ISSN 2223–2966

СОВРЕМЕННАЯ НАУКА:
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

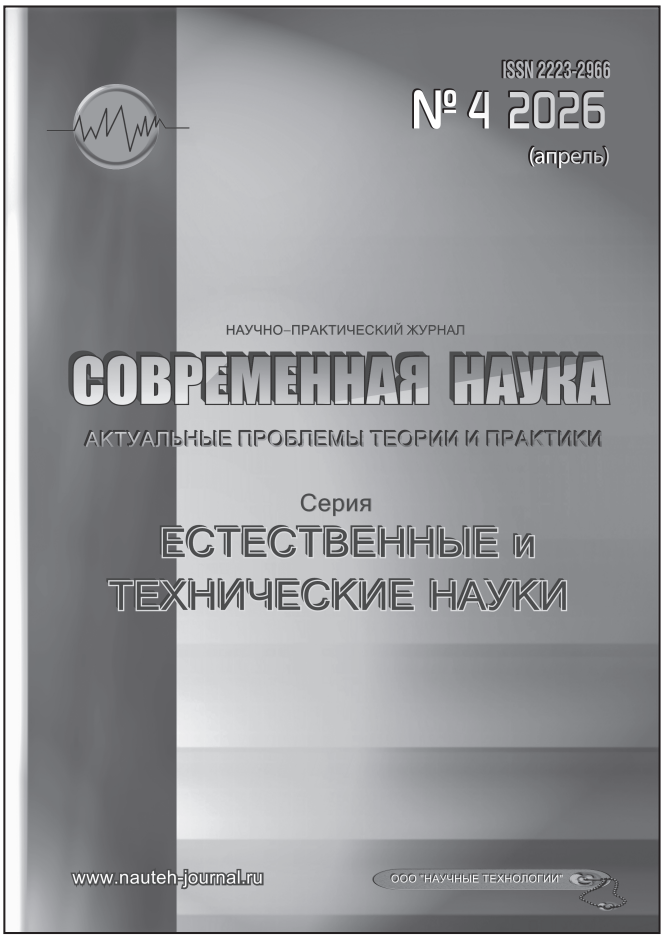
№ 4 2026 (АПРЕЛЬ)

Учредитель журнала
Общество с ограниченной ответственностью
«НАУЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Научно-практический журнал

Scientific and practical journal

(ВАК — 1.1.2, 1.5.х, 2.3.х, 3.1.х)



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.

В НОМЕРЕ:

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

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.

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 22.04.2026 г. Формат 84x108 1/16
Печать цифровая Заказ № 0000 Тираж 2000 экз.

ISSN 2223-2966

© Журнал Современная наука: актуальные проблемы теории и практики: Серия «Естественные и Технические науки»

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 ступени 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 Мастиславович — 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

Бабаева И.Х., Алиева Л.А., Мамедова А.Э., Абушова А.Р. — Метаболическая и ферментативная корреляция хищнической активности грибов Arthrobotrys, выделенных из почв Абшерона
Babayeva I., Aliyeva L., Mammadova A., Abushova A. — Metabolic and enzymatic correlation of predatory activity of Arthrobotrys fungi isolated from Absheron soils 8

Водолазская И.В., Серёгин С.С. — Современное состояние паразитофауны паразитических простейших у промысловых рыб в азово-черноморском бассейне в 2021–2025 годах
Vodolazskaya I., Seryogin S. — The current state of parasitic protozoan parasitofauna in commercial fish in the Azov-black sea basin in 2021–2025 13

Костыркин М.М. — Лимитирующие факторы распространения омелы белой (Viscum album L.) в условиях городской среды (на примере города Калининград)
Kostyrkin M. — Limiting factors in the distribution of white mistletoe (Viscum album L.) in urban environments (based on the example of the city of Kaliningrad) 19

