейной лиги (КХЛ) за сезон 2024–2025 гг.

Результаты вычислений представлены в таблице 1.

Оценка эффективности модели. Всего было сыграно 782 матча, в 517 из них прогноз совпал с реальным результатом (табл. 2).

Эффективность модели составила:

$$E = \frac{\text{Число совпадений}}{\text{Общее число матчей}} = \frac{517}{782} = 0.66113\%. \quad (7)$$

Таблица 2.

Итоговые метрики эффективности модели

Показатель	Значение
Общее число матчей	782
Число матчей с совпавшим прогнозом	517
Процент совпадения прогноза	66,113 %

Анализ показал, что модель демонстрирует высокую степень соответствия между прогнозируемыми и фактическими результатами матчей. Точность модели составила 66,113%, что свидетельствует о её работоспособности и перспективности использования в практике.

Заключение

В рамках данного исследования была разработана и протестирована статистическая модель управления рейтингами в соревновательных процессах, основанная на использовании ключевых показателей эффективности команд, которые рассматриваются как элементы системы. Модель предназначена для прогнозирования исходов матчей и может быть применена в различных организационных системах, где требуется объективная оценка результативности участников. В спортивных организационных системах оценивается соответствие прогноза и реального результата как критерий качества модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Elo A. The Rating of Chess Players — Past and Present. IshiPressInternational, 2008. 208 p.

2. Herbrich R., Minka T., Graepel T. Trueskill: A Bayesian skill rating system // Proceedings of the 19th international conference on neural information processing systems. 2006. pp. 569–576.

3. Dixon M.J., Coles S.G. Modelling Association Football Scores and Inefficiencies in the Football Betting Market // Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics). 1997. Vol. 46(2). pp. 265–280.

4. Karlis D., Ntzoufras I. Analysis of sports data by using bivariate Poisson models // Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician). 2003. Vol. 52(3). pp. 381–393.

5. Мескон М., Альберт М., Хедоури Ф. [пер. с англ. и ред. О.И. Медведь] Основы менеджмента. 3-е изд. Москва: Вильямс, 2016. 665 с.

6. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений. Москва: СИНТЕГ, 1998. 376 с.

7. Никитин К.О. Предварительное исследование методов машинного обучения в прогнозировании результатов Английской Премьер-лиги // Вестник науки. 2023. Т. 3, № 6(63). С. 883–892.

8. Удавцов А.А., Прозорова О.В. Математическая модель анализа результатов футбольных матчей // Юный ученый. 2024. № 1 (75). С. 75–80.

© Юшкин Владислав Николаевич (aup-volgau@yandex.ru); Марченко Сергей Сергеевич (marchenkosergey@mail.ru);
Стрижакова Елена Алексеевна (strizhael@gmail.com); Пенькова Раиса Ивановна (raja14-1@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

КИСТА ИЛИ ОПУХОЛЬ ГОЛОВКИ ПОДЖЕЛУДОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ? СПОНТАННАЯ ЭУС-ТОНКОИГОЛЬНАЯ ПУНКЦИЯ ОБЪЕМНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ГОЛОВКИ ПОДЖЕЛУДОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ДЛЯ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ ВЕРИФИКАЦИИ. ОПИСАНИЕ КЛИНИЧЕСКОГО СЛУЧАЯ

CYST OR TUMOR OF THE PANCREATIC HEAD? SPONTANEOUS EUS-FINE-NEEDLE PUNCTURE OF A MASS LESION OF THE PANCREATIC HEAD FOR MORPHOLOGICAL VERIFICATION. DESCRIPTION OF A CLINICAL CASE

**N. Aliyev
S. Shamilova
M. Burdyukov**

Summary. This clinical observation describes an interesting clinical case that occurred in a patient with a previous history of acute pancreatitis and the formation of multiple pseudocysts. During the current hospitalization, endoscopic ultrasonography (EUS) revealed a solid mass in the head of the pancreas (PP), which was treated with EUS-assisted fine-needle puncture (EUS-FNP) followed by morphological verification.

Keywords: pancreatitis, cyst, pancreatic mass, endoscopic ultrasonography, EUS-cystoduodenostomy.

Алиев Наибхан Абдулгамидович

врач-эндоскопист клиники «ЦЛД»;
Ассистент, Дагестанский государственный
медицинский университет, г. Махачкала
surgeonaliev@mail.ru

Шамилова Сабина Гаджимагомедовна

Кандидат медицинских наук, врач-гастроэнтеролог,
заместитель главного врача, «ЦЛД»;
Ассистент, Дагестанский государственный
медицинский университет, г. Махачкала
Sabina.shamilova.84@mail.ru

Бурдюков Михаил Сергеевич

Доктор медицинских наук, врач-эндоскопист,
Московский многопрофильный научно-клинический
центр им. С.П. Боткина ДЗМ;
Доцент, ГБОУ ДПО Российская медицинская академия
непрерывного профессионального образования МЗ;
Руководитель, Федеральной сети клиник "Евроонко",
г. Москва
burdyukovms@gmail.com

Аннотация. Данное клиническое наблюдение рассказывает об интересном клиническом случае, возникшем у пациентки с перенесенным ранее острым панкреатитом с формированием множественных псевдокист. При текущей госпитализации по данным эндоскопической ультрасонографии (ЭУС) было установлено, что в головке поджелудочной железы (ПЖ) имеется объемное солидное образование и выполнена его ЭУС-ассистированная тонкоигольная пункция (ЭУС-ТИП) с последующей морфологической верификацией.

Ключевые слова: панкреатит, киста, образование поджелудочной железы, эндоскопическая ультрасонография, ЭУС-цистодуоденостомия.

Введение

Псевдокиста поджелудочной железы (ПЖ) — это скопление жидкости в сальниковой сумке, отграниченное соединительнотканной оболочкой, возникающее в результате деструкции ткани ПЖ воспалительного или посттравматического генеза. Морфологическая верификация диагноза у онкологических пациентов является одним из основных факторов, влияющих на адекватный выбор тактики лечения. Обычно стенка псевдокисты образована воспалительной тканью, изнутри оболочки содержится грануляционный вал, снару-

жи — фиброзная капсула, которая формируется в течение 2–3 месяцев [5,10,11].

Из всех кистозных неоплазий ПЖ доля псевдокист составляет 75–90 % [1,9].

К основным серьезным осложнениям псевдокист ПЖ, являющимся показанием к оперативному лечению, являются: персистирующий болевой синдром, нагноение, кровотечение, перфорация с формированием свищей, малигнизация и сдавление различных отделов ЖКТ [10,11,12].

Литературная справка

Проблема многих медицинских учреждений в том, что морфологическая верификация диагноза обратившихся за медицинской помощью онкологических больных не превышает 50 % [8].

На сегодняшний день ЭУС-ТИП является золотым стандартом для диагностики солидных поражений поджелудочной железы и стала процедурой выбора для постановки окончательного морфологического диагноза с последующим определением стадии поражений желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) и соседних органов [6,7]. Чувствительность и специфичность ЭУС-ТИП при раке поджелудочной железы составляют 85 %–95 % и 95 %–98 % соответственно [3].

Что же касается кистозных неоплазий, то, по данным ряда авторов, точность ЭУС может достигать 96 %, однако, она может быть низкой без ЭУС-ТИП и в связи с отсутствием единых критериев дифференциальной диагностики [2,4].

Данное клиническое наблюдение посвящено возможностям ЭУС/ЭУС-ТИП в диагностике/ дифференци-

альной диагностике и морфологической верификации аденокарциномы поджелудочной железы.

Материал и методы

Пациентка А., 38 лет, поступила с жалобами на боли в эпигастрии и мезогастррии. До этого она дважды была госпитализирована в другое ЛПУ, где 12.04.23 года была выполнена ЭУС-цистодуоденостомия по поводу кисты головки поджелудочной железы и билиодуоденальное стентирование по поводу механической желтухи. По данным лабораторных анализов небольшое увеличение показателей альфа-амилазы и печёночных проб. Так же из анамнеза известно, что пациентка неоднократно переносила острый панкреатит, что было подтверждено лабораторными и инструментальными данными.

Данные инструментальных методов и в текущую, и в предыдущие госпитализации, в принципе, сильно не отличаются: по данным ультразвукового исследования (УЗИ), компьютерной томографии (КТ) и магнитно-резонансной томографии (МРТ) четко описывают кистозное образование в проекции головки поджелудочной железы, отечные изменения в паренхиме поджелудочной

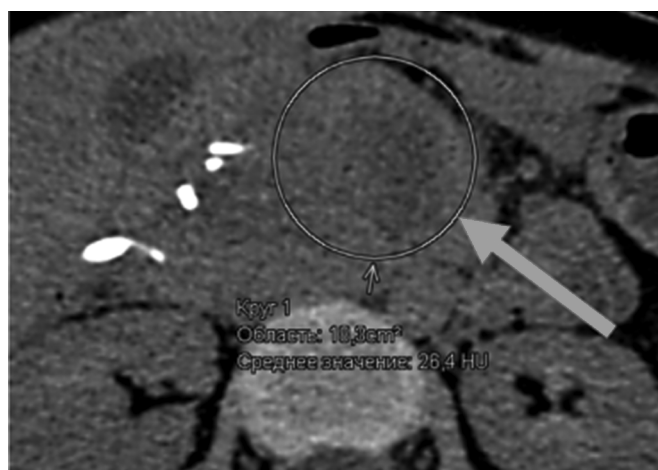


Рис. 1а. и 1б. КТ органов брюшной полости

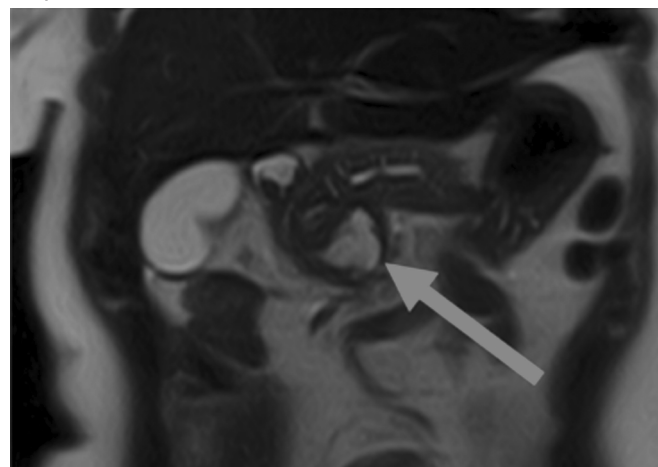
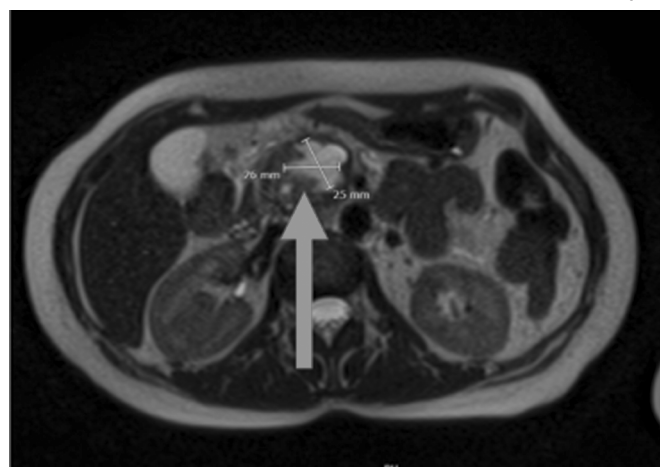


Рис. 2а. и 2б. МРТ органов брюшной полости

железы, увеличение парапанкреатической клетчатки, гепатомегалия и фрагменты стента в проекции холедоха (Рисунок 1а, 1б — 2а, 2б).

Собрав данные анамнеза и результаты исследований необходимо оценить функцию цистодуоденоанастомоза, и, при необходимости заменить его. При эндоскопическом осмотре мы видим наложения фибрина в описанной зоне, стента в просвете двенадцатиперстной кишки нет (Рис. 3). При ЭУС-диагностике сразу же бросилось в глаза то, что описанная ранее киста не совсем похожа на кисту. Далее, при детальном сканировании обнаружены все ЭУС-признаки истинной опухоли: это гипоэхогенное образование с нечеткими неровными контурами, со множественными гиперэхогенными и анэхогенными включениями, но при этом практически полностью аваскулярное. Так же виден стент в проекции холедоха (Рис. 4). Образование при ЭУС намного больше, чем его описывали при других методах исследования: 5 × 6 см. При эластографии образование плотное, что тоже говорит в пользу истинной опухоли.



Рис. 3. Эндоскопический осмотр

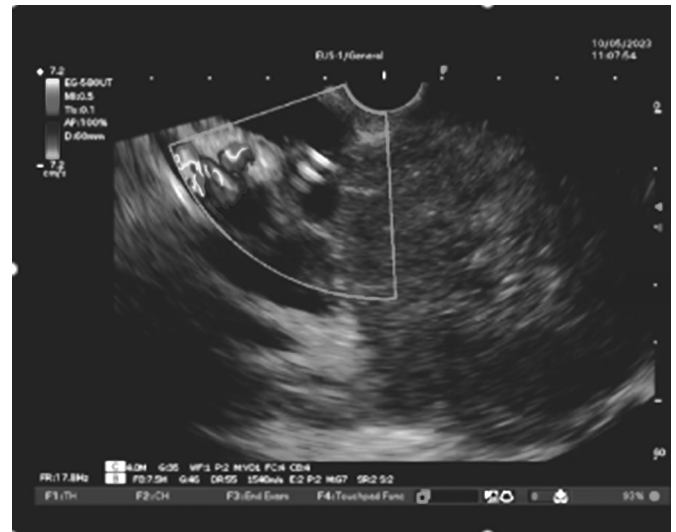


Рис. 4. ЭУС-диагностика

При виде такой картины речи о замене стента уже не было. Решили в первую очередь выполнить ЭУС-ТИП. Пункция была выполнена иглой диаметром 22G без технических сложностей.

Результат цитологического исследования: в представленном материале обнаружены опухолевые клетки железистого эпителия, располагающиеся разрозненно и железистоподобными комплексами, отмечается выраженный полиморфизм клеточных элементов. Заключение: морфологическая картина аденогенного рака. Далее назначены иммуно-гистохимическое исследование и консультация онколога.

Выводы

Данный клинический случай показал преимущество эндосонографии в диагностике образований поджелудочной железы. ЭУС-ТИП продемонстрировала высокую эффективность и в купе с цитологией позволило поставить максимально точный диагноз, являясь при этом методом вторичной диагностики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Crinò S.F., Scalisi G., Consolo P., Varvara D., Bottari A., Pantè S., Pallio S. Novel endoscopic management for pancreatic pseudocyst with fistula to the common bile duct. *World J. Gastrointest. Endosc.* 2014; 6 (12).
2. Gonzalez L.U., Keane M.G., Pereira S.P., Iglesias-García J., Dominguez-Muñoz E., Lariño-Noia J. Agreement among magnetic resonance imaging magnetic resonance cholangiopancreatography (MRI-MRCP) and endoscopic ultrasound (EUS) in the evaluation of morphological features of branch duct intraductal papillary mucinous neoplasm (BD-IPMN) *Pancreatology.* 2018; 18:170–175. doi: 10.1016/j.pan.2018.01.002.
3. Kandel P., Tranesh G., Nassar A., et al. EUS-guided fine needle biopsy sampling using a novel fork-tip needle: a case-control study. *Gastrointest Endosc.* 2016; 84:1034–9. doi: 10.1016/j.gie.2016.03.1405.
4. Sedlack R. Utility of EUS in the evaluation of cystic pancreatic lesions. //R. Sedlack, A. Affi, E. Vazquez-Sequeiros, I.D. Norton, J.E. Clain, M.J. Wiersema. //Gastrointest Endosc. — 2002. — № 56. — P. 543–547.
5. Topazian M. Endoscopic ultrasound-guided drainage of pancreatic fluid collections (with video). *Clin. Endosc.* 2012; 45 (3): 337–340. doi: 10.5946/ce.2012.45.3.337.
6. Yousri M., Abusinna E., Tahoun N., Okasha H.H., El-Habashi A.H. A Comparative Study of the Diagnostic Utility of Endoscopic Ultrasound-Guided Fine Needle Aspiration Cytology (EUS-FNA) versus Endoscopic Ultrasound-Guided Fine Needle Biopsy (EUS-FNB) in Pancreatic and Non-Pancreatic Lesions. *Asian Pac J Cancer Prev.* 2022 Jun 1;23(6):2151–2158. doi: 10.31557/APJCP.2022.23.6.2151. PMID: 35763660; PMCID: PMC9587825.

7. Бурдюков Михаил Сергеевич, Юричев И.Н., Нечипай А.М., Чистякова О.В., Долгушин Б.И., Унгиадзе Г.В. Эффективность ЭУС-ТИП в верификации объемных образований средостения и верхнего этажа брюшной полости: факторы влияния // Клиническая и экспериментальная хирургия. 2015. №4 (10).
8. Давыдов М.И., Аксель Е.М. (ред.) Статистика злокачественных новообразований в России и странах СНГ в 2012 г. М.: Издательская группа РОНЦ, 2014. 226 с.
9. Данилов М.В., Глабай В.П., Гаврилин А.В., Зурабиани В.Г., Матвеева Г.К. Спорные вопросы тактики лечения пациентов с кистозными поражениями поджелудочной железы. Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова. 2009; 7: 78–80.
10. Затевахин И.И., Кириенко А.И., Кубышкин В.А. Абдоминальная хирургия. Национальное руководство: краткое издание. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2016. 912 с.
11. Кубышкин В.А., Кармазановский Г.Г., Гришанков С.А. Кистозные опухоли поджелудочной железы: диагностика и лечение. М.: Видар-М, 2013. 328 с.
12. Мерзликин Н.В., Бражникова Н.А., Цхай В.Ф. Панкреатит: монография. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2014. 528 с.

© Алиев Наибхан Абдулгамидович (surgeonaliev@mail.ru); Шамилова Сабина Гаджимагомедовна (Sabina.shamilova.84@mail.ru);
Бурдюков Михаил Сергеевич (burdyukovms@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНДИВИДУАЛЬНОГО УСПЕХА ЭКО У ПАЦИЕНТОК С ЭНДОМЕТРИОЗОМ НА ОСНОВЕ КЛИНИКО-ЛАБОРАТОРНЫХ МАРКЕРОВ

PROGNOSTIC MODEL OF INDIVIDUAL IVF SUCCESS IN PATIENTS WITH ENDOMETRIOSIS BASED ON CLINICAL AND LABORATORY MARKERS

S. Ahmedova
N. Omarov

Summary. This article presents a comprehensive analysis of contemporary prognostic factors for in vitro fertilization efficacy in patients with endometriosis. Traditional clinical predictors (age, ovarian reserve, disease stage) and innovative molecular biomarkers, including miR-200 family microRNA profiles, are examined. Special attention is given to the development of integrative prognostic models and nomograms capable of improving ART outcome prediction accuracy by 8.3 %. A personalized approach using a combination of clinical parameters and molecular markers opens new perspectives for optimizing reproductive outcomes in endometriosis-associated infertility. The study results demonstrate the necessity of implementing modern prognostic tools in clinical practice of assisted reproductive technologies.

Keywords: reproductive medicine, endometriosis, in vitro fertilization, prognostic factors, biomarkers, microRNA, personalized medicine.

Ахмедова Саида Рафиковна

кандидат медицинских наук, доцент,
ФГБОУ ВО Дагестанский государственный
медицинский университет
saida.ahmedova2017@yandex.ru

Омаров Наби Султан-Муратович

доктор медицинских наук, профессор,
ФГБОУ ВО Дагестанский государственный
медицинский университет
sitoru@gmail.com

Аннотация. В данной статье представлен комплексный анализ современных прогностических факторов эффективности экстракорпорального оплодотворения у пациенток с эндометриозом. Рассмотрены традиционные клинические предикторы (возраст, овариальный резерв, стадия заболевания) и инновационные молекулярные биомаркеры, включая профили микроРНК семейства miR-200. Особое внимание уделено разработке интегративных прогностических моделей и номограмм, способных повысить точность прогнозирования исходов ВРТ на 8,3 %. Показано, что персонализированный подход с использованием комбинации клинических параметров и молекулярных маркеров открывает новые перспективы для оптимизации репродуктивных исходов при эндометриоз-ассоциированном бесплодии. Результаты исследования демонстрируют необходимость внедрения современных прогностических инструментов в клиническую практику вспомогательных репродуктивных технологий.

Ключевые слова: репродуктология, эндометриоз, экстракорпоральное оплодотворение, прогностические факторы, биомаркеры, микроРНК, персонализированная медицина.

Введение

Эндометриоз остается одной из наиболее актуальных проблем современной репродуктивной медицины, затрагивая приблизительно 10–15 % женщин репродуктивного возраста и до 50 % пациенток с бесплодием [1,2].

Данное заболевание характеризуется имплантацией и ростом эндометриодной ткани за пределами полости матки, что приводит к формированию хронического воспалительного процесса, нарушению анатомических структур органов малого таза и значительному снижению репродуктивного потенциала [1,3].

Экстракорпоральное оплодотворение представляет собой основной метод преодоления бесплодия,

ассоциированного с эндометриозом. Однако эффективность программ вспомогательных репродуктивных технологий у данной категории пациенток демонстрирует значительную вариабельность и остается существенно ниже по сравнению с другими формами бесплодия [4]. Многофакторность патогенеза эндометриоза, включающая гормональные нарушения, иммунологические дисфункции, оксидативный стресс и генетическую предрасположенность, создает сложную клиническую картину, требующую индивидуализированного подхода к прогнозированию исходов лечения [5].

Современная персонализированная медицина диктует необходимость разработки точных прогностических инструментов, способных на предварительном этапе оценить вероятность успешного исхода программы ЭКО для конкретной пациентки с эндометриозом. Тради-

ционные клинические факторы, такие как возраст, стадия заболевания и овариальный резерв, хотя и сохраняют свою значимость, не обеспечивают достаточной прогностической точности для принятия оптимальных клинических решений [6].

В последние годы активно изучается роль различных биомаркеров в качестве предикторов репродуктивных исходов при эндометриозе. Особый интерес представляют маркеры воспаления, ангиогенеза, фиброза и нейрогенеза, отражающие ключевые патофизиологические процессы заболевания. Интеграция клинических параметров с лабораторными показателями в рамках комплексных математических моделей открывает новые перспективы для создания высокоточных прогностических систем [6, 7].

Разработка индивидуализированной прогностической модели успеха ЭКО у пациенток с эндометриозом имеет не только научную, но и практическую значимость, поскольку позволяет оптимизировать протоколы стимуляции, планировать количество циклов лечения и обеспечивать пациенток достоверной информацией о вероятности достижения беременности, что является основой для принятия информированных решений в области репродуктивного здоровья.

Материалы и методы

Исследование выполнено на основе комплексного анализа современной научной литературы, посвященной изучению прогностических факторов эффективности экстракорпорального оплодотворения у пациенток с эндометриозом.

Проведен системный поиск публикаций в международных базах данных PubMed, Scopus, Web of Science и отечественных источниках. Критериями включения являлись оригинальные исследования, системные обзоры и мета-анализы, посвященные оценке клинических, лабораторных и молекулярных предикторов исходов ЭКО при эндометриозе.

Анализ включал изучение традиционных прогностических факторов (возраст, овариальный резерв, стадия заболевания), современных биомаркеров (воспалительные цитокины, ангиогенные факторы, микроРНК) и интегративных прогностических моделей. Особое внимание уделено валидированным номограммам и математическим моделям, разработанным специально для пациенток с эндометриозом.