Лазарева В.Г., Цулайя Е.Э., Кряжева Е.Ю., Ерунцова Е.Р. — Анализ лекарственной флоры Арктической зоны Республики Коми
Lazareva V., Tsulaya E., Kryazheva E., Eruntsova E. — Analysis of the medicinal flora of the Arctic zone of the Komi Republic 25

Сидорин А.С., Бобров В.А., Каргаполова К.Ю., Ткаченко О.В. — Эффективность инокуляции растений сои бактериями родов Enterobacter sp. и Bradyrhizobium sp. в вегетационных и полевых условиях
Sidorin A., Bobrov V., Kargapolova K., Tkachenko O. — Efficiency of inoculation of soybean plants with bacteria of the genera Enterobacter sp. and Bradyrhizobium sp. under vegetation and field conditions. 34

Часовская В.В., Воропаева Е.В. — Генезис, морфологические свойства и условия формирования почв в Линдуловской роще Ленинградской области
Chasovskaja V., Voropaeva E. — Genesis, morphological properties, and conditions of soil formation in the Lindulovskaya grove of the Leningrad region. 41

Информатика, вычислительная техника и управление

Азаб М.А.Э., Сила А.С., Коржук В.М. — Аутентификация пользователей на основе ЭКГ с использованием совместного обучения пространственных и временных признаков
Azab M., Sila A., Korzhuk V. — ECG-Based User Authentication via Joint Spatial and Temporal Feature Learning 44

Альбатша А.М.Х. — Оптимизация параметров аппаратной маскировки цифровых устройств на основе нейросетевых моделей оценки защищенности
Albatsha A. — Optimisation of hardware masking parameters for digital devices based on neural network security assessment models. 50

Апана К.А., Шичкина Ю.А. — Сегментация анатомических структур мозга с помощью патчевых легковесных 3d сверточных нейронных сетей в условиях экстремальной нехватки данных: автоматическая сегментация DLPFC в структурной МРТ
Apana K., Shichkina Yu. — Patch-based lightweight 3d CNNS for anatomical brain segmentation under severe data scarcity: automated DLPFC segmentation in structural MRI 55

Багданов Р.Б. — Публикационная активность международного научного сообщества по проблеме разработки автоматизированной системы на основе нейросетевых технологий в индустриальном интернете вещей
Bagdanov R. — Publication activity of the international scientific community on the

development of an automated system based on neural network technologies in the industrial internet of things.....64

Ёлкин Г.В. — Сравнительный анализ подходов к обработке больших JSON-файлов в среде Python
Elkin G. — Comparative analysis of approaches to processing large JSON files in Python 71

Желенкова М.Б., Голдовский Я.М. — Особенности безопасности и доверия в отношении технологии цифровых двойников
Zhelenkova M., Goldovsky Ya. — Security and trust issues related to digital twin technology 78

Закарюкин М.А. — Гибридный интеллект в управлении ЗПИФ: интеграция машинного обучения и системы правил в контуре комплаенса
Zakaryukin M. — Hybrid intelligence in closed-end mutual fund management: integrating machine learning and a rules system in the compliance framework 83

Игнатова Е.И., Куликова И.В. — Системная модель управления индивидуальными образовательными траекториями на основе цифрового следа и ограничений качества данных
Ignatova E., Kulikova I. — Systemic model for managing individual learning pathways based on digital footprints and data quality constraints 89

Ковалев А.В., Канев А.И. — Аппроксимация древесной структуры дерева по его плотному облаку
Kovalev A., Kanev A. — Approximation of the wood structure of a tree based on its dense cloud 93

Конде А.К., Петров В.Е. — Эффективные стратегии для автоматического выбора оптимальных представлений в реляционных базах данных на основе декларативных методов моделирования
Conde A., Petrov V. — Effective strategies for automatically selecting optimal views in relational databases based on declarative modeling methods 100

Корендясев С.В., Ромашкова О.Н., Каптерев А.И. — Алгоритмы эффективного управления рециклинговым комплексом при переработке радиационного вторичного сырья
Korendyasev S., Romashkova O., Kapterev A. — Algorithms for effective management of a recycling complex in the processing of radiation secondary raw materials..... 105

Маркевич Д.В. — Обзор и анализ моделей угроз микросервисных архитектур
Markevich D. — Overview and analysis of threat models of microservice architectures..... 110

Маслов А.К. — Выбор системы беспилотных авиационных платформ для информационного обеспечения автоматизированных систем управления посадки воздушных судов гражданской авиации
Maslov A. — Selection of a system of unmanned aerial platforms for information support of automated landing control systems of civil aviation aircraft... 116

Нургазиев Р.Б., Миндлин Ю.Б., Верезубова Н.А. — Методологические основы применения нейронных сетей в системах мониторинга успеваемости студентов ветеринарного вуза
Nurgaziev R., Mindlin Yu., Verezubova N. — Methodological basis for using neural networks in veterinary student progress monitoring systems 120

Попов Л.А., Вихтенко Э.М. — Разработка и внедрение чат-бота на основе RNN для автоматизации взаимодействия с абитуриентами вуза
Popov L., Vikhtenko E. — Development and implementation of an RNN-based chatbot to automate interaction with university applicants .. 125

Самаке Б.А. — Формирование аллофонной базы русского языка в интересах защиты речевой информации
Samake B. — Formation of the allophonic base of the Russian language for the purpose of speech information protection 132

Санакоев Р.Г., Плешаков В.В., Коновалова А.А., Кушкин В.А. — Интеллектуальная система поддержки принятия решений руководителем судебно-экспертного учреждения на основе задачи о назначениях и ретроспективной информации
Sanakoev R., Pleshakov V., Konovalova A., Kushkin V. — Intelligent support system for decision-making by

the head of a forensic expert institution based on the problem of appointments and retrospective information 141

Сусанин С.И. — Метод извлечения фасетов из поисковой строки на основе нейронной сети архитектуры BERT
Susanin S. — Method for extracting facets from a search string based on a neural network of the BERT architecture 145

Тарасов П.О. — Теоретико-множественная модель системы управления качеством на этапе конструкторской подготовки производства
Tarasov P. — Set-theoretic model of the quality management system at the stage of design preparation of production 150

Фетарони Малак, Стёпин Ю.П. — Разработка системы поддержки принятия решений на основе нечеткого логического вывода и нечеткого метода анализа иерархий в контексте оценки общего показателя эффективности технологий гидравлического разрыва пласта (ГРП)
Fetaroni Malak, Stepin Yu. — Development of a decision support system based on fuzzy logic inference and the fuzzy analytic hierarchy process for evaluating the overall efficiency of hydraulic fracturing techniques. 155

Фетарони Малак, Стёпин Ю.П. — Адаптивная система поддержки принятия решений для оптимизации организации процесса гидроразрыва пласта (ГРП)
Fetaroni Malak, Stepin Yu. — Adaptive decision support system for optimizing the organization of hydraulic fracturing (HF) 162

Шемелюнас С.С., Яковлев А.А. — Автоматическое регулирование объемной подачи в FDM 3D-печати на основе оптического измерения диаметра филамента
Shemelyunas S., Yakovlev A. — Automatic volume control in FDM 3D printing based on optical measurement of the diameter of the filament 170

Шемелюнас С.С., Яковлев А.А. — Автоматический контроль геометрических параметров филамента в FDM-печати на основе оптического измерения
Shemelyunas S., Yakovlev A. — Automatic control of the geometric parameters of the filament in FDM printing based on optical measurement. 177

Шипулин Г.Ф., Калуцкий И.В., Шорников А.В. — Сравнительный анализ методов защиты веб-приложений от атак на цепочки поставок программного обеспечения с открытым исходным кодом в современных условиях
Shipulin G., Kalutsky I., Shornikov A. — Comparative analysis of methods for protecting web applications from attacks on the supply chain of open-source software in modern conditions. 184