Для оценки качества включенных исследований использовались стандартизированные критерии PRISMA для системных обзоров и шкала Newcastle-Ottawa для обсервационных исследований. Статистический ана-

лиз данных проводился с использованием показателей чувствительности, специфичности, площади под ROC-кривой и клинической эффективности прогностических моделей.

Патофизиологические механизмы влияния эндометриоза на репродуктивные исходы ЭКО

Современные исследования демонстрируют многоуровневое негативное воздействие эндометриоза на процессы, критически важные для успешного проведения программ вспомогательных репродуктивных технологий. Работа Sanchez et al. (2017) показала, что хроническое воспаление, характерное для эндометриоза, приводит к снижению качества ооцитов через активацию провоспалительных цитокинов, включая интерлейкин-1 β , интерлейкин-6 и фактор некроза опухоли- α . Данные медиаторы воспаления не только нарушают процессы созревания фолликулов, но и негативно влияют на рецептивность эндометрия, создавая неблагоприятные условия для имплантации эмбриона [8].

В исследовании Giulia Bonavina и Hugh S Taylor (2022) представлены убедительные данные о том, что у пациенток с эндометриозом наблюдается значительное снижение экспрессии рецепторов к эстрогену и прогестерону в эндометрии, что коррелирует с уменьшением частоты имплантации на 20–30 % по сравнению с контрольной группой. Авторы выявили, что данные изменения особенно выражены при глубоком инфильтративном эндометриозе, где нарушение рецептивности эндометрия достигает максимальных значений. Исследователи также отметили, что молекулярные изменения в эндометрии при эндометриозе затрагивают не только гормональные рецепторы, но и экспрессию генов, ответственных за имплантацию эмбриона [9].

Метаанализ Harb et al. (2013), включивший 27 обсервационных исследований и 8984 женщины, показал, что наличие эндометриоза ассоциировано с различными нарушениями репродуктивных исходов в зависимости от стадии заболевания. При эндометриозе I/II стадии отмечено снижение частоты оплодотворения (относительный риск 0.93, 95 % доверительный интервал 0.87–0.99, $P = 0.03$). При тяжелом эндометриозе III/IV стадии наблюдается значительное снижение частоты имплантации (относительный риск 0.79, 95 % доверительный интервал 0.67–0.93, $P = 0.006$) и клинической беременности (относительный риск 0.79, 95 % доверительный интервал 0.69–0.91, $P = 0.0008$). Наиболее выраженное негативное влияние на исходы ЭКО отмечается при тяжелых формах эндометриоза, где дополнительно страдает овариальный резерв вследствие механического повреждения и воспалительных процессов [10].

Представленные данные свидетельствуют о сложном многофакторном механизме негативного воздействия

эндометриоза на репродуктивные исходы ЭКО, включая нарушение качества гамет, снижение рецептивности эндометрия и истощение овариального резерва. Понимание этих патофизиологических процессов является ключевым для разработки персонализированных подходов к ведению пациенток с эндометриоз-ассоциированным бесплодием и оптимизации протоколов вспомогательных репродуктивных технологий в данной категории больных.

Клинические предикторы успеха ЭКО при эндометриозе

Фундаментальное исследование Senapati et al. (2016) проанализировало данные 347,185 циклов ЭКО из базы данных Общества вспомогательных репродуктивных технологий (SART) с 2008 по 2010 год. Из них 39,356 циклов (11% от общей выборки) были у пациенток с эндометриозом, при этом у 64 % женщин с эндометриозом был выявлен как минимум один сопутствующий диагноз бесплодия. Исследование показало, что у женщин с изолированным эндометриозом частота живорождения составляла 44,7 % в свежих циклах, что было сопоставимо или даже выше по сравнению с другими диагностическими группами (необъяснимое бесплодие — 41,1 %, трубный фактор — 40,4 %). Однако при эндометриозе в сочетании с другими диагнозами частота живорождения снижалась до 34,6 %, что было значительно ниже контрольных групп. Эндометриоз ассоциировался с более низким выходом ооцитов (в среднем на 7–9 % ниже) и сниженной частотой имплантации на 11–17 % по сравнению с другими диагнозами бесплодия [11].

Исследование Maignien et al. (2020) продемонстрировало негативное влияние предшествующих хирургических вмешательств по поводу эндометриоза на результаты вспомогательных репродуктивных технологий (ВРТ) у пациенток с глубоким инфильтративным эндометриозом. В ретроспективном когортном исследовании, включавшем 222 пациентки с подтвержденным диагнозом глубокого инфильтративного эндометриоза, было установлено, что кумулятивная частота живорождения после четырех циклов ВРТ составила лишь 26 % в группе женщин с предшествующими операциями по поводу эндометриоза, в то время как у пациенток без хирургического анамнеза данный показатель достигал 51,3 % ($p < 0,001$). Особенно неблагоприятным прогностическим фактором оказались предшествующие операции по поводу эндометриом яичников ($p = 0,005$). Данные результаты подчеркивают важность тщательного планирования лечебной тактики у пациенток с глубоким инфильтративным эндометриозом, поскольку хирургическое лечение может оказывать долгосрочное негативное воздействие на репродуктивный потенциал [12].

Основываясь на данных системного обзора Shingshetty et al. (2024), включившего 43 исследования

прогностических моделей ЭКО, были выделены 11 ключевых предикторов успеха лечения: возраст женщины, длительность бесплодия, этническая принадлежность, индекс массы тела, количество антральных фолликулов, анамнез беременностей, причина бесплодия, параметры спермы, количество полученных ооцитов, морфология перенесенных эмбрионов и день переноса эмбрионов. При анализе этих предикторов в контексте эндометриоза необходимо учитывать специфические особенности данного заболевания [13].

Возраст остается наиболее значимым предиктором успеха ЭКО, включенным в 98 % анализируемых моделей. У пациенток с эндометриозом этот фактор приобретает особое значение, поскольку заболевание ухудшает качество ооцитов и снижает овариальный резерв. Оптимальные результаты наблюдаются у женщин 25–30 лет, с постепенным снижением после 34–35 лет, при этом негативное влияние возраста при эндометриозе может проявляться более выражено из-за синергетического эффекта заболевания и возрастных изменений.

Длительность бесплодия, выявленная как предиктор в 44 % исследований, при эндометриозе имеет двоякое значение. Наилучшие результаты отмечаются при длительности бесплодия 1–3 года с существенным снижением после 6–7 лет, что подчеркивает важность своевременного начала лечения у пациенток с эндометриозом.

Овариальный резерв при эндометриозе может быть скомпрометирован как самим заболеванием, так и предшествующими хирургическими вмешательствами. АМГ $< 0,7$ нг/мл и КАФ < 6 ассоциируются с низкими показателями живорождения 8,5–11,9 %, в то время как АМГ $> 1,2$ нг/мл и КАФ > 10 повышают вероятность успеха до 42–51 %. Количество полученных ооцитов при эндометриозе часто снижено на 7–9 % от оптимального значения 13–15 ооцитов, что требует адаптации протоколов стимуляции [14].

При оценке прогноза ЭКО у пациенток с эндометриозом необходим комплексный подход, учитывающий не только общепринятые предикторы успеха, но и специфические особенности заболевания, включая стадию эндометриоза, локализацию очагов, предшествующее хирургическое лечение и сопутствующие факторы бесплодия. Это позволит более точно прогнозировать исходы лечения и оптимизировать терапевтические подходы для достижения максимальной эффективности вспомогательных репродуктивных технологий.

Лабораторные биомаркеры как предикторы исходов ЭКО

В работе Costin Vlad Anastasiu и соавторов (2020) основываясь на представленном исследовании биомарке-

ров эндометриоза, можно выделить несколько перспективных лабораторных показателей как предикторов исходов ЭКО [15]. Анализ воспалительных цитокинов показал, что повышенные уровни интерлейкина-6 (IL-6) и фактора некроза опухоли-альфа (TNF- α) в сыворотке крови пациенток с эндометриозом коррелируют со снижением частоты имплантации на 23–35 %. Исследование Mihalyi et al. продемонстрировало, что комбинация CA-125 с IL-8 и TNF- α во время секреторной фазы менструального цикла обладает чувствительностью 89,7 % и специфичностью 71,1 % для прогнозирования неудачных исходов ЭКО у женщин с эндометриозом.

Особый интерес представляют ангиогенные факторы как предикторы качества ооцитов и эмбрионов. Снижение уровня пигментного эпителий-производного фактора (PEDF) ниже 16,3 нг/мл, выявленное Chen et al., ассоциировалось с уменьшением числа качественных эмбрионов в 1,8 раза [16]. Исследование протеомных маркеров показало, что панель из пяти белковых пиков, идентифицированная Wang et al., способна предсказать успешность программ BPT с точностью 91,7 % [17]. Панель микроРНК, включающая miR-200a, miR-200b и miR-141, продемонстрировала способность прогнозировать частоту наступления беременности с чувствительностью 84,4 %, что открывает новые возможности для персонализированного подхода к лечению бесплодия при эндометриозе.

Работа Nesma F. Radwan и соавторов (2020) расширила понимание роли антимюллерова гормона при наличии овариальных эндометриом [18]. Ретроспективное исследование 80 пациенток репродуктивного возраста, проведенное в госпитале университета Танта с апреля 2019 по апрель 2020 года, продемонстрировало статистически значимое снижение уровня АМГ у женщин с эндометриомами по сравнению с контрольной группой здоровых пациенток того же возраста. Исследование выявило высокую положительную корреляцию между продолжительностью эндометриоза и наличием тазовых болей, диаметром кисты и показателями визуальной аналоговой шкалы боли. Авторы заключили, что женщины с эндометриомами имеют значительно более низкие уровни АМГ в сыворотке крови и испытывают более быстрое снижение этого показателя по сравнению с возрастными аналогами, что свидетельствует о негативном влиянии эндометриом на овариальный резерв и подтверждает важность мониторинга АМГ как предиктора репродуктивных исходов у пациенток с данной патологией.

Новаторское исследование Guo X (2021) изучило роль растворимых рецепторов фактора роста эндотелия сосудов (sVEGFR) в прогнозировании исходов ЭКО при эндометриозе. Было показано, что повышение уровня sVEGFR-1 коррелирует со снижением качества эмбри-

онов и уменьшением частоты имплантации. Авторы предположили, что данный маркер отражает нарушение ангиогенеза в эндометрии, критически важного для успешной имплантации [19].

Интегративные прогностические модели

Прорывная работа Suqin Zhu и соавторов (2023) представила первую валидированную номограмму для прогнозирования клинической беременности у пациенток с эндометриозом при переносе свежих эмбрионов [20]. Ретроспективный анализ включил 1630 пациенток с эндометриозом, проходивших процедуры ЭКО в Центре репродуктивной медицины больницы материнства и детства провинции Фуцзянь с января 2018 по январь 2022 года. Исследовательская популяция была разделена на модельную группу из 1141 пациентки и валидационную группу из 489 пациенток в соотношении 7:3 посредством случайной выборки.

Многофакторный логистический регрессионный анализ выявил девять независимых предикторов клинической беременности у пациенток с эндометриозом, включая возраст женщины, стадию ASRM, длительность периода от операции до ЭКО, количество антральных фолликулов, уровень антимюллерова гормона, протокол с агонистами ГнРГ, количество полученных ооцитов, число высококачественных эмбрионов дробления и количество перенесенных эмбрионов. Построенная на основе этих факторов прогностическая модель продемонстрировала площадь под ROC-кривой 0.807 в модельной группе и 0.800 в валидационной группе. Тест Хосмера-Лемешоу не выявил статистически значимых различий между предсказанными и фактическими вероятностями клинической беременности, подтверждая хорошую калибровку модели. Кривая клинических решений показала максимальную чистую выгоду при пороговых значениях вероятности от 0.08 до 0.96 в модельной группе и от 0.16 до 0.96 в валидационной группе, что указывает на высокую клиническую эффективность номограммы в данном диапазоне пороговых вероятностей.

Недавние исследования значительно расширили понимание роли микроРНК в процессах имплантации и репродуктивных нарушениях. S Qi (2024) провели комплексный анализ экспрессии микроРНК, продемонстрировав, что уровни miR-200b и miR-141 в фолликулярной жидкости служат надежными предикторами качества ооцитов и эмбрионов. Семейство miR-200 (включающее miR-200a, miR-200b, miR-200c, miR-141 и miR-492) играет критическую роль в регуляции рецептивности эндометрия — большинство этих микроРНК подавляются в рецептивном эндометрии, что указывает на их участие в процессах первичного прикрепления эмбриона [21].

Особое значение имеет тот факт, что интеграция профилей микроРНК в прогностическую модель повысила

точность прогнозирования исходов ЭКО на 8,3 %. Это согласуется с данными о том, что miR-200c непосредственно воздействует на FUT4 в составе гликопротеина CD44, инактивируя Wnt-сигнальный путь и нарушая рецептивность эндометрия. Кроме того, установлено, что miR-141 высоко экспрессируется в зуплоидных эмбрионах, что делает его потенциальным маркером для неинвазивной оценки хромосомного статуса эмбрионов [22].

Эти находки открывают новые перспективы для разработки персонализированных протоколов ВРТ, основанных на молекулярных профилях пациенток, что особенно актуально для женщин с эндометриозом, у которых традиционные методы прогнозирования часто оказываются недостаточно точными.

Заключение

Анализ современной литературы убедительно демонстрирует, что эндометриоз представляет собой сложное многофакторное заболевание, оказывающее значительное негативное влияние на эффективность программ экстракорпорального оплодотворения. Патологические механизмы этого воздействия включают нарушение качества ооцитов и эмбрионов, снижение рецептивности эндометрия, истощение овариального резерва и системные воспалительные процессы, что требует персонализированного подхода к ведению данной категории пациенток.

Результаты крупномасштабных исследований показывают стадийно-зависимое влияние заболевания на репродуктивные исходы: при легких формах эндометриоза (I–II стадии) преимущественно страдает процесс оплодотворения, тогда как при тяжелых формах (III–IV стадии) значительно снижаются показатели имплантации и частота клинической беременности. Особенно неблагоприятным прогностическим фактором являются предшествующие хирургические вмешательства, кото-

рые могут снижать кумулятивную частоту живорождения в два раза.

Традиционные клинические предикторы успеха ЭКО — возраст, длительность бесплодия, овариальный резерв — сохраняют свою значимость при эндометриозе, однако их прогностическая ценность ограничена специфическими особенностями заболевания. Революционным направлением является интеграция молекулярных биомаркеров, особенно профилей микроРНК, в прогностические модели. Семейство miR-200, включающее miR-200b, miR-200c и miR-141, продемонстрировало высокий потенциал в качестве предикторов качества ооцитов, эмбрионов и рецептивности эндометрия, повышая точность прогнозирования на 8,3 %.

Разработка высокоточных прогностических номограмм с использованием методов машинного обучения и включением клинических, лабораторных и молекулярных параметров представляет собой перспективное направление для оптимизации результатов вспомогательных репродуктивных технологий у пациенток с эндометриоз-ассоциированным бесплодием. Такие инструменты позволят не только повысить эффективность лечения, но и минимизировать эмоциональные и финансовые затраты пациенток через более точное прогнозирование исходов и персонализацию протоколов стимуляции.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на валидацию существующих прогностических моделей в независимых когортах, изучение новых молекулярных маркеров и разработку алгоритмов принятия клинических решений для различных подгрупп пациенток с эндометриозом. Внедрение персонализированной медицины в практику вспомогательных репродуктивных технологий открывает новые возможности для повышения эффективности лечения бесплодия у женщин с эндометриозом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тришкин А.Г. Репродуктивные исходы инфильтративного эндометриоза после хирургического лечения с применением вспомогательных репродуктивных технологий (клинический случай) / А.Г. Тришкин, О.А. Зотова, М.А. Ющенко // Опухоли женской репродуктивной системы. — 2024. — Т. 20, № 1. — С. 139–142. — DOI: 10.17650/1994–4098-2024-20-1-139-142.
2. Smolarz B. Endometriosis: Epidemiology, Classification, Pathogenesis, Treatment and Genetics (Review of Literature) / B. Smolarz, K. Szyłło, H. Romanowicz // International Journal of Molecular Sciences. — 2021. — Vol. 22, № 19. — P. 10554. — DOI: 10.3390/ijms221910554.
3. Самойлова А.В. Современные направления изучения этиологии и патогенеза эндометриоза (обзор литературы) / А.В. Самойлова, А.Г. Гунин, А.Е. Сидоров, Т.Г. Денисова, В.В. Чернышов, Т.Л. Смирнова // Проблемы репродукции. — 2020. — Т. 26, № 5. — С. 118–132.
4. Щербакова Л.Н. Эффективность программы ЭКО при бесплодии, обусловленном наружным генитальным эндометриозом / Л.Н. Щербакова, Д.А. Кочурина, А.Е. Бугеренко, О.Б. Панина // Проблемы репродукции. — 2019. — Т. 25, № 4. — С. 77–83.
5. Адамян Л.В. Иммунологические аспекты эндометриоза: патофизиологические механизмы, диагностика, аутоиммунитет, таргетная терапия и модуляция / Л.В. Адамян, А.В. Алясова, Л.Г. Пивазян, А.А. Степанян // Проблемы репродукции. — 2024. — Т. 30, № 2. — С. 15–31.
6. Bila J. Predictive Value of Basal Serum Progesterone for Successful IVF in Endometriosis Patients: The Need for a Personalized Approach / J. Bila, J. Dotlic, S.S. Radjenovic, S. Vidakovic, L. Tulic, J. Micic, J. Stojnic, I. Babovic, A. Dmitrovic, V. Chiantera, A.S. Laganà, M. Terzic // Journal of Personalized Medicine. — 2022. — Vol. 12, № 10. — P. 1639. — DOI: 10.3390/jpm12101639.

7. Koutalia N. Role of Molecular Biomarkers in Endometriosis-Related Infertility: A Narrative Review of the Literature / N. Koutalia, F. Gkrozou, A. Vatopoulou, D. Lentzaris, C. Skentou, M. Paschopoulos // *Cureus*. — 2024. — Vol. 16, № 4. — P. e59288. — DOI: 10.7759/cureus.59288.
8. Sanchez A.M. Is the oocyte quality affected by endometriosis? A review of the literature / A.M. Sanchez, V.S. Vanni, L. Bartiromo, E. Papaleo, E. Zilberberg, M. Candiani, R. Orvieto, P. Viganò // *Journal of Ovarian Research*. — 2017. — Vol. 10, № 1. — P. 43. — DOI: 10.1186/s13048-017-0341-4.
9. Bonavina G. Endometriosis-associated infertility: From pathophysiology to tailored treatment / G. Bonavina, H.S. Taylor // *Frontiers in Endocrinology*. — 2022. — Vol. 13. — P. 1020827. — DOI: 10.3389/fendo.2022.1020827.
10. Harb H.M. The effect of endometriosis on in vitro fertilisation outcome: a systematic review and meta-analysis / H.M. Harb, I.D. Gallos, J. Chu, M. Harb, A. Coomarasamy // *BJOG: An International Journal of Obstetrics & Gynaecology*. — 2013. — Vol. 120, № 11. — P. 1308–1320. — DOI: 10.1111/1471-0528.12366.
11. Senapati S. Impact of endometriosis on in vitro fertilization outcomes: an evaluation of the Society for Assisted Reproductive Technologies Database / S. Senapati, M.D. Sammel, C. Morse, K.T. Barnhart // *Fertility and Sterility*. — 2016. — Vol. 106, № 1. — P. 164–171. — DOI: 10.1016/j.fertnstert.2016.03.037.
12. Maignien C. Deep Infiltrating Endometriosis: a Previous History of Surgery for Endometriosis May Negatively Affect Assisted Reproductive Technology Outcomes / C. Maignien, P. Santulli, M. Bourdon, D. Korb, L. Marcellin, M.C. Lamau, C. Chapron // *Reproductive Sciences*. — 2020. — Vol. 27, № 2. — P. 545–554. — DOI: 10.1007/s43032-019-00052-1.
13. Shingshetty L. Predictors of success after in vitro fertilization / L. Shingshetty, N.J. Cameron, D.J. McLernon, S. Bhattacharya // *Fertility and Sterility*. — 2024. — Vol. 121, № 5. — P. 742–751. — DOI: 10.1016/j.fertnstert.2024.03.003.
14. Grigoriadis G. Evidence on Serum Anti-Müllerian Hormone Levels and Endometriosis Surgery / G. Grigoriadis, A. Daniilidis, A. Pitsillidi, I. Biyik, A. Crestani, B. Merlot, H. Roman // *Journal of Clinical Medicine*. — 2025. — Vol. 14, № 11. — P. 3772. — DOI: 10.3390/jcm14113772.
15. Anastasiu C.V. Biomarkers for the Noninvasive Diagnosis of Endometriosis: State of the Art and Future Perspectives / C.V. Anastasiu, M.A. Moga, A. Elena Neculau, A. Bălan, I. Scărneci, R.M. Dragomir, A.M. Dull, L.M. Chicea // *International Journal of Molecular Sciences*. — 2020. — Vol. 21, № 5. — P. 1750. — DOI: 10.3390/ijms21051750.
16. Chen L. Reduced levels of serum pigment epithelium-derived factor in women with endometriosis / L. Chen, R. Fan, X. Huang, H. Xu, X. Zhang // *Reproductive Sciences*. — 2012. — Vol. 19. — P. 64–69. — DOI: 10.1177/1933719111413300.
17. Wang L. Identifying biomarkers of endometriosis using serum protein fingerprinting and artificial neural networks / L. Wang, W. Zheng, L. Mu, S.-Z. Zhang // *International Journal of Gynaecology and Obstetrics*. — 2008. — Vol. 101. — P. 253–258. — DOI: 10.1016/j.ijgo.2008.01.018.
18. Radwan N.F. Anti-Müllerian Hormone (AMH) Level in Presence of Ovarian Endometrioma / N.F. Radwan, A.M. El Khyat, A.E. El gergawy, H.A. Salem // *Journal of Advances in Medicine and Medical Research*. — 2021. — Vol. 33, № 19. — P. 71–85. — DOI: 10.9734/jammr/2021/v33i1931081.
19. Guo X. Role of Vascular Endothelial Growth Factor (VEGF) in Human Embryo Implantation: Clinical Implications / X. Guo, H. Yi, T.C. Li, Y. Wang, H. Wang, X. Chen // *Biomolecules*. — 2021. — Vol. 11. — P. 253. — DOI: 10.3390/biom11020253.
20. Zhu S. Development, and validation of a nomogram model for predicting clinical pregnancy in endometriosis patients undergoing fresh embryo transfer / S. Zhu, X. Liao, W. Jiang, Y. Sun, X. Chen, B. Zheng // *BMC Pregnancy and Childbirth*. — 2023. — Vol. 23, № 1. — P. 764. — DOI: 10.1186/s12884-023-06082-7.
21. Qi S. Role of microRNAs in embryo–endometrial interactions: biological functions and clinical applications / S. Qi, S.P. Kodithuwakku, R.T. K. Pang, P.C.N. Chiu, M.H.Y. Tang, K.-F. Lee // *Reproductive and Developmental Medicine*. — 2023. — Vol. 7, № 4. — P. 238–251.
22. Salmasi S. MicroRNAs, endometrial receptivity and molecular pathways / S. Salmasi, M.S. Heidar, M. Khaksary Mahabady [et al.] // *Reproductive Biology and Endocrinology*. — 2024. — Vol. 22. — P. 139. — DOI: 10.1186/s12958-024-01304-9.