Шишкин М.А. — Логико-алгебраические модели автоматического извлечения знаний из текстов
Shishkin M. — Logic-algebraic models for automatic knowledge extraction from texts. 189

Юдин М.Ю. — Алгоритм управления электромеханическими исполнительными механизмами автономного морского надводного судна
Iudin M. — An algorithm for controlling electromechanical actuators of an autonomous marine surface vessel 193

Янаева М.В., Белоглядова И.А., Ушаков Н.А., Гайдук Д.А. — Особенности формирования датасетов для сервиса с искусственным интеллектом в нейровизуализации на примере создания набора данных с уз-изображениями головного мозга плода
Yanaeva M., Beloglyadova I., Ushakov N., Gaiduk D. — Features of the formation of datasets for a service with artificial intelligence in neuroimaging using the example of creating a dataset with ultrasound images of the fetal brain 201

Клиническая медицина

Ахмедов Р.М., Калашникова Е.С., Бит-Сава Е.М., Иванов Д.О. — Морфологические особенности доброкачественных опухолей молочной железы у детей и подростков
Akhmedov R., Kalashnikova E., Bit-Sava E., Ivanov D. — Morphological features of benign breast tumors in children and adolescents 207

Березнева Н.А., Зелинская Д.И., Осенняя Е.В., Шатская Е.В. — Влияние образа жизни на распространенность ожирения и артериальной гипертензии у современных детей и подростков
Berezneva N., Zelinskaya D., Osennyaya E., Shatskaya E. — The influence of lifestyle on the prevalence of obesity and arteril hypertension in modern children and adolescents. 213

Гаева А.М., Исмаилова Р.Л., Тхостова Л.А., Кумыкова З.А., Жангоразова А.Х., Алаиддин Джуди — Поражение сердца при системных воспалительных заболеваниях у детей в Кабардино-Балкарской Республике: пилотный аналитический протокол и имитационное моделирование
Gaeva A., Ismailova R., Tkhostova L., Kumykova Z., Zhangorazova A., Alaiddin Judy — Cardiac involvement in pediatric systemic inflammatory diseases in the Kabardino-Balkarian Republic: a pilot analytical protocol and simulation modeling 218

Джанибекова А.Р., Узденов М.Б., Джанибекова Л.Р., Айбазова Ф.У. — Оценка эффективности и безопасности применения антагонистов pcsk9 у пациентов очень высокого риска
Janibekova A., Uzdenov M., Janibekova L., Aibazova F. — Evaluation of the effectiveness and safety of pcsk9 antagonists in patients with a very high risk 224

Иванова О.Н. — Изменения содержания кальция и витамина d в крови у подростков крайнего севера (на примере Республики Саха (Якутия))
Ivanova O. — Changes in calcium and vitamin d content in the blood of teenagers in the far north (on the example of the republic of Sakha (Yakutia)) 228

Иванова О.Н., Голикова О.А. — Анализ показателей распространенности аллергических заболеваний у детей Республики Саха (Якутия)
Ivanova O., Golikova O. — Analysis of the prevalence of allergic diseases in children of the Republic of Sakha (Yakutia) 233

Ичмелян А.М., Богдасаров А.Ю., Давидян Л.Ю.,Богдасарова Р.А. — Циркадный дефицит мелатонина и эндокринный дисбаланс у бесплодных женщин позднего репродуктивного возраста
Ichmelyan A., Bogdasarov A., Davidyan L., Bogdasarova R. — Circadian melatonin deficiency and endocrine imbalance in infertile women of advanced reproductive age 237

Казаков А.Н., Горшков А.Ю., Румянцева Г.Н., Карташев В.Н., Юсуфов А.А., Бурченкова Н.В., Попова А.А. — Дивертикул Меккеля у детей: вопросы диагностики и лечения
Kazakov A., Gorshkov A., Rumyantseva G., Kartashev V., Yusufov V., Burchenkova N., Popova A. — Meckel's diverticulum in children: diagnostic and treatment issues 242