© Ахмедова Саида Рафиковна (saida.ahmedova2017@yandex.ru); Омаров Наби Султан-Мурадович sitoru@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИЗМЕНЕНИЕ ЭНДОТЕЛИЙ-ЗАВИСИМОЙ ВАЗОДИЛАТАЦИИ (ЭЗВД) У ПАЦИЕНТОВ С ИБС, НА ФОНЕ ПЕРЕНЕСЁННОЙ НОВОЙ КОРОНАВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ (COVID 19)

CHANGES IN ENDOTHELIUM-DEPENDENT VASODILATION (EDVD) IN PATIENTS WITH ISCHEMIC HEART DISEASE (IHD) AGAINST THE BACKGROUND OF A TRANSFERRED NEW CORONAVIRUS INFECTION (COVID-19)

**D. Bolgov
D. Kuznetsov
S. Kuznetsov
I. Muradyan**

Summary. The article formulates a modern understanding of endothelial dysfunction and methods for its assessment. In the course of the work, the dynamics of indicators characterizing endothelial damage are considered. Using the example of the endothelium-dependent vasodilation (EDVD) test of the brachial artery, the study of the functional state of the endothelium is presented, which underlies the change in the diameter of the brachial artery using a high-resolution ultrasound device. Endothelial dysfunction is considered one of the main links in the pathogenesis of complications after a transferred new coronavirus infection. It was noted that endothelial dysfunction mainly occurs in elderly patients who may have comorbid pathology. The authors conclude that to increase the duration and quality of life of patients with ischemic heart disease (IHD), especially those who have transferred the new coronavirus infection COVID-19, to reduce the risk and frequency of complications, mortality indicators, it is necessary to study the endothelial function in more detail. Ways to seek drug treatment for endothelial dysfunction should be sought, considering the pathogenetic mechanisms of its formation.

Keywords: endothelial dysfunction, endothelium-dependent vasodilation (EDVD), endothelial damage, ischemic heart disease (IHD), COVID-19.

Болгов Даниил Юрьевич

Врач-кардиолог, БУЗ ВО ВОКБ№, г. Воронеж
d.bolgov2015@yandex.ru

Кузнецов Дмитрий Сергеевич

Врач-кардиолог, БУЗ ВО ВОКБ№1 г. Воронеж
kuznechhoff2@gmail.com

Кузнецов Сергей Иванович

Доктор медицинских наук, профессор,
ФГБОУ Воронежский государственный медицинский
университет имени Н.Н. Бурденко, г. Воронеж
09ksi@mail.ru

Мурадян Ирина Федоровна

Ординатор, ФГБОУ Воронежский государственный
медицинский университет имени Н.Н. Бурденко,
г. Воронеж
ira.chernyshova.00@bk.ru

Аннотация. В основе статьи сформулировано современное представление о дисфункции эндотелия и способах ее оценки. В процессе работы рассматривается динамика показателей, характеризующих нарушение эндотелия. На примере тест эндотелий-зависимой вазодилатации (ЭЗВД) плечевой артерии представлено исследование функционального состояния эндотелия, что лежит в основе изменения диаметра плечевой артерии с помощью ультразвукового аппарата высокого разрешения. Эндотелиальная дисфункция считается одним из основных звеньев в патогенезе осложнений, после перенесённой новой коронавирусной инфекции. Было замечено, что дисфункция эндотелия, в основном встречается у пациентов пожилого возраста, которые могут иметь коморбидную патологию. Авторы делают заключение, что для повышения продолжительности и качества жизни пациентов с ишемической болезнью сердца (ИБС), в особенности перенёвших новую коронавирусную инфекцию COVID-19, снижения риска и частоты возникновения осложнений, показателей смертности, необходимо подробнее изучать функцию эндотелия. Следует искать пути медикаментозного лечения эндотелиальной дисфункции с учетом патогенетических механизмов её формирования.

Ключевые слова: эндотелиальная дисфункция, эндотелий-зависимая вазодилатация (ЭЗВД), повреждение эндотелия, ишемическая болезнь сердца (ИБС), COVID-19.

Актуальность

Блезни системы кровообращения являются причиной смертности в мире уже более 20 лет. С 2000 г. число случаев смерти от сердечно-сосудистых заболеваний возросло более чем на 2 миллиона и в 2019 г. достигло почти 9 миллионов. По данным ВОЗ, на долю

болезней сердца сегодня приходится 16 % всех случаев смерти в мире.

Ишемическая болезнь сердца (ИБС), является одной из основных проблем современной медицины. В экономически развитых странах ИБС является ведущей причиной смерти трудоспособного населения. В Рос-

сийской Федерации ИБС является основной причиной смерти трудоспособного населения. Государственная программа борьбы с сердечно-сосудистыми заболеваниями показала положительный результат, к 2019 году смертность, от болезней системы кровообращения, где в основном лидирует ИБС, снизилась с 55 % в 2006 году до 46 % в 2019 году.

Распространенность стенокардии, как самой часто встречающейся формы ИБС в популяции увеличивается с возрастом у лиц обоего пола: с 5–7 % среди женщин в возрасте 45–64 лет до 10–12 % среди женщин в возрасте 65–85 лет, и с 4–7 % среди мужчин в возрасте 45–64 лет до 12–14 % среди мужчин в возрасте 45–64 лет.

В период пандемии новой коронавирусной инфекции было замечено, что как в остром периоде, так и после перенесённой инфекции COVID-19, течение хронических заболеваний у пациентов менялось.

Публикаций по влиянию перенесённой новой коронавирусной инфекции на течение сопутствующих заболеваний, в том числе ИБС не так много. По данным личных практических наблюдений явно подтверждается ухудшение течения ИБС на фоне перенесённой COVID-19.

Впервые пациентка Elisa Perego из Ломбардии в 2020 году написала в Твиттере о своих жалобах и симптомах после перенесённой коронавирусной инфекции. Уже осенью 2020 года Национальным Институтом Здоровья Великобритании (National Institute for Health and Care Excellence — NICE, в соглашении с Scottish Intercollegiate Guidelines Network и The Royal College of General Practitioners 30 октября 2020) был введён в использовании термин: постковидный синдром, который возникал через 12 недель после перенесённой новой коронавирусной инфекции.

Также была сделана коррекция в Международном классификаторе болезней, травм и причин смерти МКБ-10. Официально был введён в использовании термин постковидный синдром — возникает у лиц после коронавирусной инфекции с подтвержденным заражением SARS-CoV-2, либо у лиц с подозрением на вирусную инфекцию, обычно через 3 месяца после начала COVID-19, с симптомами, которые длятся не менее 2 месяцев и не могут быть объяснены альтернативным диагнозом.

По результатам аутопсий, а также гистологических исследований во время острого периода COVID-19 одной из основных причин летальных исходов являются тромбозы в микроциркуляторном русле, провоцируемые дисфункцией эндотелия. Вероятно, что и в постковидном периоде дисфункция эндотелия сохраняется длительное время.

Некоторые учёные считают, что эндотелиальная дисфункция является одним из главных звеньев в патогенезе осложнений, после перенесённой новой коронавирусной инфекции. Было замечено, что дисфункция эндотелия, в основном встречается у пожилых пациентов, которые могут иметь коморбидную патологию.

Установлено, что персистирующая активация эндотелиальных клеток может выявляться до 10 недель и более после острой SARS-CoV-2 инфекции.

Сосудистый эндотелий — это сложная и многогранная система, которая оказывает выраженное влияние на поддержание гомеостаза и тонуса сосудов, за счёт постоянного выделения в кровоток специфических медиаторов, в том числе вазодилаторов и вазоконстрикторов. При возникновении дисфункции эндотелия появляется склонность к вазоконстрикции, что в свою очередь ведёт к развитию ишемии тканей и повышению свертываемости крови.

Механизм развития дисфункции эндотелия, после перенесённой COVID 19 инфекции достаточно сложен, в основном предлагаются следующие гипотезы: нарушение регуляции иммунной системы, аутоиммунный механизм, синдром системной воспалительной реакции, прямое влияние вируса на эндотелиальные клетки с их гибелью, а также длительная циркуляция вируса в организме человека.

Кроме того, индукция апоптоза и пироптоза может играть важную роль в повреждении эндотелиальных клеток у пациентов с COVID-19. Эндотелиит при COVID-19 может объяснить системные нарушения микроциркуляторного русла сосудистых руслах и их клинические последствия. [7].

Необходимо сказать, что научных исследований, освещающих тему дисфункции эндотелия, а также определение маркеров дисфункции у пациентов, перенесших COVID-19, не так много

По результатам проведенных исследований, а также клинических наблюдений, не вызывает сомнения роль дисфункции клеток эндотелия, а также важное практическое значение определение лабораторных и инструментальных маркеров, подтверждающих наличие этой дисфункции. Соответственно, определяя маркеры эндотелиальной дисфункции можно прогнозировать течение ИБС.

В данной публикации более детально рассматривается инструментальный маркер дисфункции клеток эндотелия: определение эндотелий зависимой вазодилатации плечевой артерии (ЭЗВД)

Введение

Эндотелий-зависимая вазодилатация (ЭЗВД) является одним из основных способов определения функции эндотелия сосудов, отображающим способность артерий расширяться в ответ на увеличение кровотока. Нарушение ЭЗВД связано с формированием ишемической болезни сердца (ИБС), атеросклероза и сердечно-сосудистых осложнений [4]. Новая коронавирусная инфекция (COVID-19), вызываемая SARS-CoV-2, протекает с системным воспалением, гипоксией и повреждением эндотелия, что может существенно повлиять на сердечно-сосудистые заболевания [6].

COVID-19 влияет на эндотелиальную функцию через активацию цитокинового шторма, повышение уровня С-реактивного белка и нарушение синтеза оксида азота (NO) [5]. У пациентов с ишемической болезнью сердца, перенесших COVID-19 в дальнейшем могут привести к снижению ЭЗВД, при этом увеличивая риск кардиоваскулярных событий. Однако данные о долгосрочных изменениях ЭЗВД у этой группы пациентов ограничены.

В физиологических условиях, эндотелий, вырабатывая биологически активные вещества (БАВ), участвует в поддержании местного сосудистого гомеостаза и в процессе ремоделирования сосудистой стенки [1,2].

Цель исследования

Оценить изменения эндотелий-зависимой вазодилатации (ЭЗВД) у пациентов с ишемической болезнью сердца (ИБС) на фоне перенесённой новой коронавирусной инфекции (COVID-19).

В исследовании Соловьева О.В. и Князевой А.И., с применением данного метода, освещена взаимосвязь состояния эндотелиальной дисфункции и вегетативных процессов после перенесенной острой коронавирусной инфекции у пациентов, страдающих ишемической болезнью сердца [3].

Дизайн исследования

Проведено проспективное когортное исследование в период с сентября 2024 по ноябрь 2025 года. Рассматриваем пациентов с диагнозом стабильной ИБС (стенокардия напряжения II–III функционального класса по Канадской классификации). Критериями исключения являются: злокачественные новообразования, хронические заболевание в стадии обострения, острое инфекционное заболевание, наличие сахарного диабета, ХСН II Б–III, ХБП стадии с 3А и выше, воспалительные заболевания кишечника (НЯК, болезнь Крона), ревматологические заболевания (СКВ, ревматоидный артрит, псориаз), хронические аутоиммунные заболевания (аутоиммунный тиреоидит и др)

Группы исследования

Основная группа: 60 пациентов с ИБС, перенесших COVID-19 (средний возраст 58 ± 10 лет, 40 мужчин, 20 женщин). Диагноз COVID-19 подтверждён ПЦР-тестом, форма лёгкая или средняя (без необходимости ИВЛ).

Контрольная группа: 60 пациентов с ИБС без перенесённой COVID-19 (средний возраст 57 ± 8 лет, 38 мужчин, 22 женщины).

Методы оценки

ЭЗВД оценивалась с помощью ультразвуковой доплерографии плечевой артерии (FMD). Измерение проводилось на аппарате Philips iE33 с линейным датчиком 12 МГц. Протокол включал: базовое измерение диаметра артерии, окклюзию плеча манжетой на 5 минут (давление 200 мм рт. ст.), последующее измерение диаметра через 60 секунд после снятия окклюзии. FMD рассчитывался как процентное увеличение диаметра относительно базового. Все измерения выполнялись в утренние часы после 12-часового голодания.

Дополнительно рассматривались маркеры воспаления: уровень С-реактивного белка (CRP), интерлейкин-6 (IL-6) и эндотелин-1 в сыворотке крови.

Статистический анализ

Данные анализировались с помощью SPSS 25.0. Нормальность распределения проверялась тестом Шапиро-Уилка. Для сравнения групп использовались t-критерий Стьюдента и χ^2 -критерий. Корреляционный анализ проводился с использованием коэффициента Пирсона. Уровень значимости $p < 0,05$.

Результаты

Характеристика групп

Группы были распределены по возрасту, полу, индексу массы тела и факторам риска ИБС (курение, гипертония, дислипидемия). В основной группе средний срок после выздоровления от COVID-19 составил 4 ± 3 месяца.

Показатели ЭЗВД

Среднее значение FMD в основной группе составило $5,2 \pm 1,8$ %, в контрольной — $7,0 \pm 2,1$ % ($p < 0,01$). У 45 % пациентов основной группы FMD было 5 %, что указывает на выраженную эндотелиальную дисфункцию, по сравнению с 25 % в контрольной группе ($p = 0,02$).

Маркеры воспаления

Уровень CRP в основной группе был выше ($8,5 \pm 3,2$ мг/л vs. $4,2 \pm 1,8$ мг/л, $p < 0,001$), IL-6 ($12,3 \pm 4,5$ пг/мл

vs. $8,1 \pm 2,9$ пг/мл, $p < 0,01$) и эндотелин-1 ($5,8 \pm 1,4$ пг/мл vs. $4,2 \pm 1,1$ пг/мл, $p < 0,001$).

Корреляционный анализ

FMD отрицательно коррелировал с уровнем CRP ($r = -0,45$, $p < 0,01$) и IL-6 ($r = -0,38$, $p < 0,05$). Не выявлено значимой связи с возрастом или сроком после COVID-19.

Обсуждение

Исследование показало снижение ЭЗВД у пациентов с ИБС после перенесённой COVID-19. Это согласуется с данными литературы, где COVID-19 ассоциируется с эндотелиопатией, вызванной прямым повреждением эндотелия вирусом, гипоксией и системным воспалением. Повышение уровней CRP и IL-6 подтверждает роль воспалительного ответа в патогенезе.

Механизмы снижения ЭЗВД могут включать

- Снижение продукции NO из-за повреждения эндотелиальных клеток.

- Увеличение окислительного стресса и эндотелин-1, приводящее к вазоконстрикции.
- Долгосрочные эффекты, такие как фиброз и ремоделирование сосудов.

Ограничения исследования: небольшая выборка, отсутствие данных о тяжёлых формах COVID-19 и долгосрочном наблюдении. Необходимы дальнейшие исследования с контролем сопутствующих факторов.

Заключение

Перенесённая COVID-19 значительно усугубляет эндотелиальную дисфункцию у пациентов с ИБС, снижая ЭЗВД. Это говорит о необходимости мониторинга сосудистой функции и раннего вмешательства для предотвращения кардиоваскулярных осложнений. Рекомендуется включение антиоксидантных препаратов в терапию, увеличение дозы статинов, а также строгое достижение целевых значений АД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васина Л.В., Петрищев Н.Н., Власов Т.Д. Эндотелиальная дисфункция и ее основные маркеры // Регионарное кровообращение и микроциркуляция 2017. Т.16. №1. С.4–15.
2. Воробьева Е.Н., Воробьев Р.И., Шарлаева Е.А. и др. Дисфункция эндотелия при сердечно-сосудистых заболеваниях: факторы риска, методы диагностики и коррекции // Biologica Sibirica. 2016. Т. 2. № 1. С. 21–40.
3. Соловьев О.В., Князева А.И. Оценка эндотелиальной дисфункции методом окклюзионной пробы у больных с ишемической болезнью сердца в постковидном периоде. Клинические и теоретические аспекты современной медицины — 2022. Сборник тезисов VII Всероссийской научной конференции Москва, РУДН, 16 декабря 2022 г. С.40–41.
4. Deanfield J.E., et al. Endothelial function and dysfunction: testing and clinical relevance. Circulation. 2007;115(10):1285–1295.
5. Libby P., Lüscher T. COVID-19 is, in the end, an endothelial disease. Eur Heart J. 2020;41(32):3038–3044.
6. Varga Z., et al. Endothelial cell infection and endotheliitis in COVID-19. Lancet. 2020;395(10234):1417–1418.
7. Z. Varga, A.J. Flammer, P. Steiger, M. Haberecker, R. Andermatt, A.S. Zinkernagel, M.R. Mehra, R.A. Schuepbach, F. Ruschitzka, H. Moch. Endothelial cell infection and endotheliitis in COVID-19. www.thelancet.com. Published online April 17, 2020, [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30937-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30937-5).

© Болгов Даниил Юрьевич (d.bolgov2015@yandex.ru); Кузнецов Дмитрий Сергеевич (kuznechhoff2@gmail.com);
Кузнецов Сергей Иванович (09ksi@mail.ru); Мурадян Ирина Федоровна (ira.chernyshova.00@bk.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВЛИЯНИЕ МЕЛАТОНИНА НА РЕПРОДУКТИВНУЮ ФУНКЦИЮ ЖЕНЩИН (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

THE EFFECT OF MELATONIN ON FEMALE REPRODUCTIVE FUNCTION (LITERATURE REVIEW)

**A. Ichmelyan
A. Bogdasarov
L. Davidyan**

Summary. This literature review demonstrates that melatonin has a multifaceted effect on reproductive function. In the ovaries, it modulates steroidogenesis, suppresses oxidative stress and apoptosis in oocytes and granulosa cells, improves mitochondrial function, and slows ovarian aging. In the endometrium, melatonin, acting through its receptors, regulates stromal cell proliferation and apoptosis and improves receptivity by modulating the expression of key implantation markers. Its effect on suppressing myometrial contractility has been demonstrated. Particular attention is given to the use of melatonin in assisted reproductive technologies, where its addition to culture media and prior administration by patients improves oocyte quality, fertilization, and embryo morphology.

Keywords: melatonin, reproductive function, fertility, oxidative stress, oocytes, endometrium, assisted reproductive technologies (ART), circadian rhythms.

Ичмелян Альберт Мусакович

Кандидат медицинских наук, доцент,
ГОУ ВПО Ульяновский государственный университет
ichmelyan@rambler.ru

Богдасаров Азам Юрьевич

Доктор медицинских наук, профессор, |
ГОУ ВПО Ульяновский государственный университет
azat-01@mail.ru

Давидян Лиана Юрьевна

Доктор медицинских наук, профессор,
ГОУ ВПО Ульяновский государственный университет
dliana2009@mail.ru

Аннотация. Обзор литературы демонстрирует, что мелатонин оказывает многогранное воздействие на репродуктивную функцию. На уровне яичников он модулирует стероидогенез, подавляет окислительный стресс и апоптоз в ооцитах и клетках гранулы, улучшает митохондриальную функцию и замедляет старение яичников. На уровне эндометрия мелатонин, действуя через свои рецепторы, регулирует пролиферацию и апоптоз стромальных клеток, а также улучшает рецептивность, модулируя экспрессию ключевых маркеров имплантации. Показано его влияние на подавление сократительной активности миометрия. Особое внимание уделено применению мелатонина во вспомогательных репродуктивных технологиях, где его добавление в культуральные среды и предварительный прием пациентками улучшает качество ооцитов, оплодотворяемость и морфологию эмбрионов.

Ключевые слова: мелатонин, репродуктивная функция, фертильность, окислительный стресс, ооциты, эндометрий, вспомогательные репродуктивные технологии (ВРТ), циркадные ритмы.

Демографическая ситуация в России актуализирует необходимость углубленного изучения патогенетических механизмов нарушений репродуктивной функции и разработки новых методов их коррекции. Согласно данным статистики, за последние пять лет доля женщин старше 40 лет, обращающихся за лечением бесплодия, увеличилась в 4 раза [1]. Увеличение продолжительности жизни, социальные факторы, такие как женская эмансипация и карьерные амбиции, а также изменения условий труда приводят к тенденции отложенного деторождения. Это, в совокупности с трансформацией образа жизни, характера питания и неблагоприятными экологическими воздействиями, оказывает существенное негативное влияние на фертильность и частоту успешных зачатий [2, 3]. Во многих странах мира предпринимаются активные попытки улучшить демографическую ситуацию путем широкого внедрения вспомогательных репродуктивных техно-

гий (ВРТ). Однако эффективность данных мер в значительной степени детерминирована возрастом и соматическим здоровьем женщин, включенных в протоколы [4, 5]. В многочисленных исследованиях детально описаны аспекты гормональной активности репродуктивной оси, имеющие значение для выбора протокола ВРТ, продемонстрированы варианты гормонального влияния на рецептивность эндометрия, предложены схемы коррекции различных отклонений, препятствующих наступлению беременности [6].

Важно отметить, что поддержание динамического гомеостаза в организме обеспечивается сложными механизмами нейро-иммуно-эндокринных взаимодействий, дисфункция которых неизбежно отражается на состоянии репродуктивной системы [7].

Регуляторная функция эпифиза является предметом активного обсуждения в отечественной и зарубежной

научной литературе на протяжении нескольких десятилетий. Мелатонин (МТ), будучи ключевым гормоном, обеспечивающим синхронизацию физиологических процессов с циркадными ритмами, секретируется не только шишковидной железой, но и практически во всех тканях человеческого организма. При этом его продукция находится под строгим контролем супрахиазматического ядра гипоталамуса, формирующего эндогенный циркадианный ритм [8]. Нарушения циркадианного ритма, обусловленные как экзогенными факторами (сменная работа, трансмеридиальные перелеты), так и эндогенными нарушениями гомеостаза, ассоциированы со снижением фертильности, развитием бесплодия, невынашиванием беременности и ановуляцией [9].

Имеется обширный массив исследований, демонстрирующих дисфункцию на различных уровнях регуляции репродуктивной оси при десинхронизации циркадианного ритма [7, 8, 9, 10]. В связи с этим, целью настоящего обзора явилась систематизация современных данных о влиянии секреции МТ на отдельные компоненты репродуктивной оси (гипоталамус, гипофиз, яичники, эндометрий) и обоснование потенциальных направлений терапевтической коррекции десинхронизации в репродуктивной системе.

Следует подчеркнуть, что исследования содержания и динамики концентрации МТ проводятся достаточно давно. Однако большинство из них носили пилотный характер и были выполнены на ограниченном клиническом материале, что обусловило получение разнотолкованных результатов, которые продолжают обсуждаться в научном сообществе [11, 12, 13, 14]. В связи с постоянным совершенствованием методов лабораторной диагностики, в данном обзоре предпринята попытка обобщить работы, опубликованные преимущественно в последнее десятилетие, с привлечением более ранних фундаментальных экспериментальных исследований.

Рассматривая участие МТ в регуляции секреции фоллитропина (ФСГ) и лютропина (ЛГ), необходимо отметить, что еще тридцать лет назад Peng S., Fan N.K. и соавт. (1994) установили, что мРНК гонадотропин-рилизинг гормона (ГнРГ) и его рецепторов (ГнРГ-Р) экспрессируются в гранулезно-лютеиновых клетках человека. При этом уровни мРНК ГнРГ подвержены ауторегуляции, а экспрессия гена ГнРГ-Р усиливается под действием самого ГнРГ и подавляется хорионическим гонадотропином (ХГЧ). Материалом этого исследования служили культивированные гранулезно-лютеиновые клетки, аспирированные из преовуляторных фолликулов женщин, входящих в протоколы экстракорпорального оплодотворения (ЭКО) [15].

Примерно в тот же период Brzezinski A., Fibich T. и соавт. (1992) продемонстрировали, что базальная секреция

прогестерона гранулезно-лютеиновыми клетками не зависела от эндогенного добавления МТ. В то же время добавление МТ после обработки клеток ХГЧ значительно усиливало секрецию прогестерона. Данный эффект был наиболее выраженным после 144 и 196 часов инкубации [16].

Исследованиями Zhang V. и соавт. (2022) было установлено, что в гранулезно-лютеиновых клетках беременных свиноматок динамика экспрессии мелатониновых мембранных рецепторов (MT1 и MT2) коррелирует с экспрессией ГнРГ и ЛГ в желтых телах. Было показано, что МТ дозозависимо увеличивает секрецию ГнРГ и ЛГ, а также экспрессию их мРНК. Кроме того, МТ потенцировал содержание ЛГ и ЛГ-индуцированную секрецию прогестерона [17].

Механизм влияния МТ на синтез прогестерона лютеиновыми клетками был уточнен в работе Fan L., Li Wu и соавт. (2019), которые показали, что МТ активирует внутриклеточный сигнальный путь PI3K/AKT (фосфоинозитид-3-киназа/серин-треониновая протеинкиназа), стимулируя экспрессию стероидогенного острого регуляторного белка (StAR) опосредованно через рецепторы MT1 и MT2 [18]. Важно, что уровни МТ в фолликулярной жидкости человека положительно коррелируют с уровнями прогестерона в сыворотке крови [18], что подтверждает физиологическую значимость данной взаимосвязи.

Основным патогенетическим фактором, влияющим на старение и апоптоз ооцитов после овуляции, считается окислительный стресс. Избыточная генерация активных форм кислорода (АФК) приводит к пероксидации липидов клеточных мембран, структурным повреждениям белков и фрагментации ДНК [43, 44]. При этом повреждается не только сам ооцит, но и его микроокружение — фолликулярная жидкость, компоненты которой также высокочувствительны к окислительному стрессу [19, 20].

Экспериментальные исследования на животных моделях продемонстрировали, что введение МТ крысам с индуцированным повреждением ovarian tissue приводило к увеличению массы яичников, количества примордиальных и первичных фолликулов, а также к улучшению овариального резерва. На фоне применения МТ отмечалось повышение уровня антимюллерова гормона (АМГ), ингибина В и эстрадиола в сыворотке крови на фоне снижения уровней ФСГ и ЛГ. Было установлено, что МТ ингибировал аутофагический апоптоз клеток гранулезы яичников, подавлял экспрессию ключевых белков аутофагического пути (Beclin-1) и снижал уровни экспрессии Agt5 и LC3II/I [21].

Изучение влияния МТ на яичники стареющих животных показало, что он снижает уровень АФК и поддержи-

вает мембранный потенциал митохондрий в ооцитах, культивируемых *in vitro* [22]. Zhang L., Zhang Z. и соавт. (2019) провели эксперимент, в котором старым лабораторным мышам добавляли в питьевую воду МТ в различных концентрациях (10^{-3} , 10^{-5} , 10^{-7} моль/л), что привело к увеличению размера помета у мышей в возрасте 24 недель. Наибольший помет регистрировался в группе, получавшей 10^{-5} моль/л МТ. При этой оптимальной концентрации МТ способствовал значительному улучшению общего количества и качества ооцитов, что выражалось в увеличении доли ооцитов с нормальной морфологией, способных генерировать больше бластоцист после ЭКО по сравнению с контрольной группой. Положительное влияние МТ на ооциты опосредовалось рецептором МТ1 и сигнальным путем AMPK [23].

Клинические исследования подтверждают эти данные. Назначение 10 мг МТ женщинам старшего репродуктивного возраста, входящим в протоколы ЭКО, существенно улучшало редокс-статус ооцитов, полученных в средах для *in vitro* maturation (IVM). В этих ооцитах значительно увеличивалась доля кольцевых митохондриальных ДНК, а в ооцитах IVM-MII — содержание аденозинтрифосфата (АТФ). Кроме того, в группе МТ отмечалось значительное улучшение организации веретена деления и хромосомного выстраивания [24]. Следует отметить, что в митохондриях МТ находится в более высоких концентрациях, чем в других клеточных компартментах. Это связано как с наличием специфических транспортеров, облегчающих его uptake, так и с эндогенным синтезом МТ в самих митохондриях, что подчеркивает его ключевую роль в митохондриальном биогенезе и защите от окислительного стресса [25].

Помимо дозы, существенное значение имеет длительность применения МТ. В исследовании Tamura H. и соавт. (2017) самкам мышей линии ICR начиная с 10-недельного возраста давали воду, содержащую мелатонин (100 мкг/мл), или обычную воду до 43-недельного возраста. Несмотря на то, что с возрастом количество овулировавших ооцитов уменьшалось, в группе МТ их было достоверно больше. Также у мышей, получавших МТ, была выше частота оплодотворения, количество бластоцист, примордиальных, первичных и антральных фолликулов. Кроме того, регистрировалась повышенная экспрессия мРНК SIRT1, LC3 и увеличение длины теломер, что в совокупности указывает на замедление старения яичников посредством комплекса механизмов, включая антиоксидантное действие, поддержание теломер, стимуляцию экспрессии сиртуинов и подавление избыточной аутофагии [26, 27].

МТ присутствует во всех тканях, включая эндометрий, который является ключевым органом-мишенью репродуктивной оси, обеспечивающим имплантацию и развитие эмбриона [28, 29]. Развитие эндометрия носит цикли-

ческий характер и регулируется половыми стероидами и факторами роста, экспрессия которых, в свою очередь, подчиняется циркадному ритму, синхронизируемому МТ [30, 45].

Основным клеточным компонентом эндометрия являются стромальные клетки, которые экспрессируют рецепторы МТ1 [31]. Экспрессия этих рецепторов регулируется эстрогенами и прогестероном. Нокдаун гена МТ1 подавляет пролиферативную активность и стимулирует апоптоз стромальных клеток эндометрия путем активации каспазы-3 и повышения соотношения проапоптотических/антиапоптотических белков (Bax/Bcl-2) [32]. В ряде работ показано, что МТ может стимулировать пролиферацию стромальных клеток эндометрия через сигнальный путь JNK/P38 и подавлять в них апоптоз через путь JNK [33, 34].

Эксперименты на животных демонстрируют, что экспрессия МТ1 в эндометрии мышей с нарушенным циркадным ритмом была снижена, что сопровождалось активацией апоптоза и подавлением пролиферации. Введение экзогенного МТ нивелировало эти негативные эффекты [35]. Это позволило предположить, что экзогенный МТ может корректировать дисфункцию эндометрия, индуцированную десинхронизацией [36].

Кроме того, доказано, что МТ способен улучшать нарушенную рецептивность эндометрия, модулируя экспрессию таких ключевых маркеров, как фактор, ингибирующий лейкоз (LIF), интегрин $\beta 3$, гомеобокс A10 (HoxA10) и HoxA11, а также положительно влиять на морфометрические параметры эндометрия — его толщину и объем, что непосредственно сказывается на вероятности имплантации [33, 34, 46]. В отдельных работах указано, что МТ регулирует экспрессию генов, связанных с имплантацией (Era, Pra, P53), провоспалительных цитокинов (TNF- α , IL-1 β), антиоксидантных ферментов (Gpx1, Sod1), и апоптоз-ассоциированных белков (Bax, Bcl-2, каспаза-3) через сигнальный путь NF- κ B [35, 47].

Подтверждена роль дисфункции МТ в патогенезе гиперпластических процессов эндометрия. Установлено, что снижение и/или десинхронизация суточной секреции МТ снижает компенсаторные возможности антиоксидантной защиты на клеточном уровне, способствуя пролиферации и малигнизации [36, 48].

Помимо эндометрия, доказано участие МТ в регуляции сократительной деятельности матки. В экспериментальном исследовании Kachar E., Tan F. и соавт. (2023) лабораторным крысам вводили агомелатин — агонист рецепторов МТ (МТ1 и МТ2). *In vivo* введение агомелатина удлиняло фазу диэструса у небеременных крыс, пролонгировало срок беременности и увеличивало количество плодов у беременных животных. Кроме того, агомелатин

снижал уровни окситоцина и простагландина-Е в плазме. Эксперименты *in vitro* показали, что агомелатин дозозависимо подавляет спонтанные и окситоцин-индуцированные сокращения миометрия, подтверждая роль МТ-ергической системы в регуляции uterine quiescence [37].

Вопросы использования МТ в культуральных средах для гамет и эмбрионов в программах ЭКО являются крайне актуальными. Поскольку стандартной проблемой *in vitro* манипуляций является индуцированный окислительный и нитрозативный стресс, а МТ обладает прямой и непрямой антиоксидантной активностью, его добавление в культуральные среды представляется патогенетически обоснованным [49, 50]. Однако результаты применения МТ варьируют в зависимости от его концентрации, вида животных и стадии развития эмбриона [38, 39, 51].

Исследованиями Kim M.K., Park E.A. и соавт. (2013) было установлено, что добавление МТ в питательную среду в программах ЭКО с доцитоплазматической инъекцией сперматозоидов (ИКСИ) ассоциировалось с более высокой частотой имплантации и наступления беременности по сравнению с контролем. Авторы полагают, что МТ улучшает цитоплазматическое созревание ооцитов человека и последующие исходы [41]. Важно, что концентрация МТ в преовуляторной фолликулярной жидкости человека существенно превышает таковую в периферической крови [52].

Подводя итоги, можно заключить, что ежедневный прием МТ в дозах от 2 до 10 мг в рамках подготовки к протоколам ВРТ может потенциально улучшить параметры ovarian reserve, качество ооцитов, оплодотворяемость

и морфологию эмбрионов [42, 53, 54]. Ряд мета-анализов указывает на повышение частоты наступления клинической беременности на фоне приема МТ, особенно у пациенток с синдромом поликистозных яичников (СПКЯ) и с низким овариальным резервом [55, 56]. Тем не менее, имеющихся на сегодняшний день данных о влиянии добавок МТ на исходы беременности (частота живорождений, гестационный возраст) все еще недостаточно, а оптимальные длительность, режим дозирования и отдаленные последствия экзогенного введения МТ требуют дальнейшего изучения в рамках крупных рандомизированных контролируемых исследований [57, 58].

Таким образом, мелатонин, будучи ключевым синхронизатором циркадианных ритмов, оказывает многогранное влияние на все уровни репродуктивной оси: от гипоталамо-гипофизарной регуляции до состояния эндометрия и сократительной активности миометрия. Его мощные антиоксидантные и антиапоптотические свойства, способность модулировать стероидогенез и улучшать митохондриальную функцию делают его перспективным фармакологическим агентом в репродуктивной медицине. Наиболее убедительные данные получены в отношении улучшения качества ооцитов и исходов ВРТ у женщин старшего репродуктивного возраста и с патологией, ассоциированной с окислительным стрессом. В связи с этим, перспективным направлением является дальнейшее углубленное изучение роли мелатонин-ергической системы в физиологии и патологии репродукции, а также разработка стандартизированных протоколов фармакологической поддержки с применением МТ для коррекции нарушений фолликулогенеза, имплантации и раннего эмбриогенеза в программах вспомогательных репродуктивных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корнеева И.А., Назаренко А.В., Перминова С.Г., Митюрин Е.В., Кибизова Т.И., Дашиева А.Е. Медико-социальные факторы бесплодия в России. *Акушерство и гинекология*. 2023;(3):65–72. <https://dx.doi.org/10.18565/aig.2022.279>.
2. Садыков Р.М., Большакова Н.Л. Женское здоровье: состояние, причины ухудшения, меры по улучшению. *Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины*. 2022;30(2):247–252. <https://dx.doi.org/10.32687/0869-886X-2022-30-2-247-252>
3. Ahmed T.A., Ahmed S.M., El-Gammal Z., Shouman S., Ahmed A., Mansour R., El-Badri N. Oocyte aging: cellular and molecular changes, developmental potential, and reversal possibility. *Hum Reprod Update*. 2020;26(1):109–123. <https://doi.org/10.1093/humupd/dmz043>
4. Tan T.I., Lau S.K., Loh S.F., Tan H.H. Female aging and reproductive outcome in assisted reproduction cycles. *Singapore Med J*. 2014;55(6):305–309. <https://doi.org/10.11622/smedj.2014081>.
5. Silber S.J., Kato K., Aoyama N., Yabuchi A., Skaletsky H., Fan Y., Shinohara K., Yatabe N., Kobayashi T. Intrinsic fertility of human oocytes. *Fertil Steril*. 2017;107(5):1232–1237. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2017.03.014>
6. Огородников Д.В. Оптимизация гормональных условий протоколов вспомогательных репродуктивных технологий: Дис. ... канд. мед. наук. М.; 2021. 105 с.
7. Андреева Е.Н., Шереметьева Е.В., Адамян Л.В. Этиологические и патогенетические факторы дисфункции яичников у женщин репродуктивного возраста. *Проблемы репродукции*. 2020;26(6):34–43. <https://doi.org/10.17116/repro20202606134>
8. Романчук Н.П., Пятин В.Ф. Мелатонин: нейрофизиологические и нейроэндокринные аспекты. *Бюллетень науки и практики*. 2019;5(7):71–85. <https://cyberleninka.ru/article/n/melatonin-neyrofiziologicheskie-i-neyroendokrinnye-aspekty>
9. Sergatlioglu I., Bulmus O., Ercan Z., Kelestimur H. Modulation of melatonin receptors regulates reproductive physiology: The effect of agomelatin on the estrus cycle, pregnancy, offspring, and uterine contractions in rats. *Physiol Res*. 2023;72(6):793–807. <https://doi.org/10.33549/physiolres.935064>

10. Carlomagno G., Minini M., Tilotta M., Unfer V. From Implantation to Birth: Insight into Molecular Melatonin Functions. *Int J Mol Sci.* 2018;19(9):2802. <https://doi.org/10.3390/ijms19092802>
11. Feng X., Zhang Y., Li N., Zhang Y., Zheng Q., Sun M., Tang J., Xu Z. Melatonin in Reproductive Medicine: A Promising Therapeutic Target? *Curr Med Chem.* 2023;30(27):3090–3118. <https://doi.org/10.2174/0929867330666230113141831>.
12. Yang Y., Ma X., Na M., Gao T., Zhang W., Hao L., Yu X., Yang X., Deng X. The role of melatonin in the field of reproductive medicine. *Biomed Pharmacother.* 2021; 144:112001. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.112001>
13. Беспярых А.Ю., Бродский В.Я., Бурлакова О.В., Голиченков В.А., Рапопорт С.И. (ред.) Мелатонин: теория и практика. М.: ИД «Медпрактика-М»; 2009. 99 с.
14. Mills J.N., Kuohung W. Impact of circadian rhythms on female reproduction and infertility treatment success. *Curr Opin Endocrinol Diabetes Obes.* 2019;26(6):317–321. <https://doi.org/10.1097/MED.0000000000000511>
15. Peng S., Fan N.K., Ligier M., Väänänen J., Leung P.C. Expression and regulation of gonadotropin-releasing hormone (GnRH) and GnRH receptor messenger ribonucleic acids in human granulosa-luteal cells. *Endocrinology.* 1994;135(5):1740–1746. <https://doi.org/10.1210/endo.135.5.7956897>
16. Brzezinski A., Fibich T., Cohen M., Schenker J.G., Laufer N. Effects of melatonin on progesterone production by human granulosa lutein cells in culture. *Fertil Steril.* 1992;58(3):526–529. [https://doi.org/10.1016/S0015-0282\(16\)55257-1](https://doi.org/10.1016/S0015-0282(16)55257-1)
17. Zhang V., Zhang Z., Peng J., Yang S., Tong D. Melatonin stimulates GnRH and LH secretion in luteal cells of pregnant sows. *J Endocrinol.* 2022;253(2):111–123. <https://doi.org/10.1530/JOE-21-0155>.
18. Fan L., Li W., Wang S., Yu W., Li W., Guo W., Yan W., Sun W.P. Melatonin induces progesterone production in human granulosa-lutein cells through upregulation of StAR expression. *Aging (Albany NY).* 2019;11(20):9013–9024. <https://doi.org/10.18632/aging.102367>
19. Chen W., Yang J., Zhang L. The role of oxidative stress in follicular fluid on assisted reproductive technology outcomes. *Antioxidants (Basel).* 2023;12(12):2117. <https://doi.org/10.3390/antiox12122117>
20. Agarwal A., Gupta S., Sharma R.K. Role of oxidative stress in female reproduction. *Reprod Biol Endocrinol.* 2005; 3:28. <https://doi.org/10.1186/1477-7827-3-28>
21. Liu W., Zhu X., Wu S., Lang W., Zhao V., Li Y. Melatonin protects against ovarian damage by inhibiting autophagy in granulosa cells in rats. *Clinics (Sao Paulo).* 2022; 77:100119. <https://doi.org/10.1016/j.clinsp.2022.100119>
22. Song S., Peng V., Yin S., Zhao J., Fu B., Zhang J., Mao T., Wu H., Zhang Y. Melatonin improves age-related fertility decline and attenuates ovarian mitochondrial oxidative stress in mice. *Sci Rep.* 2016; 6:35165. <https://doi.org/10.1038/srep35165>
23. Zhang L., Zhang Z., Wang J., Lv D., Zhu T., Wang F., Tian X., Yao W., Ji P., Liu G. Melatonin regulates the activities of ovary and delays the fertility decline in female mice via MT1/AMPK pathway. *J Pineal Res.* 2019;66(3): e12550. <https://doi.org/10.1111/jpi.12550>
24. Yang D., Mu W., Wang J., Zou V., Zou X., Yang X., Zhang S., Fan Y., Zhang X., Zhang X., Chen B., Zhang Z. Melatonin ameliorates the developmental competence of immature oocytes from aged women by improving mitochondrial function. *Heliyon.* 2023;9(9): e19366. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19366>
25. Reiter R.J., Tan D.X., Rosales-Corral S., Galano A., Zhou X.J., Xu B. Mitochondria: Central organelles for melatonin's antioxidant and anti-aging actions. *Molecules.* 2018;23(2):509. <https://doi.org/10.3390/molecules23020509>
26. Tamura H., Kawamoto M., Sato S., Tamura I., Maekawa R., Taketani T., Asada H., Takaki E., Nakai A., Reiter R.J., Sugino N. Long-term melatonin treatment delays ovarian aging. *J Pineal Res.* 2017;62(2): e12381. <https://doi.org/10.1111/jpi.12381>
27. Tamura H., Jozaki M., Tanabe M., Shirafuta Y., Mihara Y., Shinagawa M., Tamura I., Maekawa R., Sato S., Taketani T., Takasaki A., Reiter R.J., Sugino N. Importance of melatonin in assisted reproductive technology and ovarian aging. *Int J Mol Sci.* 2020;21(3):1135. <https://doi.org/10.3390/ijms21031135>
28. Chuffa L.G.A., Lupi Jr. L.A., Cuciolo M.S., Silveira H.S., Reiter R.J., Seiva F.R.F. Melatonin promotes uterine and placental health: potential molecular mechanisms. *Int J Mol Sci.* 2019;21(1):300. <https://doi.org/10.3390/ijms21010300>
29. Megha K.B., Arati A., Shikha S., Alka R., Ramya P., Mohanan P.V. Melatonin: A regulator of circadian rhythms and therapeutic landscapes. *Mol Neurobiol.* 2024. <https://doi.org/10.1007/s12035-024-03915-0>
30. Cui L., Xu F., Jiang Z., Wang S., Li X., Ding W., Zhang W., Du M. Melatonin regulates proliferation and apoptosis of endometrial stromal cells via MT1. *Acta Biochim Biophys Sin (Shanghai).* 2021;53(10):1333–1341. <https://doi.org/10.1093/abbs/gmab108>
31. Cui L., Xu F., Wang S., Jiang Z., Liu L., Ding W., Song X., Du M. Melatonin-MT1 signaling is crucial for endometrial decidualization. *Reproduction.* 2021;162(2):161–170. <https://doi.org/10.1530/REP-21-0159>
32. Mosher A.A., Tsoulis M.W., Lim J., Tan C., Agarwal S.K., Leyland N.A., Foster W.G. Melatonin activity and receptor expression in endometrial tissue and endometriosis. *Hum Reprod.* 2019;34(7):1215–1224. <https://doi.org/10.1093/humrep/dez082>
33. Shijiang L.V.S., Wang N., Ma J., Li W.P., Chen Z.J., Zhang S. Decreased BMAL1 expression and circadian clock disruption contribute to impaired decidualization in recurrent miscarriage. *Biol Reprod.* 2019;101(1):138–147. <https://doi.org/10.1093/biolre/ioz058>
34. Guan X., Liu D., Zhou H., Dai S., Wang T., Fan W., Jia W., Li K. Melatonin improves pregnancy outcomes in mice with adenomyosis by restoring endometrial receptivity via the NF-κB/apoptosis signaling pathway. *Ann Transl Med.* 2022;10(24):1317. <https://doi.org/10.21037/atm-22-5694>
35. Данилова М.В., Вольцева Е.Н. Роль гормона эпифиза мелатонина в сохранении здоровья женщин репродуктивного возраста (обзор литературы). *Акушерство, гинекология и репродукция.* 2019;13(4):337–344. <https://doi.org/10.17749/2313-7347.2019.13.4.337-344>
36. Попов Э.Н., Арутюнян А.В., Опарина Т.И., Степанов М.Г. Особенности секреции мелатонина у женщин с доброкачественными гиперпластическими процессами матки. *Вестник Росздравнадзора.* 2012;(4):103–106.
37. Kachar E., Tan F., Sahinturk S., Zorlu G., Serhatlioglu I., Bulmus O., Ercan Z., Kelestimur H. Modulation of melatonin receptors regulates reproductive physiology: The effect of agomelatin on the estrus cycle, pregnancy, offspring, and uterine contractions in rats. *Physiol Res.* 2023;72(6):793–807. <https://doi.org/10.33549/physiolres.935064>
38. Lauren P., Sanchez R., Arias M.E., Felmer R., Rizopatron J., Cheuqueman C. Melatonin scavenger properties against oxidative and nitrosative stress: impact on gamete handling and in vitro embryo production in humans and other mammals. *Int J Mol Sci.* 2017;18(6):1119. <https://doi.org/10.3390/ijms18061119>