Каткова А.В. — Интерактивный опрос и цифровая система поддержки принятия врачебных решений в предварительной дифференциальной диагностике заболеваний верхнего отдела желудочно-кишечного тракта
Katkova A. — Interactive questionnaire and digital clinical decision support system in preliminary differential diagnosis of diseases of the upper gastrointestinal tract 247

Маммедов С.М., Берсанов Р.У., Сердаров Б.А. — О роли вирусной инфекции в развитии одонтогенного верхнечелюстного синусита
Mammedov S., Bersanov R., Serdarov B. — The role of viral infection in the development of odontogenic maxillary sinusitis. 252

Мамонтова Л.Н., Коротких И.Н., Ходасевич Э.В. — Современный взгляд на проблему синдрома поликистозных яичников (обзор литературы)
Mamontova L., Korotkikh I., Khodasevich E. — A modern view on the problem of polycystic ovarian syndrome (literature review) 257

Рябец М.В., Иваненко А.В. — Результаты хирургического лечения пациентов с многоуровневым дискозом поясничного отдела позвоночника при использовании методик микрохирургической декомпрессии без стабилизации, микрохирургической декомпрессии дополненной установкой динамической и ригидной фиксацией
Ryabets M., Ivanenko A. — Results of surgical treatment of patients with multilevel lumbar spine discosis using microsurgical decompression techniques without stabilization, microsurgical decompression supplemented by dynamic and rigid fixation 263

Синицына О.Р., Перлин Д.В., Волкова М.И., Гриднева Я.В., Матвеев В.Б. — Почечная функция после экстракорпоральной резекции почки у пациентов со злокачественными опухолями
Sinitsyna O., Perlin D., Volkova M., Gridneva Ya., Matveev V. — Renal function after extracorporeal

resection of the kidney in patients with malignant tumors 269

Сулейманова Х.Г., Шахбанов Р.К., Дибиров Т.М., Алиева У.Б. — Морфологическое и электрофизиологическое исследование бедренного и седалищного нервов при их перерезке и наложении анастомоза
Suleymanova Kh., Shakhbanov R., Dibirov T., Alieva U. — Morphological and electrophysiological examination of femoral and sciatic nerves during their cutting and anastomosis 274

Султанова О.Э., Чернышева Е.Н., Попов Е.А., Касаткина С.Г., Варламова А.А., Султанова С.Ш. — Оптимизация ведения пациентов с острым коронарным синдромом и недифференцированной дисплазией соединительной ткани: прогностические алгоритмы стратификации риска
Sultanova O., Chernysheva E., Popov E., Kasatkina S., Varlamova A., Sultanova S. — Optimization of management of patients with acute coronary syndrome and undifferentiated connective tissue dysplasia: prognostic algorithms for risk stratification. 277

Фогель А.В., Петросов Л.А. — Выявление патологических изменений предстательной железы посредством кристаллографии, как одного из методов раннего диагностирования простатита
Fogel A., Petrosov L. — Detection of pathological changes in the prostate gland using crystallography as a method of early diagnosis of prostatitis 283

Наши авторы 287

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.05

МЕТАБОЛИЧЕСКАЯ И ФЕРМЕНТАТИВНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ ХИЩНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ГРИБОВ ARTHROBOTRYS, ВЫДЕЛЕННЫХ ИЗ ПОЧВ АБШЕРОНА