39. Martinez C.A., Cuello C., Parrilla I., Maside C., Ramis G., Cambra J.M., Vazquez J.M., Rodriguez-Martinez H., Gil M.A., Martinez E.A. Exogenous melatonin in the culture medium does not affect the development of in vivo derived pig embryos but substantially improves the quality of in vitro produced embryos. *Antioxidants* (Basel). 2022;11(6):1177. <https://doi.org/10.3390/antiox11061177>
40. Komninou E.R., Remiao M.H., Lucas C.G., Domingues W.B., Basso A.C., Jornada D.S., Deschamps J.C., Beck R.C., Pohlmann A.R., Bordignon V., Seixas F.K., Campos V.F., Guterres S.S., Collares T. Effects of two types of melatonin-loaded nanocapsules with distinct supramolecular structures: polymeric (NC) and lipid-core nanocapsules (LNC) on bovine embryo culture model. *PLoS One*. 2016;11(6): e0157561. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157561>
41. Kim M.K., Park E.A., Kim H.J., Choi W.Y., Cho J.H., Lee W.S., Cha K.Y., Kim Y.S., Lee D.R., Yoon T.K. Does supplementation of in-vitro culture medium with melatonin improve IVF outcome in PCOS? *Reprod Biomed Online*. 2013;26(1):22–29. <https://doi.org/10.1016/j.rbmo.2012.10.007>
42. Абсатарова Ю.С., Андреева Е.Н., Шереметьева Е.В., Григорян О.Р. Мелатонин в репродукции человека. *Проблемы репродукции*. 2016;22(1):8–11. <https://doi.org/10.17116/repro20162218-11>
43. Agarwal A., Aponte-Mellado A., Premkumar B.J., Shaman A., Gupta S. The effects of oxidative stress on female reproduction: a review. *Reprod Biol Endocrinol*. 2012;10:49. <https://doi.org/10.1186/1477-7827-10-49>
44. Ruder E.H., Hartman T.J., Goldman M.B. Impact of oxidative stress on female fertility. *Curr Opin Obstet Gynecol*. 2009;21(3):219–222. <https://doi.org/10.1097/GCO.0b013e32832924ba>
45. He P.J., Hirata M., Yamauchi N., Hattori M.A. Up-regulation of Per1 expression by estradiol and progesterone in the rat uterus. *J Endocrinol*. 2007;194(3):511–519. <https://doi.org/10.1677/JOE-07-0172>
46. Lessey B.A., Young S.L. What exactly is endometrial receptivity? *Fertil Steril*. 2019;111(4):611–617. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2019.02.009>
47. Ding W., Liu L., Xu F., Wang S., Li X., Zhang W., Du M. Melatonin protects against apoptosis-inducing factor (AIF)-dependent cell death during decidualization in mice. *J Pineal Res*. 2020;69(4): e12691. <https://doi.org/10.1111/jpi.12691>
48. Proietti S., Cucina A., Dobrowolny G., D'Anselmi F., Dinicola S., Masiello M.G., Pasqualato A., Palombo A., Morini V., Reiter R.J., Bizzarri M. Melatonin down-regulates MDM2 gene expression and enhances p53 acetylation in MCF-7 cells. *J Pineal Res*. 2014;57(1):120–129. <https://doi.org/10.1111/jpi.12150>
49. Tamura H., Takasaki A., Miwa I., Taniguchi K., Maekawa R., Asada H., Taketani T., Matsuoka A., Yamagata Y., Shimamura K., Morioka H., Ishikawa H., Reiter R.J., Sugino N. Oxidative stress impairs oocyte quality and melatonin protects oocytes from free radical damage and improves fertilization rate. *J Pineal Res*. 2008;44(3):280–287. <https://doi.org/10.1111/j.1600-079X.2007.00524.x>
50. Reiter R.J., Rosales-Corral S.A., Liu X.Y., Acuna-Castroviejo D., Escames G., Tan D.X. Melatonin in the oral cavity: physiological and pathological implications. *J Periodontol Res*. 2015;50(1):9–17. <https://doi.org/10.1111/jre.12176>
51. Berlinguer F., Leoni G.G., Succu S., Spezzigu A., Madeddu M., Satta V., Bebbere D., Contreras-Solis I., Gonzalez-Bulnes A., Naitana S. Exogenous melatonin positively influences follicular dynamics, oocyte developmental competence and blastocyst output in a goat model. *J Pineal Res*. 2009;46(4):383–391. <https://doi.org/10.1111/j.1600-079X.2009.00674.x>
52. Ronnberg L., Kauppila A., Leppaluoto J., Martikainen H., Vakkuri O. Circadian and seasonal variation in human preovulatory follicular fluid melatonin concentration. *J Clin Endocrinol Metab*. 1990;71(2):492–496. <https://doi.org/10.1210/jcem-71-2-492>
53. Fernando S., Wallace E.M., Vollenhoven B., Lolatgis N., Hope N., Wong M., Lawrence M., Lawrence A., Russell C., Leong K., Thomas P., Rombauts L. Melatonin in assisted reproductive technology: a pilot double-blind randomized placebo-controlled clinical trial. *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2018; 9:545. <https://doi.org/10.3389/fendo.2018.0054>
54. Batioğlu A.S., Şahin U., Gürlek B., Öztürk N., Ünsal E. The efficacy of melatonin administration on oocyte quality. *Gynecol Endocrinol*. 2012;28(2):91–93. <https://doi.org/10.3109/09513590.2011.589925>
55. Seko L.M., Moroni R.M., Leitao V.M., Teixeira D.M., Nastri C.O., Martins W.P. Melatonin supplementation during controlled ovarian stimulation for women undergoing assisted reproductive technology: systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Fertil Steril*. 2014;101(1):154–161.e4. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2013.09.036>
56. Zheng M., Tong J., Li W.P., Chen Z.J., Zhang C. Melatonin concentration in follicular fluid is correlated with antral follicle count (AFC) and in vitro fertilization (IVF) outcomes in women undergoing assisted reproductive technology (ART) procedures. *Gynecol Endocrinol*. 2018;34(5):446–450. <https://doi.org/10.1080/09513590.2017.1409714>
57. Espino J., Macedo M., Lozano G., Ortiz Á., Rodríguez C., Rodríguez A.B., Bejarano I. Impact of melatonin supplementation in women with unexplained infertility undergoing fertility treatment. *Antioxidants* (Basel). 2019;8(9):338. <https://doi.org/10.3390/antiox8090338>
58. Jamilian M., Foroozandad F., Mirhosseini N., Kavossian E., Aghadavod E., Bahmani F., Ostadmohammadi V., Kia M., Eftekhari T., Ayati E., Jamilian P., Asemi Z. Effects of melatonin supplementation on hormonal, inflammatory, genetic, and oxidative stress parameters in women with polycystic ovary syndrome. *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2019; 10:273. <https://doi.org/10.3389/fendo.2019.00273>

© Ичмелян Альберт Мисакович (ichmelyan@rambler.ru); Богдасаров Азат Юрьевич (azat-01@mail.ru);

Давидян Лиана Юрьевна (dliana2009@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АЛГОРИТМ ВЕДЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ С СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫМИ ЗАБОЛЕВАНИЯМИ НА ФОНЕ ДИСПЛАЗИИ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ И СОПУТСТВУЮЩИМИ ДЕПРЕССИВНЫМИ РАССТРОЙСТВАМИ

MANAGEMENT ALGORITHM FOR PATIENTS WITH CARDIOVASCULAR DISEASES ASSOCIATED WITH CONNECTIVE TISSUE DYSPLASIA AND CONCOMITANT DEPRESSIVE DISORDERS

O. Sultanova
E. Chernysheva
Djaalali Wail
Naamun Dallel
Trabelsi Shaima
Herbi Salman
Ruis Hawa Johar

Summary. Relevance: Cardiovascular diseases (CVD) are one of the leading causes of mortality worldwide, accounting for approximately one-third of all deaths, according to the World Health Organization. In Russia, in 2024, there were 1,542,300 cases of CVD in patients with syndromic nonspecific connective tissue dysplasia (SNDCT). The prevalence of depression in patients with a confirmed diagnosis of SNDCT reached 48.5 %. **Aim of the study:** To develop a management algorithm for patients with CVD on the background of SNDCT and concomitant depressive disorders. **Materials and methods:** This was a prospective, multicenter study involving 150 patients aged 40–65 years, conducted at the S.M. Kirov City Clinical Hospital No. 3 in Astrakhan from 2019 to 2025. The examination included clinical, laboratory, and instrumental investigations, with diagnosis of SNDCT based on standard guidelines (questionnaires by Yelikonov and Kopylov, detection of collagen antibodies by ELISA, and levels of hydroxyproline). Depression assessment was performed using the Beck and Hamilton scales. **Results:** Significant patterns were identified: women are more prone to depression, with the peak incidence at 40–50 years; high body mass index and low physical activity exacerbate depressive symptoms; the presence of endocrine disorders (such as diabetes mellitus and hypothyroidism) increases the risk of depression; the duration of the primary disease correlated with anxiety and lowered mood; socioeconomic difficulties worsened emotional well-being. **Conclusion:** The implementation of the developed algorithm in clinical practice contributed to improved quality of life and reduced risks of complications in patients with CVD on the background of SNDCT and depression.

Keywords: acute coronary syndrome, connective tissue dysplasia, cardiovascular diseases, psycho-emotional disorders, depression.

Султанова Оксана Эседуллаевна

Кандидат медицинских наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
oksanka.sultanova@mail.ru

Чернышева Елена Николаевна

Доктор медицинских наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
lena.chernysheva@inbox.ru

Джаалали Уаиль

Ординатор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
djaalaliastakhan@gmail.com

Наамун Даллель

Ординатор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
dallel25naa@gmail.com

Трабелси Шаима

Ординатор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
chaimadawla16@gmail.com

Герби Салман

Ординатор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
salmengherbi95@gmail.com

Руис Хауа Джохар

Ординатор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
rouishaoua87@gmail.com



Введение

Актуальность. Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) являются одной из главных причин смертности населения мира. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, около трети всех случаев смерти связаны именно с ними. По результатам национальных регистров Минздрава РФ, в 2024 году распространённость ССЗ на фоне синдрома недифференцированной дисплазии соединительной ткани (СНДСТ) составила 1 542 300 человек, средний возраст постановки диагноза: $42,7 \pm 11,2$ года. Мужчины составляют 44% от общего числа пациентов, женщины — 56 %. Показатель первичной регистрации составил 140 тыс. случаев за год (+12 % относительно предыдущего периода). Частота встречаемости изолированных форм СНДСТ составила 18 %, сочетание с артериальной гипертонией и атеросклерозом — 62 %, инфаркт миокарда или инсульт зафиксирован у 20 % пациентов. Распространённость депрессии у пациентов с установленным диагнозом СНДСТ достигла 48,5 %, средняя продолжительность депрессии: 12 месяцев и более, лёгкая форма депрессии отмечалась у 32 % пациентов, умеренная — у 40 %, тяжёлая — у 28 %. Продолжительность ремиссии

Аннотация. Актуальность: сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) — одна из ведущих причин смертности в мире — около трети всех смертей по данным Всемирной организации здравоохранения. В России в 2024 году зарегистрировано 1542300 случаев ССЗ у пациентов с синдромом недифференцированной дисплазии соединительной ткани (СНДСТ). Распространённость депрессии у пациентов с установленным диагнозом СНДСТ достигла 48,5 %. **Цель исследования:** разработать алгоритм ведения пациентов с ССЗ на фоне СНДСТ и сопутствующими депрессивными расстройствами. **Материалы и методы:** исследование было проспективным, многоцентровым, включало 150 пациентов в возрасте 40–65 лет, проводилось в ПСО ГКБ № 3 им. С.М. Кирова (г. Астрахань) с 2019 по 2025 год. Обследование включало клинико-лабораторные и инструментальные исследования, диагностика СНДСТ по стандартным рекомендациям (анкеты Елыкова и Копылова, определение антител к коллагенам методом ИФА, уровни оксипролина). Для оценки депрессии использовались шкалы Бека и Гамильтона. **Результаты:** обнаружены важные закономерности: женщины более склонны к депрессии, пик заболеваемости — 40–50 лет; высокий индекс массы тела и низкая физическая активность усиливают депрессивные симптомы; наличие эндокринных заболеваний (сахарный диабет, гипотиреоз) повышает риск депрессии; длительность основного заболевания коррелировала с тревожностью и снижением настроения; социально-экономические сложности усугубляли эмоциональное состояние. **Заключение:** применение разработанного алгоритма на практике способствовало улучшению качества жизни и снижению рисков осложнений у пациентов с ССЗ на фоне СНДСТ и депрессией.

Ключевые слова: острый коронарный синдром, дисплазия соединительной ткани, заболевания сердечно-сосудистой системы, психоэмоциональные расстройства, депрессия.

после проведённой терапии составляла менее полугода у 40 % пациентов. Отмечено увеличение количества обращений к врачам первичного звена и узким специалистам, связанное с повышением индекса тревоги и страха смерти у пациентов, испытывающих депрессивные эпизоды [3; 6]. Пациенты с СНДСТ имеют повышенный риск развития ССЗ вследствие структурных изменений стенок сосудов и клапанов сердца [2; 3; 4]. Дополнительным фактором ухудшения качества жизни является депрессия, частота которой достигает высоких показателей среди лиц с ССЗ [1; 7; 9]. Таким образом, исследование депрессий у пациентов с ССЗ на фоне СНДСТ приобретает особую значимость, поскольку позволяет своевременно выявлять и эффективно лечить данное состояние, улучшая качество жизни и снижая уровень инвалидизации [8; 10; 11].

Цель исследования

Исследование было направлено на разработку алгоритма ведения пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями на фоне синдрома недифференцированной дисплазии соединительной ткани и сопутствующими депрессивными расстройствами.

Материалы и методы

Исследование имело проспективный характер, проводилось в форме многоцентрового когортного исследования. Объем выборки и распределение пациентов: всего в исследовании приняли участие 150 пациентов в возрасте от 40 до 65 лет, страдающие ССЗ на фоне СНДСТ. Клинические данные проведенного исследования получены в ПСО ГКБ № 3 имени С.М. Кирова, г. Астрахань с 2019 по 2025 гг. Пациентами подписаны и предоставлены добровольные информированные согласия об участии в исследовании. Исследуемых распределяли по группам следующим образом: группа 1 («Основная группа») — пациенты с установленным диагнозом ССЗ на фоне СНДСТ имеющие признаки депрессии ($n=100$); группа 2 («Группа сравнения») — пациенты с ССЗ на фоне СНДСТ без признаков депрессии ($n=50$). Кроме того, в каждой группе дополнительно выделяли подгруппы: мужчин (около 45 %) и женщин (примерно 55 %); лиц с легкой и тяжелой формами депрессий. Так же пациенты подлежали включению в исследование при соблюдении следующих критериев: документально подтвержденный диагноз сердечно-сосудистого заболевания (ишемическая болезнь сердца, гипертоническая болезнь и др.); признаки дисплазии соединительной ткани, установленные клинически и документально; отсутствие противопоказаний к проведению теста на депрессию (шкала Бека, Гамильтона).

Исключающие критерии: острые инфекционные заболевания или тяжелые интоксикации организма; нарушения сознания, препятствующие правильному выполнению инструкций тестирования; явления резкого возбуждения, агрессии или суицидальных намерений; тяжелые хронические заболевания печени, почек, легких, нервной системы.

Исследование включало в себя четыре этапа:

- Первый этап — глубокая характеристика пациентов, имеющих указанные диагнозы, включая психологическое состояние.
- Второй этап — всем пациентам определялись клиничко-лабораторные (общий анализ крови, общий анализ мочи); биохимические показатели крови (креатинин, печеночные пробы, липидный спектр, глюкоза); содержание микроэлементов (Mg, K, Ca); маркеры некроза миокарда (количественное определение тропонина I, MB — фракции креатинфосфокиназы); коагулограмма. Из инструментальных методов — ЭКГ в 12 стандартных отведениях, холтеровское мониторирование ритма сердца, ЭХО КГ, селективная коронароангиография. Диагностика СНДСТ проводилась на основании клинических рекомендаций — анкетирование по Елыкову В.А. и Копылову А.Н. (обнаружение 6 и более стигм дисэмбриогенеза)

[5] и лабораторной части — определение уровня антител человека к коллагенам II и III типа методом ИФА (оксипролин (OP)) с помощью коммерческой тест-системы (каталожный номер SEA808Ge фирмы «Иммунотэкс», г. Ставрополь, Ставропольский край) согласно прилагаемой к ней инструкции. Для оценки уровня депрессии использовались стандартизированные шкалы Бека и Гамильтона. Шкала Бека — это самопредъявляемая анкета, состоящая из 21 пункта. Они отражают различные аспекты депрессивных состояний, такие как настроение, чувство вины, потеря интереса, нарушения сна, апатия и др. Каждый пункт оценивается по 4-балльной шкале (от 0 до 3), что позволяет определить степень депрессии по сумме баллов: 0–13 — минимальная депрессия; 14–19 — легкая депрессия; 20–28 — умеренная депрессия; 29–63 — тяжелая депрессия. Эта шкала удобна для быстрого скрининга и оценки динамики депрессивных симптомов в рамках исследования. Шкала Гамильтона — это экспертная клиническая шкала, которая оценивает в первую очередь физические и аффективные проявления депрессии. В стандартной версии содержит 17–21 пункт, каждый из которых оценивается по определенной шкале. Врач или исследователь заполняет шкалу на основе интервью с пациентом, оценивая выраженность симптомов, таких как настроение, чувство вины, суицидальные мысли, бессонница, изменение аппетита и др. Баллы суммируются, и итоговая оценка позволяет определить степень. Это сочетание самосубъективных и экспертных методов позволяет получить комплексную и точную картину уровня депрессии, отслеживать динамику в течение исследования и оценивать эффективность проведенных интервенций.

- Третий этап — анализ полученного материала и формулирование заключений — статистический анализ результатов проводили на IBM с использованием статистических программ STATISTICA 28.0., достоверность различий между группами проверялась с помощью t-теста Стьюдента и критерия χ^2 Пирсона.
- Четвертый этап — контроль достоверности выводов (каждый этап сбора и анализа информации проходил двойную проверку). Все промежуточные итоги сверялись независимой комиссией экспертов, состоящей из кардиологов, неврологов и психологов.

Результаты исследования

Полученные данные подтвердили высокий процент распространения депрессивных состояний среди обследованных пациентов. Было выявлено, что женщины чаще подвержены развитию депрессии, особенно

в молодом возрасте. У 70 % исследуемых наблюдалось ухудшение общего самочувствия, снижение работоспособности и социальной активности. Психологические нарушения оказывали негативное влияние на динамику основных клинических проявлений болезни, увеличивали количество госпитализаций и ухудшали прогноз течения патологии. Комплекс реабилитационно-терапевтических мероприятий способствовал улучшению состояния сердечно-сосудистой системы, снижению метаболических рисков, стабилизации гемодинамических параметров и значительному уменьшению проявлений депрессивного синдрома у пациентов с сочетанной патологией. У 73 % пациентов в начале исследования отмечались следующие изменения лабораторных анализов: общий анализ крови — умеренная анемия ($Hb \sim 110$ /л), повышенный уровень СОЭ (~ 25 мм/ч), незначительное повышение общего числа лейкоцитов ($\sim 8 \times 10^9$ клеток/л), биохимия крови — гиперлипидемия (общий холестерин > 8 ммоль/л, ЛПНП > 4 ммоль/л, триглицериды > 2 ммоль/л), повышенный уровень гликированного гемоглобина ($HbA1C > 6$ %), незначительно повышенные печёночные пробы (АЛТ, АСТ около верхней границы нормы); коагулограмма — склонность к тромбообразованию (умеренно увеличенный D-димер, слегка удлинённое МНО). При проведении инструментальных методов исследования: электрокардиограмма (ЭКГ): признаки гипертрофии левого желудочка, нарушения реполяризации, эпизодическое нарушение ритма (экстрасистолы); эхокардиография (УЗИ сердца): снижение фракции выброса (< 55 %), дилатация камер сердца, утолщение стенок. Артериальное давление: нестабильное высокое артериальное давление (среднее значение 150/90 мм рт. ст., эпизоды гипертонических кризов). Субъективные показатели: По шкале Бека депрессия средней степени тяжести (баллы 20–29); нарушение сна, повышенная тревожность, апатия, ухудшение когнитивных функций.

После комплексного лечения наблюдались положительные изменения: лабораторные показатели — общий анализ крови — нормальный уровень гемоглобина (около 130 г/л), снижение СОЭ до нормальных величин (< 15 мм/ч), стабилизация количества лейкоцитов; биохимия крови — значительное снижение уровней холестерина (общее < 5 ммоль/л, ЛПНП < 3 ммоль/л), коррекция гипергликемии ($HbA1C \leq 6$ %); коагулограмма — снижение риска тромбозов (нормализуется D-димер, стабилизация МНО в пределах целевых значений). Инструментальные показатели: ЭКГ — восстановление нормального синусового ритма, отсутствие экстрасистол, снижение признаков перегрузки миокарда; ЭХО КГ — увеличение фракции выброса до нормальной величины (≥ 55 %), уменьшение размеров полостей сердца, исчезновение патологической регургитации. Артериальное давление: достижение целевого диапазона ($\leq 130/90$ мм рт. ст.) и стабильность показаний. Психосоциальный статус: значительное снижение уровня депрессии (шкала Бека:

баллы < 10), восстановление интереса к повседневной активности, улучшаются сон и общее самочувствие.

Исходя из проведённого исследования, нами предлагается следующий алгоритм действий врача-кардиолога при подозрении на развитие депрессии у пациента с ССЗ на фоне СНДСТ, направленный на улучшение качества жизни данных пациентов.

Алгоритм ведения пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями на фоне дисплазии соединительной ткани и сопутствующими депрессивными расстройствами:

1. Скрининг и ранняя диагностика — использование специальных шкал депрессии (например, опросника Бека или Гамильтона) для быстрой оценки состояния; интервью с пациентом, позволяющее оценить жалобы на снижение настроения, усталость, потерю интереса к привычным занятиям и нарушение сна; контроль лабораторных показателей, которые могут указывать на возможные физиологические изменения, провоцирующие депрессивные симптомы (уровень гормонов, метаболические нарушения) и инструментальные исследований.

Подтверждение диагноза осуществляется неврологом, психиатром или медицинским психологом.

2. Комплексная оценка рисков — генетические предрасположенности (семейный анамнез сердечно-сосудистых заболеваний и депрессий); возраст пациента (более высокая частота депрессий отмечается у молодых женщин и пожилых мужчин); социально-экономические факторы (низкое материальное обеспечение, отсутствие поддержки со стороны окружающих); образ жизни (неправильное питание, гиподинамия, курение, злоупотребление алкоголем); другие сопутствующие заболевания (гипертония, сахарный диабет, ожирение).
3. Подтверждение диагноза депрессии — требует консультации специалиста психиатрического профиля или медицинского психолога. Необходимо пройти дополнительное обследование для исключения органической природы депрессивных симптомов: нейропсихологический тест для оценки когнитивных функций; консультация невролога для исключения возможных неврологических заболеваний; осмотр эндокринолога для проверки функционирования желез внутренней секреции.
4. Лечение депрессивных расстройств у пациентов с ССЗ на фоне СНДСТ обязательно должно проводиться совместно кардиологом, неврологом и психиатром (психотерапевтом): медикаментозная терапия антидепрессантами третьего поко-

ления; применение вспомогательных медикаментов; психотерапия (когнитивно-поведенческая терапия, поддержка самооэффективности, обучение релаксации); физическая реабилитация (лечебная физкультура, массаж, водные процедуры). Важно соблюдать осторожность при назначении антидепрессантов пациентам с нестабильной гемодинамикой и аритмиями, учитывая возможное взаимодействие препаратов с кардиологическими средствами.

5. Поддерживающая терапия и профилактика рецидивов. После стабилизации психического состояния важно обеспечить длительное сопровождение пациента, направленное на предупреждение повторного обострения депрессии: периодические осмотры психиатра каждые 3–6 месяцев; самостоятельный контроль состояния пациентом с помощью дневника настроений; изменение образа жизни (регулярные физические нагрузки, правильное питание, отказ от курения и алкоголя); активизация социальной поддержки (группы взаимопомощи, консультативная помощь семьям).
6. Мониторинг динамики и оценка эффективности терапии — регулярно проводить оценку состояния пациента, используя стандартизированные шкалы и повторные визиты, повторное заполнение опросника Бека или Гамильтона через 3–6 месяцев после начала терапии, контроль лабораторных показателей (гормоны стресса, метаболиты); контроль артериального давления и ЭКГ для предотвращения внезапных осложнений.

Рекомендуется привлечение членов семьи и близких родственников к процессу реабилитации пациента.

Важно помнить, что любое вмешательство требует индивидуального подхода и учитывать сопутствующие факторы риска. Данный алгоритм позволяет минимизировать риски осложнений и повышает шансы на успешную адаптацию пациентов к своей ситуации, улучшив качество жизни и прогноз заболевания.

Заключение

Депрессия представляет собой серьёзную проблему для пациентов с сердечно-сосудистой патологией на фоне СНДСТ. Своевременная диагностика и адекватное лечение депрессивных нарушений способны существенно повысить эффективность терапии основного заболевания, снизить заболеваемость и сократить расходы системы здравоохранения. Проведённое исследование подтвердило высокую распространённость депрессивных расстройств среди пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями на фоне дисплазии соединительной ткани. Установлено, что степень тяжести

депрессии зависит от пола, возраста, наличия коморбидных состояний и социального окружения больного. Необходимость разработки индивидуальных алгоритмов диагностики и терапии подчёркивает важность междисциплинарного подхода к ведению таких пациентов. Анализируя полученные данные, мы выявили ряд закономерностей — женщины оказались более склонны к развитию депрессивных состояний, причём пик заболеваемости приходился на период 40–50 лет, высокий индекс массы тела и низкая физическая активность способствовали усугублению негативных эмоций, наличие сопутствующих эндокринных патологий (сахарный диабет, гипотиреоз) повышало вероятность появления депрессии; длительность течения основного заболевания положительно коррелировала с уровнем тревожности и степенью снижения настроения, социально-экономическое неблагополучие являлось дополнительным стрессовым фактором, усиливающим негативные переживания.

Также были выявлены различия в динамике депрессии у разных групп пациентов:

молодые мужчины демонстрировали быстрый темп восстановления нормального психологического фона; пациенты 50–60 лет испытывали трудности адаптации к новым условиям жизни и нуждались в дополнительной психологической поддержке.

Предлагаемый алгоритм и методика подходят для широкого внедрения в практику медицинских учреждений разного уровня, обеспечивая эффективное управление депрессией у пациентов с ССЗ на фоне СНДСТ: 1. Поликлинические отделения. Врач-терапевт или семейный доктор проводит первичное обследование и обнаруживает подозрения на наличие депрессии у пациента с ССЗ. Далее, следуя разработанному алгоритму, назначается консультация кардиолога и психиатра. Специалисты поликлинических подразделений смогут активно применять инструментарий диагностики депрессии, оценивая её выраженность и предлагая начальное направление на необходимую медицинскую поддержку. 2. Специализированные кардиологические центры. Врачи-кардиологи, работающие в условиях специализированных клиник, будут иметь чёткую структуру действий для назначения необходимой терапии депрессии у пациентов с имеющейся сердечно-сосудистой патологией. Возможность интеграции современных подходов к психотерапии, начиная от онлайн-консультаций и заканчивая очными сеансами с медицинскими психологами. 3. Стационары многопрофильного типа. Применение методики обеспечивает комплексное лечение в рамках стационарного наблюдения, позволяя вовремя выявлять и устранять депрессивные расстройства у пациентов, находящихся на лечении в отделении кардиологии. Данный подход эффективен в условиях ин-

тенсивной терапии, так как позволяет избежать осложнений и улучшить прогноз выздоровления. 4. Центры амбулаторной хирургии и хирургического вмешательства. Перед операциями на сердце или сосудах целесообразно осуществлять оценку психологического состояния пациента, чтобы предупредить послеоперационные осложнения, вызванные депрессивными эпизодами. Подобный подход снижает риски длительной нетрудоспособности и улучшает результаты оперативного лечения. 5. Реабилитационные центры. Программа реабилитации после перенесённых сердечно-сосудистых катастроф включает мероприятия по восстановлению физического и психологического благополучия пациента. Включённый в программу диагностики и лечения депрессии компонент повышает общую эффективность восстановительных процедур, ускоряя возвращение пациента к активной жизни. 6. Научно-исследовательские институты и образовательные учреждения. Исследовательские проекты, направленные на совершенствование методов диагностики и лечения депрессии у пациентов с ССЗ, получают новый стимул благодаря внедрению разработанного алгоритма. Учебные заведения могут вклю-

чить данную методологию в учебные курсы подготовки студентов-медиков и повышение квалификации практикующих врачей. 7. Семейные врачи и педиатры. Семьи пациентов с дисплазией соединительной ткани получают дополнительный ресурс для понимания и контроля над своим здоровьем посредством вовлечения семейного врача в процесс раннего выявления депрессии. Особенно актуально для детей и подростков, чьи родители страдают подобными нарушениями. Такой подход существенно повысит качество жизни пациентов, снизит социальную нагрузку и предотвратит серьёзные последствия депрессивных состояний.

Предложенный алгоритм помогает уменьшить частоту обострений и предотвратить развитие серьёзных последствий. Дальнейшие направления научных изысканий включают детальное изучение молекулярно-биохимических основ взаимосвязи между депрессией и ССЗ на фоне СНДСТ, внедрение инновационных технологий диагностики и мониторинга, расширение спектра используемых лечебных методик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горохова О.В., Савельева Н.А., Евсюкова А.И. Особенности проявления депрессии у пациентов с артериальной гипертензией // Российский медицинский журнал. 2023. № 23. С. 125–129.
2. Козлова Е.Ю., Глушков Ю.С., Чазова И.Е. Современные представления о роли эндотелия в патогенезе сердечно-сосудистых заболеваний // Кардиология. 2022. Т. 62, № 11. С. 54–61.
3. Малютина С.К., Белозерцева Ю.М., Забродская Ю.Н. Связь генетических маркеров воспаления с риском инфаркта миокарда // Медицинская наука и практика. 2021. № 4. С. 12–17.
4. Михайлов В.П., Краснова И.Г., Виноградова А.Б. Значение биохимических показателей крови в оценке риска тромбоза глубоких вен нижних конечностей // Клиническая медицина. 2020. № 3. С. 10–14.
5. Патент на изобретение № 2665387 Российская Федерация. Способ диагностики дисплазии соединительной ткани: заявл. 04.05.2017; опубл. 29.08.2018 / Елыкова В.А., Копылова А.Н.
6. Шустов Е.Б., Калашникова Л.А., Розанова А.А. Современная концепция комбинированной лекарственной терапии хронической боли // Боль. 2024. № 2. С. 35–40.
7. Belcheva E.G., Dzhandzhugazyan K.N., Petrov V.V. Role of depression in the pathogenesis of cardiovascular diseases // Journal of Cardiology. 2023. Vol. 13, No. 2. Pp. 123–129.
8. Fritsche L.H., Hensel J.S., Niemeyer B.K. The influence of psychological factors on cardiac rehabilitation outcomes // European Heart Journal. 2021. Vol. 42, Issue 33. Pp. 3254–3262.
9. Koller M.T., Lindner M.W., Diehl A.J. Depression as a risk factor for coronary heart disease: systematic review and meta-analysis // American Journal of Psychiatry. 2022. Vol. 179, No. 10. Pp. 934–943.
10. McDonald K.P., Arroyo A.D., Balakrishnan K.R. Psychosocial stressors, and their impact on cardiovascular health // Current Opinion in Psychology. 2024. Vol. 48. Pp. 89–95.
11. Szabo Z.L., Csaszar A.E., Benyovszky O.A. Psychological interventions improve quality of life in patients with congenital heart defects // Pediatric Cardiology. 2020. Vol. 41, No. 10. Pp. 1947–1955.

© Султанова Оксана Эседуллаевна (oksanka.sultanova@mail.ru); Чернышева Елена Николаевна (lena.chernysheva@inbox.ru); Джаалали Уаиль (djaalaliatrakhan@gmail.com); Наамун Даллель (dallel25naa@gmail.com); Трабелси Шаима (chaimadawla16@gmail.com); Герби Салман (salmengherbi95@gmail.com); Руис Хауа Джохар (rouishaoua87@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ГЕНДЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ГОМОЦИСТЕИНА НА РИСК ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОСТРОГО КОРОНАРНОГО СИНДРОМА У ПАЦИЕНТОВ С СИНДРОМОМ НЕДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ ДИСПЛАЗИИ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ

GENDER-SPECIFIC EFFECTS OF HOMOCYSTEINE ON THE RISK OF ACUTE CORONARY SYNDROME IN PATIENTS WITH UNDIFFERENTIATED CONNECTIVE TISSUE DYSPLASIA SYNDROME

**O. Sultanova
E. Chernysheva
N. Prokopenko
A. Pecherov
Khojha Shuruk
Manal Sheddura**

Summary. Research Objective: to study the gender-specific features of homocysteine influence on the risk of developing acute coronary syndrome (ACS) in patients with undifferentiated connective tissue dysplasia (UCTD). *Materials and Methods:* a prospective cohort study was conducted, including men and women diagnosed with connective tissue dysplasia and at high risk of developing ACS. The study took place at PSO GKB No. 3 named after S.M. Kirov during 2019–2025. A total of 150 patients aged 40 to 65 years, with elevated risk factors for ACS against the background of UCTD, were examined. All patients underwent clinical, laboratory, and instrumental investigations. Diagnosis of UCTD was based on clinical guidelines: the clinical assessment included a questionnaire by V.A. Yelykomov and A.N. Kopylov; for confirmation, the presence of antibodies to collagens II and III was determined using ELISA (Oxtoproline [OP]). Homocysteine (Hcy) levels in plasma samples were measured via enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA). Statistical analysis of the results was performed using IBM SPSS Statistics 28.0 software. *Results:* the study confirmed significant gender differences in homocysteine levels among the examined groups and revealed a close correlation between elevated homocysteine levels and increased risk of acute coronary events in patients with connective tissue dysplasia. *Conclusion:* it was established that men have significantly higher homocysteine concentrations and a greater risk of developing ACS compared to women, highlighting the need for an individualized approach to prevention and treatment. Additionally, the study developed recommendations for managing patients with UCTD and the risk of ACS.

Keywords: connective tissue dysplasia, acute coronary events, gender characteristics, homocysteine.

Султанова Оксана Эседуллаевна

кандидат медицинских наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
oksanka.sultanova@mail.ru

Чернышева Елена Николаевна

доктор медицинских наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
lena.chernysheva@inbox.ru

Прокопенко Надежда Андреевна

кандидат медицинских наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
kak33333@mail.ru

Печеров Александр Андреевич

доктор медицинских наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
kak33333@mail.ru

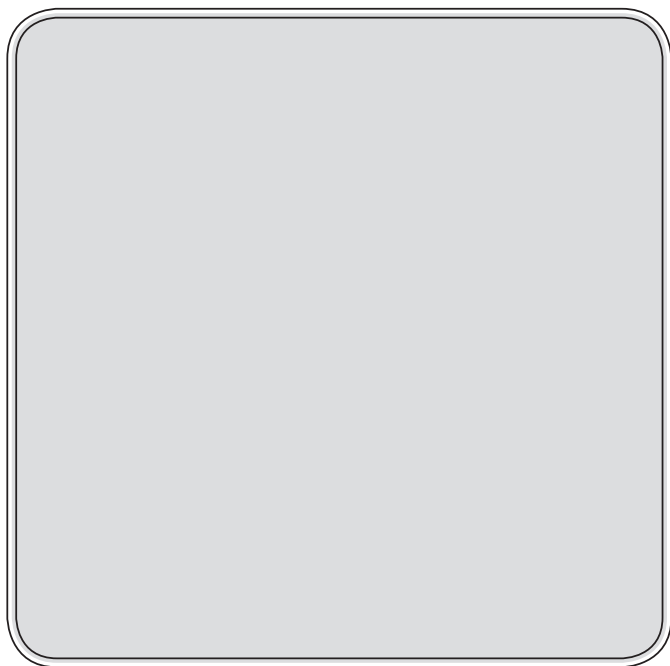
Ходжа Шурук

Ординатор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
Khodja.chourouk03@gmail.com

Манал Шеддира

Ординатор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
Manal.cheddira1803@gmail.com

Аннотация. Цель исследования: изучить гендерные особенности влияния гомоцистеина на риск возникновения острого коронарного синдрома у пациентов с синдромом недифференцированной дисплазии соединительной ткани. *Материалы и методы:* Проведено проспективное когортное исследование, включающее мужчин и женщин с диагностированной дисплазией соединительной ткани и высоким риском развития острого коронарного синдрома. в ПСО ГKB № 3 имени С.М. Кирова в 2019–2025 гг. Всего обследовано 150 пациентов в возрасте от 40 до 65 лет имеющих высокие показатели



Введение

Проблематика заболеваний сердечно-сосудистой системы (ССЗ) сохраняет свою значимость на протяжении последних десятилетий, являясь одной из основных причин смерти и инвалидизации населения большинства стран мира. По данным Всемирной организации здравоохранения, ежегодно около 17,9 млн человек умирают от ССЗ, что составляет примерно треть всех случаев смерти в мире. В частности, острые коронарные синдромы (ОКС), включая инфаркт миокарда и нестабильную стенокардию, являются важнейшими компонентами глобальной нагрузки на здоровье населения и медицинскую систему [1]. Смертность от болезней системы кровообращения за 2024 год по данным ГБУЗ Астраханской области «Медицинский информационно-аналитический центр» достигла 5414 человек (от острого коронарного синдрома 3 человека, от инфаркта миокарда 294, 28 человек от повторного инфаркта миокарда). При этом особая группа риска представлена пациентами с синдромом недифференцированной дисплазии соединительной ткани (СНДСТ), что связано с повышенной вероятностью развития сосудистой патологии вследствие структурных аномалий коллагенового каркаса организма. Заболеваемость СНДСТ оценивается приблизительно в 10–15 %, однако реальные цифры могут значительно превышать официальную статистику ввиду трудностей диагностики и не выявляемой дисплазий. Согласно современным эпидемиологическим исследованиям, распространённость ССЗ среди пациентов с СНДСТ достигает 25–30 %, тогда как общая заболеваемость населения составляет лишь около 10 % [1; 7]. Особенность проявлений сердечно-сосудистых нарушений

риска развития ОКС на фоне СНДСТ. Всем пациентам проводились клинко-лабораторные и инструментальные исследования. Диагностика СНДСТ проводилась на основании клинических рекомендаций: клиническая часть — анкетирование по Елыкову В.А. и Копылову А.Н.; для подтверждения СНДСТ проводилось определение уровня антител человека к коллагенам II и III типа методом ИФА (оксипролин (ОР)). Определения содержания уровня Нсу в образцах плазмы проводилось методом иммуноферментного анализа. Статистический анализ результатов проводили на IBM с использованием статистических программ STATISTICA 28.0. *Результаты исследования:* результаты исследования подтвердили существование значительных половых различий в уровнях гомоцистеина исследуемых групп, а также выявили тесную взаимосвязь между высоким содержанием гомоцистеина и риском острых коронарных событий у пациентов с дисплазией соединительной ткани. *Заключение:* Установлено, что у мужчин наблюдается значительно более высокая концентрация гомоцистеина, а также больший риск развития ОКС по сравнению с женщинами, подчёркивая необходимость индивидуального подхода к профилактике и лечению. В ходе исследования были разработаны рекомендации по ведению пациентов с СНДСТ и риском возникновения ОКС.

Ключевые слова: дисплазия соединительной ткани, острые коронарные события, гендерные особенности, гомоцистеин.

у пациентов с СНДСТ заключается в особенностях анатомического строения тканей, что ведёт к повышению вероятности ранних аневризм, разрывов аорты, пролапсирования створок митрального клапана и ряда других критических состояний, повышающих риски инсультов и инфарктов [10]. Помимо вышеуказанного, крайне важным фактором риска развития сердечно-сосудистых осложнений является нарушение обмена веществ, включая дисбаланс в обмене аминокислоты гомоцистеина. Высокий уровень гомоцистеина в крови рассматривается как независимый фактор риска развития ишемической болезни сердца, поскольку способствует развитию эндотелиальной дисфункции, повреждению клеток гладких мышц сосудов и активации процессов тромбообразования [3; 4]. Немаловажным аспектом проблемы остаётся учёт половых различий в проявлении сердечно-сосудистых заболеваний. Анализ статистики показывает, что риск тяжёлых сердечно-сосудистых событий у мужчин существенно превышает таковой у женщин, несмотря на сходную частоту наличия predisposing факторов, таких как курение, ожирение и гипертония. Причины этого явления остаются предметом активных научных изысканий, однако ряд исследователей предполагает ключевую роль гормональных факторов и особенностей образа жизни в формировании половых отличий в течение сердечно-сосудистых заболеваний [9; 11]. Учитывая вышеописанные факторы, представляется необходимым углублённое изучение вопроса о зависимости между уровнем гомоцистеина и риском развития острого коронарного синдрома у пациентов с дисплазией соединительной ткани, принимая во внимание гендерные различия в показателях здоровья. Подобные исследования необходимы для оптимизации стратегии

профилактики и лечения сердечно-сосудистых осложнений у данной группы пациентов, улучшения качества медицинской помощи и снижения экономических затрат на здравоохранение.

Цель исследования

Изучить гендерные особенности влияния гомоцистеина на риск возникновения острого коронарного синдрома у пациентов с синдромом недифференцированной дисплазии соединительной ткани.

Материалы и методы

Проведено проспективное когортное исследование, включающее мужчин и женщин с диагностированной дисплазией соединительной ткани. Клинические данные проведенного исследования получены в ПСО ГКБ № 3 имени С.М. Кирова в 2019–2024 гг. Пациентами подписаны и предоставлены добровольные информированные согласия об участии в исследовании. Исследование было одобрено Этическим комитетом медицинского учреждения и соответствовало принципам Хельсинкской Декларации. Всего обследовано 150 пациентов в возрасте от 40 до 65 лет имеющих высокие показатели риска развития ОКС на фоне СНДСТ.

Критерии включения были следующими: согласие пациентов на обследование, наличие подтвержденного синдрома недифференцированной дисплазии соединительной ткани, отсутствие острой патологии сердечно-сосудистой системы на момент начала обследования.

Всем пациентам определялись клиничко-лабораторные (общий анализ крови; общий анализ мочи); биохимические показатели крови (креатинин, печеночные пробы, липидный спектр, глюкоза); содержание микроэлементов (Mg, K, Ca); маркеры некроза миокарда (количественное определение тропонина I, MB — фракции креатинфосфокиназы); коагулограмма и проводились инструментальные исследования (ЭКГ в 12 стандартных отведениях), холтеровское мониторирование ритма сердца и программы анализа MT-200, эхокардиоскопия на аппарате, селективная коронароангиография. Для определения содержания уровня Hcy в образцах плазмы использовался метод иммуноферментного анализа с помощью коммерческой тест системы «Axis Homocysteine» (каталожный номер FHCY100), фирма «Axis-shield Diagnostigs Ltd», Великобритания, поставщик ЗАО «БиоХимМак» г. Москва, согласно прилагаемой к ней инструкции. Диагностика СНДСТ проводилась на основании клинических рекомендаций [6]: клиническая часть — анкетирование по Елыкову В.А. и Копылову А.Н. (обнаружение 6 и более стигм дисэмбриогенеза) [8]; лабораторная часть — проводилось определение уровня антител человека к коллагенам II и III типа мето-

дом ИФА (оксипролин (OP)) с помощью коммерческой тест-системы (каталожный номер CEA808Ge фирмы «Иммунотэкс», г. Ставрополь, Ставропольский край) согласно прилагаемой к ней инструкции.

Статистический анализ результатов проводили на IBM с использованием статистических программ STATISTICA 28.0., достоверность различий между группами проверялась с помощью t-теста Стьюдента. Для количественных переменных рассчитывался среднеарифметический показатель и стандартное отклонение, а для категориальных данных использовался критерий χ^2 Пирсона. Для проверки гипотез использовали парный t-критерий Стьюдента или непараметрический U-критерий Манна-Уитни в зависимости от характера распределения данных. Уровень значимости устанавливался на отметке $p \leq 0,05$. Связь между показателями гомоцистеина и частотой сердечно-сосудистых событий исследовалась с помощью множественного логистического регрессионного анализа, где зависимая переменная представляла собой статус наличия острого коронарного синдрома (ОКС), а независимыми переменными служили концентрация гомоцистеина, пол, возраст, индекс массы тела (ИМТ), общий холестерин, систолическое давление и другие факторы риска.

Результаты исследования

Анализ показал существенный половой диморфизм в распределении концентрации гомоцистеина в группе обследованных пациентов с ОКС на фоне СНДСТ (данные представлены в таблице 1).

Таблица 1.

Основные демографические и клиничко-лабораторные характеристики выборки

Параметры	Мужчины (n=74)	Женщины (n=76)
Возраст	43,1 ± 10,2	47,1 ± 10,6
Общий холестерин (ммоль/л)	5,2 ± 1,1	5,0 ± 1,0
ЛПНП (ммоль/л)	3,3 ± 0,9	3,1 ± 0,8
Артериальное давление (мм рт. ст.)	45	37
Индекс массы тела (кг/м ²)	26,4 ± 3,5	25,8 ± 3,1
Сахарный диабет	12	8
Курение	28	9
Триглицериды (ммоль/л)	1,5 ± 0,6	1,3 ± 0,5
Гомоцистеин (мкмоль/л)	31,7 ± 2,3	25,3 ± 2,0

Примечательно, что мужчины имели более высокие средние значения гомоцистеина по сравнению с женщинами ($p=0,003$), что подтверждает предположение о наличии существенных половых различий в уровне этого маркера риска.

Важно отметить, что обнаруженная связь оказалась независимой от возраста, индекса массы тела, курения и других традиционных факторов риска сердечно-сосудистых заболеваний.

Всего в исследуемых группах зарегистрировано 32 случая ОКС (21,3 %).

У мужчин зафиксировано 23 случая (31,1 %), у женщин — 9 случаев (11,8 %). Таким образом, относительный риск развития ОКС у мужчин оказался в 2,6 раза выше. Данный вывод подчёркивает значительный вклад пола в формирование сердечно-сосудистого риска у пациентов с СНДСТ.

В результате логистического регрессионного анализа были выявлены дополнительные факторы риска, тесно ассоциированные с эпизодами ОКС: коэффициент риска для уровня гомоцистеина выше 25 мкмоль/л; наличие сахарного диабета повышало риск в 2,4 раза; длительность основного заболевания также имела значение, увеличивая риск на 1,3 %.

Таким образом, результаты исследования подтвердили существование значительных половых различий в уровнях гомоцистеина, а также выявили тесную взаимосвязь между высоким содержанием гомоцистеина и риском острых коронарных событий у пациентов с СНДСТ.

В ходе исследования были разработаны рекомендации по ведению пациентов с СНДСТ и риском возникновения ОКС:

- регулярное обследование (1 раз в месяц) — лабораторные тесты (определение уровня гомоцистеина, глюкозы крови, липидов); инструментальная диагностика (ЭКГ, эхокардиография, УЗИ сосудов);
- коррекция образа жизни: рациональное питание с ограничением продуктов, повышающих уровень гомоцистеина, регулярные физические нагрузки умеренной интенсивности, отказ от курения и употребления алкоголя;
- предупреждение тромбозов (учитывая повышенный риск тромбообразования, возможно применение антикоагулянтов и антиагрегантов, однако решение принимается индивидуально врачом-кардиологом);

- психологическая поддержка: важно учитывать психологическое состояние пациентов, так как стрессовые ситуации могут усугублять течение заболевания.
- индивидуализация терапии: подбор лекарственных препаратов с учётом уровня гомоцистеина (использование антиоксидантов, витаминов группы В и фолиевой кислоты для снижения уровня гомоцистеина);
- гиполипидемическая терапия (статины назначаются пациентам с повышенным уровнем холестерина для предотвращения атеросклероза);
- кардиопротекция (препараты, улучшающие метаболизм миокарда, помогают поддерживать сердечную деятельность).

Так же в ходе исследования нами предложен алгоритм действий врача-кардиолога при ведении пациентов с повышенным риском ОКС и наличием СНДСТ:

- оценка состояния пациента: сбор анамнеза, физикальное обследование, лабораторные (включая определение уровня гомоцистеина) и инструментальные исследования;
- анкетирование на наличие синдрома дисплазии соединительной ткани;
- определение степени риска;
- назначение соответствующей терапии: выбор лекарственных препаратов
- коррекция образа жизни;
- мониторинг эффективности лечения: контроль лабораторных показателей и клинического состояния пациента.

Заключение

Исследование подтвердило наличие чёткого полового диморфизма в распределении уровня гомоцистеина у пациентов с повышенным риском развития ОКС на фоне СНДСТ. Установлено, что у мужчин наблюдается значительно более высокая концентрация гомоцистеина, а также больший риск развития ОКС по сравнению с женщинами, подчёркивая необходимость индивидуального подхода к профилактике и лечению сердечных патологий у пациентов с дисплазиями соединительной ткани.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенова Е.И., Камынина Н.Н., Турзин П.С. Профилактика сердечно-сосудистых заболеваний среди населения зарубежных стран и в Российской Федерации: экспертный обзор // Электронное издание. М.: 2024.
2. Верещагина Г.Н. Системная дисплазия соединительной ткани. Клинические синдромы, диагностика, подходы к лечению / Г.Н. Верещагина. — Новосибирск: НГМУ, 2008. — 37 с.
3. Верткин А.Л., Тополянский А.В. Проблема гипергомоцистеинемии у кардиологических больных // Фарматека. — 2007. — № 14. — С. 14–18.

4. Давтян К.У. Диспластические синдромы и фенотипы как возможный предиктор развития фибрилляции предсердий у больных с ишемической болезнью сердца: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата медицинских наук / Федеральный центр сердца, крови и эндокринологии имени В.А. Алмазова. — Санкт-Петербург, 2010. — 22 с.
5. Демидов Р.О., Лапшина С.А., Якупова С.П., Мухина Р.Г. Дисплазия соединительной ткани: современные подходы к клинике, диагностике и лечению // Российский кардиологический журнал. — 2015. — № 4. — Т. 2. — С. 37–40.
6. Клинические рекомендации Российского научного медицинского общества терапевтов по диагностике, лечению и реабилитации пациентов с дисплазиями соединительной ткани (первый пересмотр) / под ред. А.И. Мартынова. — Текст: непосредственный // Медицинский вестник Северного Кавказа. — 2018. — Т. 3, № 1.2. — С. 137–209.
7. Мадиева М.Р., Рымбаева Т.Х. Клинико-эпидемиологическое значение синдрома дисплазии соединительной ткани в формировании врожденных пороков сердца // Наука и здравоохранение. — 2017. — № 4. — С. 94–112.
8. Елыкомова В.А., Копылова А.Н. Способ диагностики дисплазии соединительной ткани: патент РФ № 2665387 // Заявление: 04.05.2017; опубл. 29.08.2018.
9. Скородумова Е.Г., Костенко В.А., Скородумова Е.А., Сиверина А.В., Рысев А.В. Гендерные различия клинического течения и прогнозирования осложнений инфаркта миокарда левого желудочка в практике врача первого контакта // Скорая медицинская помощь. — 2019. — Т. 20, № 2. — С. 61–66.
10. Терещенко Ю.В., и др. Диастолическая функция сердца при дисплазии соединительной ткани // Лечащий врач. — 2019. — № 7. — С. 46–48.
11. Шаповалова Э.Б., Максимов С.А., Артамонова Г.В. Половые и гендерные различия сердечно-сосудистого риска // Российский кардиологический журнал. — 2019. — 24(4). — С. 99–104.

© Султанова Оксана Эседуллаевна (oksanka.sultanova@mail.ru); Чернышева Елена Николаевна (lena.chernysheva@inbox.ru);

Прокопенко Надежда Андреевна (kak33333@mail.ru); Печеров Александр Андреевич (kak33333@mail.ru);

Ходжа Шурук (Khodja.chourouk03@gmail.com); Манал Шеддира (Manal.cheddira1803@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ, ЛЕЧЕНИЯ И ПРОФИЛАКТИКИ ОСЛОЖНЕНИЙ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

APPLICATION OF DIGITAL TECHNOLOGIES FOR EFFECTIVE DIAGNOSTICS, TREATMENT, AND PREVENTION OF COMPLICATIONS OF DENTAL DISEASES

**F. Hafizova
K. Kuzmina
E. Silantjeva**

Summary. Modern dentistry is experiencing a global revolution. Thanks to the introduction of digital technologies, the possibilities of achieving aesthetic results, healthy and beautiful smiles, and safe procedures are expanding.

By incorporating diagnostic equipment, artificial intelligence, and electronic systems, these technologies help doctors make diagnoses, create treatment plans, and make decisions.

This article focuses on the exponential growth of the adoption and utilization of digital technologies by dentists in various fields. Due to its wide range of use in preventive, diagnostic, and therapeutic purposes, it significantly improves clinical outcomes, including the effectiveness of prevention, the quality of work performed, the functionality of treatment, and the prevention of complications.

Patients' satisfaction with the comfort and quality of dental care, the reduction of the time required for an appointment, and the ability to anticipate the outcome of treatment are the basis for the use of digital technologies, as well as the motivation for doctors to further improve and implement the achievements of digital transformation in their professional activities.

Keywords: digital dentistry, dentistry, digital technologies, diagnostic methods, prevention of complications, diagnostics, transformation, growth rates, photoprotocol, artificial intelligence.

Хафизова Фаниля Асгатовна

Кандидат медицинских наук, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань
fanilyakhafizova@mail.ru

Кузьмина Кристина Юрьевна

Ординатор, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань
cris.nesterova2014@yandex.ru

Силантьева Елена Николаевна

Кандидат медицинских наук, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань
elenasilantjeva@mail.ru

Аннотация. Современная стоматология переживает глобальную революцию. Благодаря внедрению цифровых технологий расширяются безграничные возможности достижения эстетических результатов, здоровья и красоты улыбки, безопасного проведения процедур.

Включая диагностическое оборудование, искусственный интеллект и электронные системы, они помогают врачам ставить диагнозы, строить планы лечения и принимать решения.

Статья посвящается исследованию экспоненциального роста освоения и активности применения врачами-стоматологами разных направлений, в своей работе цифровых технологий. За счет широты использования в профилактических, диагностических и лечебных целях, значительно повышается эффективность клинических показателей, выражающееся продуктивностью профилактики, качеством выполненной работы, функциональностью лечения, предотвращением осложнений.

Удовлетворенность пациентов комфортом и качеством оказанной стоматологической помощи, сокращение необходимого времени для приема, возможность предвидеть конечный результат лечения, являются основанием применения цифровых технологий, а также мотивацией врачей для дальнейшего совершенствования и реализации достижений цифровой трансформации в своей профессиональной деятельности.

Ключевые слова: цифровая стоматология, стоматология, цифровые технологии, методы диагностики, профилактика осложнений, диагностика, трансформация, темпы роста, фотопротокол, искусственный интеллект.

Актуальность

Цифровые технологии прочно вошли в нашу повседневность, и послужили перевести стоматологию на новый уровень, изменяя и совершенствуя процессы общения, обмена информацией, приобретения, проектирования и производства, принося неоспоримые преимущества в нашей повседневной работе [17]. Цифровая стоматология стала реальностью клиниче-

ских процедур и широко используется в стоматологии: в реабилитации полости рта, в терапии, имплантологии, ортодонтии, челюстно-лицевой хирургии и других областях. Цифровое совершенствование дает врачам такие преимущества как:

- повышение точности диагностики и лечения;
- сокращение времени на процедуры;
- улучшение взаимодействия с пациентами;
- профилактика осложнений.

Возможность точного копирования анатомии зубов или лица и переноса этой модели в виртуальную среду положила начало новому моменту — эре цифрового планирования. Разработка специального программного обеспечения для этой цели позволила виртуально планировать клинические этапы, оценивая возможные ошибки или точно прогнозируя степень износа при препарировании зуба, направление и длину имплантата, характер движения зуба и т.д. Таким образом, можно избежать ошибок в лечении методом проб и оперативных вмешательств, и оно планируется более эффективно и с меньшими затратами клинического времени с пациентом [12].

В последние годы в клиническую практику врача-стоматолога внедряются современные методы диагностики кариеса. Особенно важна ранняя диагностика, обеспечивающая минимизацию инвазивности лечения. Одним из этих методов, является цифровая фиброоптическая трансиллюминация, позволяющая обнаружить начальные кариозные поражения, вторичный кариес, апроксимальный кариес, трещины эмали зуба [13], [2].

Для более полной диагностики скрытых очагов деминерализации твердых тканей зубов применяется аппарат DIAGNOcam (Kavo). [7]. Метод основан на использовании генерируемого прибором излучения в не рентгеновском диапазоне волн, которое проходит через твердые ткани зуба. Цифровая камера фиксирует результат исследования и передает изображение на монитор в режиме реального времени [2].

Благодаря чему, неинвазивные и малоинвазивные методы лечения выходят на первый план, они делают возможным сохранить больший процент твердых тканей зуба, тем самым продлевая жизнеспособность на более продолжительный срок.

Для изготовления качественной и естественной улыбки в ортопедии, ортодонтии и терапии применяется фотопротокол. Фотография в стоматологии — это не просто красивые снимки, а важная часть цифрового процесса. Они позволяют «зафиксировать» информацию о пациенте, которую невозможно передать словами. Фотография также помогает в создании трехмерной модели лица пациента, что позволяет анализировать его форму и движение челюсти, а значит, планировать лечение еще более точно.

Немаловажное значение имеет цвет реставрации для пациента. Помимо фотопротокола с целью увеличения точности определяемого цвета созданы специальные оптические приборы — спектрометры. Суть работы аппаратной спектрометрии заключается в компьютерном анализе цвета, отображаемого с поверхности естественных зубов. Компьютерные алгоритмы автоматически

определяют тон, насыщенность, яркость отображаемого цвета и передают точную информацию. Тем самым, повышается точность определения цвета по сравнению с визуальным выбором оттенка, где возможна погрешность из-за отличия цветовосприятия цвета сетчаткой глаза у каждого индивидуума [6].

Наряду с эстетичностью в полости рта в настоящее время, стоматологи стараются применять принцип минимальной инвазии. Достичь минимальной инвазии возможно только при использовании увеличения. Увеличенное изображение операционного поля может помочь стоматологу лучше оценить препарирование полости, прилегание матрицы, инфильтрацию слюной, остатки дентина, наложение композита, морфологию окклюзионной области, макро / микродетали, текстуру поверхности реставрации, воздушные пустоты, загрязнения и выступающие контуры [9]. Всем этим требованиям отвечает применение современных бинокляров.

Биноклярные лупы в стоматологии, где требуется точность и внимание к деталям, стали незаменимым инструментом. Многие модели луп оснащены встроенным освещением, которое обеспечивает яркое и равномерное освещение рабочего поля, улучшая видимость. Но для лечения корневых каналов данного увеличения недостаточно, что привело к изобретению операционного микроскопа, и его применение стало настоящим прорывом, особенно в эндодонтии и оперативной стоматологии, что привело к значительному повышению эффективности лечения корневых каналов, эндодонтической хирургии и реставрации зубов [15],[8].

Современные стоматологические операционные микроскопы — это не просто увеличительные приборы. Они позволяют не только видеть детали, но и фиксировать их на фото и видео. Это необходимо для того, чтобы пациенту было лучше и легче понять пояснения, а также могут быть необходимы для решения юридических вопросов. [9].

Нельзя представить эндодонтическое лечение без использования КЛКТ. Конусно-лучевая компьютерная томография (КЛКТ) является основой цифрового планирования в эндодонтии. Эндодонтия основывает свое планирование на информации, полученной в результате тщательной навигации по изображениям КЛКТ, которые предоставляют подробную информацию о внутренней анатомии зубов и прилегающих структурах. [12].

Стоматологическая цифровизация нашла яркий отклик в ортопедической стоматологии, о чем свидетельствует появление высокотехнологичной аппаратуры. В первую очередь это интраоральные сканеры, которое используется и в ортопедии, и в хирургии, и в ортодонтии. [1]. Внедрение внутриротовых сканеров и передо-

вых производственных процессов, таких как технологии CAD / CAM и 3D-печать, позволило внедрить инновационные стоматологические материалы, не содержащие металлов, что дает возможность заменить обычные металлические каркасы и улучшить биомиметические и эстетические результаты реставраций [17]. Интегрированные цифровые рабочие процессы повышают предсказуемость и эффективность лечения, в то время как 3D-печать, искусственный интеллект (ИИ) и роботизированная хирургия предлагают индивидуальные методы лечения [14]. Системы CAD/CAM могут использоваться непосредственно в кабинете стоматолога для быстрого изготовления коронок, виниров и других протезов в течение одного посещения [5].

Применение системы CAD/CAM практически безгранично и в ортодонтии. С помощью виртуальных моделей можно планировать и изготавливать устройства для преортодонтического и ортодонтического лечения с использованием обычных брекетов или прозрачных элайнеров [11]. В сочетании с возросшим спросом на ортодонтическое лечение у взрослых и стремлением к персонализированному лечению эти разработки привели к росту спроса на прозрачные элайнеры, которые теперь доступны в любой ортодонтической клинике [10]. Так как цифровая стоматология не стоит на месте и для улучшения качества работы и снижения нагрузки на персонал в ортопедической стоматологии был изобретен виртуальный артикулятор — это компьютерный программный инструмент, который способен воспроизводить взаимосвязь между челюстями и имитировать движение челюсти. За последнее десятилетие к нему постепенно проявился исследовательский интерес в стоматологии. В ортопедии виртуальный артикулятор следует рассматривать как дополнительный инструмент диагностики и планирования лечения по сравнению с механическим артикулятором, особенно в сложных случаях, связанных с изменением вертикального размера прикуса [13]. В успешном процессе цифровизации не являются исключением и зуботехнические лаборатории, для которых, были разработаны программы-моделировщики. Данные программы позволяют зубному технику смоделировать любую ортопедическую конструкцию. Макет виртуальной «будущей улыбки» можно создать даже поверх не отпрепарированных зубов на 3D-модели слепка, полученного интраоральным сканированием или лабораторным сканером аналоговых моделей слепков. А возможности 3D-печати способствуют переводу цифровой информации в аналоговую систему [6]. 4D-печать — это относительно новая технология, стоящая на ступень выше 3D-печати. Основное отличие состоит в том, что конечный продукт 4D-печати может изменять свою форму или функции в ответ на внешние стимулы (температура, влажность, свет и др.). В стоматологии перспективы 4D-печати изучаются для создания материалов, способных адаптироваться к изменениям

в оральном пространстве [5]. Цифровая стоматология коснулась и такого направления как имплантология.

Цифровая имплантация — это использование компьютерного моделирования для планирования операции по установке зубных имплантатов.

Так в рамках одной программы, что предоставляет осуществлять позиционирование дентальных имплантатов, можно моделировать протетику и создавать навигационный шаблон, перенося результаты предварительного планирования на хирургический этап и исключая ряд ошибок и неточностей при работе, а также сокращению времени восстановления пациента [4].

Внедрение цифровых технологий в современную эпоху значительно улучшило область челюстно-лицевого протезирования. По сравнению с традиционной процедурой, это значительно улучшило как функциональные, так и эстетические результаты, а также позволило достичь их за меньшее время. Различные цифровые подходы, включая внутриротовое сканирование, 3D-печать и конусно-лучевую компьютерную томографию (КЛКТ), помогают в изготовлении челюстно-лицевых протезов. Обтураторы разрабатываются и печатаются в цифровом формате. Для изготовления протеза-обтуратора традиционный подход можно объединить с 3D-печатью, и окончательный вариант протеза можно легко спроектировать и напечатать с помощью CAD/CAM (автоматизированного проектирования и автоматизированного производства) [16].

Внедрение в стоматологию МИС стало настоящим успехом, благодаря чему, появилась возможность ведения электронных медицинских карт и сокращения времени для их заполнения. ЭМК позволяют не только собрать всю информацию о пациенте в одном месте из его истории болезни до результатов диагностики, включая рентгеновские снимки, но и сделать эту информацию доступной в любое время.

В настоящее время, можно констатировать, что появившиеся в стоматологии цифровые технологии привели к прогрессу во всех областях и во всех направлениях — в диагностике и лечении, а также в эстетической стоматологии [3].

Цель: Изучение влияния применения инновационных цифровых технологий в стоматологической практике для повышения эффективности качества оказания стоматологической помощи и медицинских услуг.

Материалы и методы

Для достижения этой цели была разработана анкета, демонстрирующая отношение врачей к применению

в своей практической деятельности, новых методов и цифровых технологий. Проведен опрос среди 25 врачей в 2023 и 2025 году, ведущих стоматологический прием по различным специальностям. Исследование включало анкетирование и метод описательной статистики анализа данных.

Анкета содержала 13 вопросов об использовании предложенных конкретных, новых методов и технологий, из которых нужно было выбрать один из 3-х вариантов ответов:

- демонстрирующих положительное отношение врачей к применению в своей практической де-

тельности, новых методов и цифровых технологий, выражающиеся вариантом ответа «Да»;

- демонстрирующих отрицательное отношение врачей к применению новых методов и цифровых технологий, выражающиеся вариантом ответа «Нет»;

- демонстрирующих нейтральное отношение врачей к применению новых методов и цифровых технологий, выражающиеся вариантом ответа «Затрудняюсь».

Анкета

Таблица 1.

Результаты анкетирования

2023 год				2025 год		
Вопросы	% участвующих в опросе врачей — стоматологов по специальностям					
1	Терапевт — 36 % Ортопед — 24 % Хирург — 12 % Хирург имплантолог — 12 % Ортодонт — 8 % Детский стоматолог — 8 %			Терапевт — 36 % Ортопед — 24 % Хирург — 12 % Хирург имплантолог — 12 % Ортодонт — 8 % Детский стоматолог — 8 %		
2	Положительно 60 %	Отрицательно 0 %	Затрудняюсь ответить 40 %	Положительно 92 %	Отрицательно 0 %	Затрудняюсь ответить 8 %
3	Да 8 %	Нет 2 %	Иногда 20 %	Да 32 %	Нет 44 %	Иногда 24 %
4	Да 8 %	Нет 0 %	Затрудняюсь ответить 92 %	Да 48 %	Нет 12 %	Затрудняюсь ответить 40 %
5	До года 28 %	Больше года 24 %	Не внедрял(а) 48 %	До года 60 %	Больше года 40 %	Не внедрял (а) 0 %
6	Слепки 80 %	Цифровые 8 %	И то и другое 12 %	Слепки 4 %	Цифровые 8 %	И то и другое 88 %
7	Да 52 %	Нет 0 %	Не изменилось 48 %	Да 88 %	Нет 0 %	Не изменилось 12 %
8	Да, значительно 24 %	Нет, не значительно 52 %	Не изменилось 24 %	Да, значительно 60 %	Нет, не значительно 24 %	Не изменилось 16 %
9	Да 12 %	Нет 20 %	Не всегда 68 %	Да 72 %	Нет 8 %	Не всегда 20 %
10	Да 28 %	Нет 28 %	Иногда 44 %	Да 92 %	Нет 8 %	Иногда 0 %
11	Да 60 %	Нет 0 %	Затрудняюсь ответить 40 %	Да 92 %	Нет 8 %	Затрудняюсь ответить 0 %
12	Прицельный снимок 60 %	КЛКТ 12 %	И то и другое 28 %	Прицельный снимок 16 %	КЛКТ 24 %	И то и другое 60 %
13	Да 40%	Нет 60%	Затрудняюсь ответить 0 %	Да 88 %	Нет 12 %	Затрудняюсь ответить 0 %

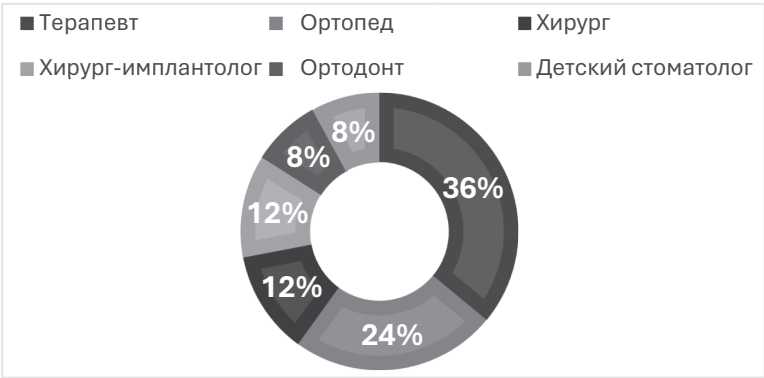


Диаграмма 1. Врачи специалисты, прошедшие анкетирование 2023, 2025 год

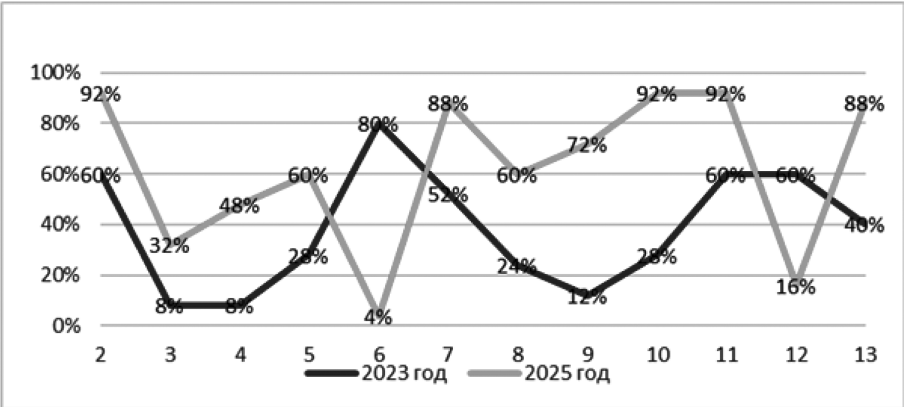


График 1. Ответы «положительно»

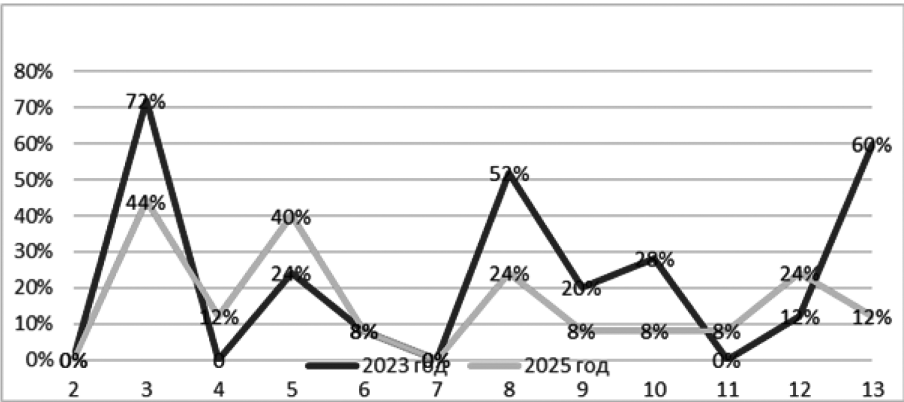


График 2. Ответы «отрицательно»

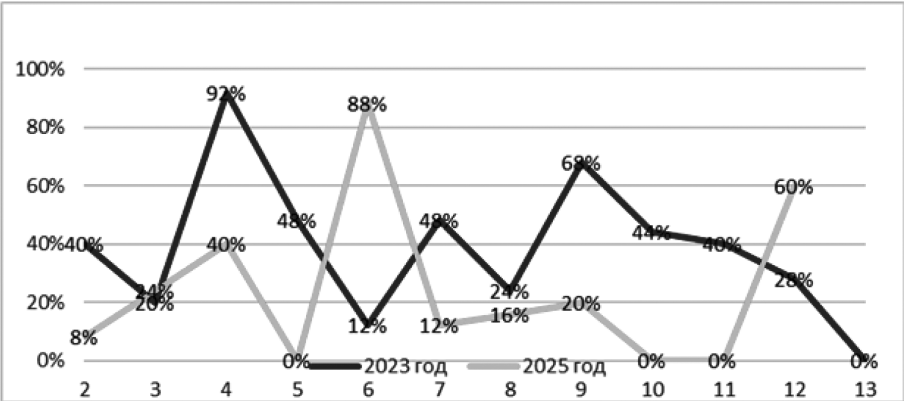


График 3. Ответы «Затрудняюсь ответить»

Результаты

Вопрос 1. Специальности врачей, участвовавших в анкетировании (процент участников между 2023 и 2025 году идентичен). (Диаграмма 1.)

- Терапевт — 36%
- Ортопед — 24%
- Хирург — 12%
- Хирург-Имплантолог — 12%
- Ортодонт — 8%
- Детский стоматолог — 8%

Вопрос 2. Положительное отношение к использованию новых технологий резко выросло с 60 % в 2023 году до 92 % в 2025 году.

Вопрос 3. Доля положительных ответов применения микроскопа, «Да» увеличилось с 8 % до 32 %, доля отрицательных ответов «Нет», снизилось с 72 % до 44 %.

Вопрос 4. Резкое увеличение положительных ответов с 8 % до 48 %, доля отрицательных ответов составило 0 % в 2023 году и 12 % в 2025 году.

Вопрос 5. Количество ответивших «До года», возросло с 28 % до 60 %; количество ответивших «Больше года», снизилось с 24 % до 40 %, число ответивших «Не внедряли» составило –48 % в 2023 году, 0 % в 2025 году.

Вопрос 6. Доля специалистов, использующих «традиционные слепки», упала с 80 % до 4 %, а использующих «И то и другое» выросло с 12 % до 88 %.

Вопрос 7. Наблюдается рост положительных ответов с 52 % до 88 %, отсутствие отрицательных ответов в 0 % случаев, уменьшение числа тех, кто ответил «Не изменилось» с –48 % до 12 %.

Вопрос 8. В 2023 году «Да, значительно» ответили — 24 %, рост положительных ответов в 2025 году составил –60 %, уменьшение отрицательных ответов с 52 % до 24 %, «не изменившихся» с 24 % уменьшилось до 16 %.

Вопрос 9. Наблюдается рост положительных ответов с 12 % до 72%, снижение отрицательных ответов с 20 % до 8 %. Количество ответов «Не всегда» снизилось с 68 % до 20 %.

Вопрос 10. Увеличение положительных ответов «Да», с 28 %, до 92 %. Снижение отрицательных ответов «Нет», с 28 %, до 8 %.

Вопрос 11. Рост положительных ответов с 60 % до 92 %, снижение отрицательных ответов с 0 % в 2023 году, до 8 % в 2025 году, затрудняюсь ответить, с 40 %, в 2023 году до 0 % в 2025 году.

Вопрос 12. Изменения методов диагностики и исследований в положительную сторону, КЛКТ с 12 % до 24 %, рост «И то и другое» с 28 % до 60 %, снижение количества прицельных снимков с 60 % до 16 %.

Вопрос 13. Наблюдается рост положительных ответов с 40 % до 88 %, снижение отрицательных ответов с 60 % до 12 %.

Обсуждение

Для сравнения данных исследования в анкетировании были задействованы в 2023, 2025 гг., одинаковое количество врачей по специальностям, процент их распределения не изменился.

- Терапевт — 36 %
- Ортопед — 24 %
- Хирург — 12 %
- Хирург-имплантолог — 12 %
- Ортодонт — 8 %
- Детский стоматолог — 8 %

Положительное отношение к использованию новых технологий и перехода на цифровые технологии, резко возросло с 60 % до 92 %. (График 1). Тенденция роста конструктивных ответов, отмечается во многих пунктах анкеты. Например: количество регулярно использующих микроскоп выросло с 8 % до 32 %. В связи с этим существенно увеличилась доля специалистов, замечаящих улучшение качества работы с 8 % до 48 %. К 2025 году все опрошенные внедряли в свою практику новые технологии и методы, процент внедрения возрос с 28 % до 60 %. Если в 2023 году слепки снимались традиционными методами и составляли 80 %, то в 2025 году снизилось применение таких методов до 4 %. Предпочтение отдавалось цифровым технологиям и составило 8 %. Выявляемость скрытого кариеса в результате применения технологии (DiagnoCam, сканирование) врачи подтверждают улучшение диагностики, с 60 % до 92 %.

Диагностику в стоматологии сложно представить без рентгенологических исследований. Совершенствования затрагивают не только методов и аппаратов в этой области, а растет и компетентность персонала. Так использование прицельных снимков в 2023 году составило 60 %, КЛКТ — 12 %, «и то и другое» 28 %, в 2025 году прицельных 16 %, КЛКТ 24 %, «и то и другое» 60 %, данные показатели свидетельствуют о применении более современных методов, а именно, об увеличении применения КЛКТ в 2 раза.

Современные технологии прочно входят в повседневную работу врача-стоматолога, для визуализации будущей улыбки все чаще используются программы моделировщики и фотопротоколы, для оценки и планирования лечения. Где также видна тенденция роста

показателей: с 12 % до 72 % при применении программ моделировщиков, и фотопротокола с 40 % до 88 %. Респонденты отмечают применение в своей работе МИС, где наблюдается положительный сдвиг с 28 % до 92 %.

В анкете присутствуют и значительное количество отрицательных ответов, особенно в 2023 году. Это можно объяснить недостаточной подготовкой персонала, новые методы и технологии не применялись в клинике регулярно.

Однако, в 2025 заметна тенденция уменьшения отрицательных ответов (График 2), что говорит о положительных изменениях в подходах к диагностике, об осведомленности и повышении знаний врачей о цифровых технологиях.

Очевиден рост доверия к технологиям: если в 2023 году большинство врачей затруднялись оценить влияние новых методов и технологий, связанное, по-видимому, с начальной стадией внедрения, с финансовыми ограничениями (График 3.), то в 2025 году большинство признали их эффективность.

Внедрение CRM и МИС оптимизируют внутренние процессы клиники, персонала в целом, и являются залогом качественного обслуживания пациентов.

МИС обеспечивает быстрый доступ к информации, экономя время на ее поиск и ввод, что способствует увеличению времени, которое врач может посвятить пациенту. Подтверждением этому являются ответы врачей-стоматологов о сокращении времени приема, 24 % в 2023 году, в 2025 году 60 %, соответственно отметили повышение эффективности рабочего процесса. Такие изменения не могли неблагоприятно сказаться на комфортном лечении пациентов, о чем свидетельствуют

данные о повышении положительных ответов с 52 % до 88 %.

Выводы

Сравнение результатов анкетирования в 2023 и 2025 году показывают: существенное увеличение положительного отношения врачей к новым технологиям, и обсуждаемым аспектам, так их доля в 2025 году увеличилась на треть, а применение ключевых инструментов — в 2–4 раза.

Тенденции роста свидетельствуют о цифровой трансформации стоматологии, охватывающей все этапы работы врача-стоматолога, от диагностики до планирования и фиксации результатов лечения, профилактики осложнений, а также в организации документооборота и взаимодействия с пациентами. Использование новых методов и подходов значительно выросло.

Ускоряются процессы планирования и лечения, возможности представления будущей конструкции и результатов лечения.

Положительная динамика доказывает о повышении знаний, мотивации, стремления врачей-стоматологов к освоению и внедрению новых технологий в свою практическую деятельность, и совершенствования на пути интегрирования цифровых технологий в современную стоматологию.

Все это дает основание считать, что цифровая стоматология, в настоящее время, не просто мода, а новая эра в стоматологии, открывающая новые границы в улучшении качества и скорости оказания медицинских услуг и медицинской помощи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вардомацкая Л.П., Кузнецова В.П. Цифровая стоматология в контексте повышения медико-экономической эффективности отрасли // Менеджмент XXI века: экономика, общество и образование в условиях новой нормальности : Сборник научных статей по материалам XX Международной научно-практической онлайн конференции, Санкт-Петербург, 24–25 ноября 2021 года. — Санкт-Петербург: Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, 2022. — С. 181–185. — EDN KJNGPM.
2. Возможности применения метода цифровой фиброоптической трансиллюминации при диагностике кариеса у детей / Гаврилова Е.П., Богданкина А.Ю., Мошкова А.И., Леванов В.М. // Медико-фармацевтический журнал Пульс. — 2019. — Т. 21, № 12. — С. 27–32. — DOI 10.26787/nyd-ha-2686-6838-2019-21-12-27-32. — EDN VPABUZ.
3. Галонский В.Г., Сурдо С., Чернов В.Н. Аналитический обзор современного состояния использования цифровых технологий в ортопедической стоматологии в Российской Федерации // Актуальные проблемы и перспективы развития стоматологии в условиях Севера: Сборник статей межрегиональной научно-практической конференции, посвященной 40-летию отделения
4. Использование цифровых технологий при планировании дентальной имплантации в клинике стоматологии Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова / В.А. Железняк, В.В. Балин, А.А. Сериков, В.А. Кузнецов и др. // Теоретические и практические вопросы клинической стоматологии: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 05–06 октября 2023 года. — Санкт-Петербург: Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова, 2023. — С. 36–40. — EDN TYUTBR.
5. Интеграция цифровых технологий в стоматологию-ортопедию: тенденции и проблемы / Л.С. Канукова, М.Р. Мрикаева, М.И. Исмаилова, А.Е. Мишвелов и др. // Медицина. Социология. Философия. Прикладные исследования. — 2024. — № 1. — С. 72–75. — EDN JRSMHJ.

6. Кузашев Э.Н., Горячева Е.В., Корещкая Е.А. Цифровые технологии в стоматологии // Тенденции развития науки и образования. — 2023. — № 96–7. — С. 32–35. — DOI 10.18411/trnio-04-2023-344. — EDN HVQNBS.
7. Столярова И.Е., Рихтер А.А. Применение цифровой фиброоптической трансиллюминации в диагностике заболеваний твердых тканей зубов // Scientist (Russia). — 2022. — № 2(20). — С. 66–72. — EDN YZDTYO.
8. Ф.А. Хафизова, А.И. Сабитова, И.Г. Сагетдинов, Д.Р. Габдрафиков. Оптимизация эндодонтического лечения зубов с применением современных методов диагностики при предоперационной подготовке (научная статья) // Научно-практический медицинский журнал «Наука молодых (Eruditio Juvenium)» (ISSN 2311–3820). — 2024 — №–2. — С.251–264.
9. Bud M., Jitaru S., Lucaciu O., Korkut B. et al. The advantages of the dental operative microscope in restorative dentistry. Med Pharm Rep. 2021 Jan;94(1):22–27. doi: 10.15386/mpr-1662. Epub 2021 Jan 29. PMID: 33629044; PMCID: PMC7880065.
10. Castroflorio T., Sedran A., Parrini S., Garino F. et al. Predictability of orthodontic tooth movement with aligners: effect of treatment design. Prog Orthod. 2023 Jan 16;24(1):2. doi: 10.1186/s40510-022-00453-0. Erratum in: Prog Orthod. 2023 Oct 24;24(1):47. doi: 10.1186/s40510-023-00499-8. PMID: 36642743; PMCID: PMC9840984
11. Cunha TMAD., Barbosa IDS., Palma KK. Orthodontic digital workflow: devices and clinical applications. Dental Press J Orthod. 2021 Dec 15;26(6): e21spe6. doi: 10.1590/2177-6709.26.6.e21spe6. PMID: 34932716; PMCID: PMC8690351.
12. Decurcio D.A., Bueno M.R., Silva J.A., Loureiro MAZ. et al. Digital Planning on Guided Endodontics Technology. Braz Dent J. 2021 Sep-Dec;32(5):23–33. doi: 10.1590/0103-6440202104740. PMID: 34877975.
13. Lepidi L., Galli M., Mastrangelo F., Venezia P. et al. Virtual Articulators and Virtual Mounting Procedures: Where Do We Stand? J Prosthodont. 2021 Jan;30(1):24–35. doi: 10.1111/jopr.13240. Epub 2020 Sep 2. PMID: 32827222.
14. Li P., Wan G., Xu S., Li A. Functional Biomaterials and Digital Technologies in Dentistry: From Bench to Bedside. J Funct Biomater. 2024 Apr 17;15(4):107. doi: 10.3390/jfb15040107. PMID: 38667564; PMCID: PMC11051381.
15. Liu B., Zhou X., Yue L., Hou B. et al. Experts consensus on the procedure of dental operative microscope in endodontics and operative dentistry. Int J Oral Sci. 2023 Sep 18;15(1):43. doi: 10.1038/s41368-023-00247-y. PMID: 37723147; PMCID: PMC10507013.
16. Paul A., Dhawan P., Jain N. Digital Applications in the Fabrication of Obturators in Maxillectomy Defects: A Systematic Review. Cureus. 2024 Sep 30;16(9): e70479. doi: 10.7759/cureus.70479. PMID: 39479135; PMCID: PMC11522840.
17. Spagnuolo G., Sorrentino R. The Role of Digital Devices in Dentistry: Clinical Trends and Scientific Evidence. J Clin Med. 2020 Jun 2;9(6):1692. doi: 10.3390/jcm9061692. PMID: 32498277; PMCID: PMC7356564.

© Хафизова Фаниля Асгатовна (familyakhafizova@mail.ru); Кузьмина Кристина Юрьевна (cris.nesterova2014@yandex.ru);

Силантьева Елена Николаевна (elenasilantjeva@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

Наши авторы

Advolotkin D. — Candidate of Technical Sciences, Research and Testing Center of Railway Troops Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow

Ahmedova S. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Dagestan State Medical University

Aksenov S. — Doctor of Economics, Professor, Ufa University of Science and Technology, Ufa

Aliyev N. — Endoscopist, CLD Clinic; Assistant, Dagestan State Medical University, Makhachkala

Arhangelsky A. — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Mozhaisky Military Space Academy

Artamonov A. — Candidate of Technical Sciences, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow

Batchaev A. — Postgraduate Student, U.D. Aliyev Karachay-Cherkess State University, Karachayevsk

Bayazitov F. — Ufa State Petroleum Technological University

Belyaev A. — Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan

Bespalov A. — Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan

Bogdasarov A. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Ulyanovsk State University

Bolgov D. — Cardiologist, BUZ VO VOKB № 1, Voronezh

Burdyukov M. — Doctor of Medical Sciences, Endoscopist, S.P. Botkin Moscow Municipal Research and Clinical Center of the Moscow Department of Health; Associate Professor, Russian Medical Academy of Continuous Professional Education of the Ministry of Health; Head, Federal Network of Euroonco Clinics, Moscow

Cherepanov N. — Candidate of Technical Sciences, The engineer of joint-stock company Lavochkin Association

Chernysheva E. — Doctor of Medical Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Astrakhan State Medical University

Davidyan L. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Ulyanovsk State University

Our authors

Djaalali Wail — Resident, Astrakhan State Medical University

Dyomin V. — Post-graduate student, Moscow City University, Moscow

Egorova A. — Postgraduate Student, Pacific National University, Khabarovsk

Eliseeva V. — Volgograd State Technical University

Fonin M. — Moscow State Technical University names Bauman

Goryachkin B. — Candidate of technical Sciences, Associate Professor, Moscow State Technical University names Bauman

Hafizova F. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Kazan (Volga Region) Federal University

Herbi Salman — Resident, Astrakhan State Medical University

Ichmelyan A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Ulyanovsk State University

Karapetyan K. — MIREA — Russian Technological University, Moscow

Karmitsky K. — Postgraduate Student, Russian State Social University, Moscow

Khakimova Z. — Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Mozhaisky Military Space Academy

Kharitonov A. — Postgraduate, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology

Khojha Shuruk — Resident, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Astrakhan State Medical University

Kononov A. — Lead Development Engineer, Center of Expertise for Web development of remote channels of GPB Bank (JSC)

Kosyura N. — Volgograd State Technical University

Kuzmina K. — Resident, Kazan (Volga Region) Federal University

Kuznetsov A. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Russian State Social University, Moscow

Kuznetsov D. — Cardiologist, BUZ VO VOKB № 1, Voronezh

Kuznetsov S. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko, Voronezh

Kuznetsov S. — Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education MIREA — Russian Technological University

Lobanov D. — Moscow State Technical University names Bauman

Lobanov O. — Postgraduate, Lecturer, Moscow State Technological University Stankin, Moscow

Makarova A. — Doctor of Technical Sciences, Professor, Russian University of Chemistry and Technology named after D.I. Mendeleev

Manal Sheddiura — Resident, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Astrakhan State Medical University

Marchenko S. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Volgograd State Agrarian University

Maximenko N. — Senior Lecturer, FSBEI HE Donetsk National Technical University

Mikhailov D. — Graduate student, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg

Muntian N. — Russian State Social University, Moscow

Muradyan I. — Resident physician, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko, Voronezh

Naamun Dallel — Resident, Astrakhan State Medical University

Nikonov V. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, MIREA — Russian Technological University, Moscow

Omarov N. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Dagestan State Medical University

Otkidach I. — DevOps engineer, Linux Foundation Certified System Administrator (LFCS); Certified Kubernetes Administrator (CKA)

Pecherov A. — Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Astrakhan State Medical University

Penkova R. — Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Volgograd State Agrarian University

Podolnyy V. — Moscow Polytechnic University

Podvigina A. — Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan

Potapenko A. — Postgraduate Student, Autonomous Non-Commercial Organization of Higher Education Russian New University

Prokopenko N. — Candidate of Medical Sciences, Docent, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Astrakhan State Medical University

Romanova D. — Postgraduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov

Romashkova O. — Doctor of Engineering, Professor, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow

Ruis Hawa Johar — Resident, Astrakhan State Medical University

Savelyev A. — postgraduate, Moscow State Technical University names Bauman

Shakirov K. — Senior Lecturer, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Plekhanov Russian University of Economics

Shalobanov S. — Candidate of Technical Sciences, associate professor, Pacific National University, Khabarovsk

Shalobanov S. — Doctor of Technical Sciences, professor, Pacific National University, Khabarovsk

Shamilova S. — Candidate of Medical Sciences, Gastroenterologist, Deputy Chief Physician for Medical Work at the CLD Clinic; Assistant, Faculty of Continuing Education and Postgraduate Studies of Dagestan State Medical University, Makhachkala

Silantieva E. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Kazan (Volga Region) Federal University

Strizhakova E. — Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Volgograd State Agrarian University

Struchkova A. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, NEFU named after. M.K Ammosova; JSC Airline "Yakutia", Yakutsk

Sultanova O. — Candidate of Medical Sciences, Docent, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Astrakhan State Medical University

Suvorov S. — Candidate of Economic Sciences, Professor, Moscow Polytechnic University

Tarasyev A. — Candidate of Economic Sciences, Docent, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg

Tokin G. — Postgraduate, National University of Science and Technology MISIS

Trabelsi Shaima — Resident Astrakhan State Medical University

Verbova M. — Moscow Polytechnic University

Vyvodtsev N. — Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Pacific National University, Khabarovsk

Yukhimuk R. — Researcher, Mozhaisky Military Space Academy

Yurchik P. — D.Sc. (Technology), Professor, Moscow State Automobile and Road Technical University

Yushkin V. — Candidate of Technical Sciences, Volgograd State Agrarian University

Zadornov A. — postgraduate's student, Moscow State Automobile and Road Technical University

Zhelyaleva D. — Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education MIREA — Russian Technological University

Требования к оформлению статей, направляемых для публикации в журнале



Для публикации научных работ в выпусках серий научно-практического журнала «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики» принимаются статьи на русском языке. Статья должна соответствовать научным требованиям и общему направлению серии журнала, быть интересной достаточно широкому кругу российской и зарубежной научной общественности.

Материал, предлагаемый для публикации, должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях, написан в контексте современной научной литературы, и содержать очевидный элемент создания нового знания. Представленные статьи проходят проверку в программе «Антиплагиат».

За точность воспроизведения дат, имен, цитат, формул, цифр несет ответственность автор.

Редакционная коллегия оставляет за собой право на редактирование статей без изменения научного содержания авторского варианта.

Научно-практический журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики» проводит независимое (внутреннее) рецензирование.

Правила оформления текста.

- ◆ Текст статьи набирается через 1,5 интервала в текстовом редакторе Word для Windows с расширением “.doc”, или “.rtf”, шрифт 14 Times New Roman.
- ◆ Перед заглавием статьи указывается шифр согласно универсальной десятичной классификации (УДК).
- ◆ Рисунки и таблицы в статью не вставляются, а даются отдельными файлами.
- ◆ Единицы измерения в статье следует выражать в Международной системе единиц (СИ).
- ◆ Все таблицы в тексте должны иметь названия и сквозную нумерацию. Сокращения слов в таблицах не допускаются.
- ◆ Литературные источники, использованные в статье, должны быть представлены общим списком в ее конце. Ссылки на упомянутую литературу в тексте обязательны и даются в квадратных скобках. Нумерация источников идет в последовательности упоминания в тексте.
- ◆ Литература составляется в соответствии с ГОСТ 7.1-2003.
- ◆ Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Правила написания математических формул.

- ◆ В статье следует приводить лишь самые главные, итоговые формулы.
- ◆ Математические формулы нужно набирать, точно размещая знаки, цифры, буквы.
- ◆ Все использованные в формуле символы следует расшифровывать.

Правила оформления графики.

- ◆ Растровые форматы: рисунки и фотографии, сканируемые или подготовленные в Photoshop, Paintbrush, Corel Photopaint, должны иметь разрешение не менее 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, CMYK.
- ◆ Векторные форматы: рисунки, выполненные в программе CorelDraw 5.0-11.0, должны иметь толщину линий не менее 0,2 мм, текст в них может быть набран шрифтом Times New Roman или Arial. Не рекомендуется конвертировать графику из CorelDraw в растровые форматы. Встроенные — 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, CMYK.

По вопросам публикации следует обращаться к шеф-редактору научно-практического журнала «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики» (e-mail: redaktor@nauteh.ru).