METABOLIC AND ENZYMATIC CORRELATION OF PREDATORY ACTIVITY OF ARTHROBOTRYS FUNGI ISOLATED FROM ABSHERON SOILS

I. Babayeva
L. Aliyeva
A. Mammadova
A. Abushova

Summary. Fungi of the genus *Arthrobotrys* are fungi that trap nematodes and can form adhesive network structures for capturing and digesting nematodes. This study examines the relationship between metabolic changes and predatory behavior of three *Arthrobotrys* isolates exposed to nematodes. Within 24 hours after induction, the trap density averaged 15 traps/cm^2, and nematode mortality reached 80 % within 48 hours. The protein content and protease activity increased significantly (from 0.8 to 1.3 mg/mmol and from 20 to 50 U/mg, respectively), while the pH of the medium decreased from 6.8 to 5.2. These changes suggest that the presence of nematodes triggers the activation of enzymatic systems and the production of acid associated with the digestion of prey. The results obtained confirm the potential use of fungi of the genus *Arthrobotrys* in the biological control of phytoparasitic nematodes.

Keywords: *Arthrobotrys*, nematophagous fungi, predatory fungi, protease activity, biocontrol, trap formation, fungal metabolism.

Бабаева Ирада Халид кызы
доктор философии по биологии, доцент, Институт Молекулярной биологии Министерства Науки и Образования Азербайджана, г. Баку
babayevairada@mail.ru
Алиева Лала Ариф кызы
доктор философии по биологии, старший научный сотрудник, Институт Молекулярной биологии Министерства Науки и Образования Азербайджана, г. Баку
lalaalieva75@mail.ru
Мамедова Асмар Эльман кызы
старший научный сотрудник, Институт Молекулярной биологии Министерства Науки и Образования Азербайджана, г. Баку
esmer_mammadova90@mail.ru
Абушова Айтен Рахиб кызы
научный сотрудник, Институт Молекулярной биологии Министерства Науки и Образования Азербайджана, г. Баку
ayten-z@mail.ru

Аннотация. Грибы рода *Arthrobotrys* — это грибы, улавливающие нематод и способные образовывать адгезивные сетевые структуры для захвата и переваривания нематод. В данном исследовании изучается взаимосвязь между метаболическими изменениями и хищническим поведением трех изолятов *Arthrobotrys*, подвергнутых воздействию нематод. В течение 24 часов после индукции плотность ловушек в среднем составляла 15 ловушек/см^2, а смертность нематод достигла 80 % в течение 48 часов. Содержание белка и активность протеазы значительно увеличились (с 0,8 до 1,3 мг/ммоль и с 20 до 50 Ед/мг соответственно), в то время как pH среды снизился с 6,8 до 5,2. Эти изменения предполагают, что присутствие нематод запускает активацию ферментативных систем и выработку кислоты, связанной с перевариванием добычи. Полученные результаты подтверждают потенциальное применение грибов рода *Arthrobotrys* в биологическом контроле фитопаразитических нематод.

Ключевые слова: *Arthrobotrys*, грибы-нематофаги, хищные грибы, протеазная активность, биоконтроль, формирование ловушек, метаболизм грибов.

Введение

Грибы, улавливающие нематод, представляют собой уникальную экологическую группу в царстве грибов, способную охотиться на нематод посредством образования специализированных ловчих структур. Эти грибы выработали сложные стратегии выживания в бедных питательными веществами средах, особенно в почвах, где нематоды многочисленны. Среди них наиболее изучены виды рода *Arthrobotrys* благодаря их широкому распространению, быстрому развитию ловушек и потенциальному использованию в биологических методах борьбы с нематодами (Nordbring-Hertz, 2004, Zhang, Hyde, 2014; Hussain M et al., 2017). Сосуществова-

ние и взаимодействие нематод и грибов, будь то антагонистическое или мутуалистическое, прямое или косвенное, имеют фундаментальное значение для понимания их влияния на экосистему и потенциального применения в сельском хозяйстве. (A. Martínez-Medina et al., 2017)

Род *Arthrobotrys* характеризуется способностью образовывать адгезивные сети. После захвата нематоды поражаются гифами гриба, а содержимое их тел переваривается и поглощается грибом. Это взаимодействие представляет не только экологический интерес, но и значительную практическую ценность, особенно для устойчивого сельского хозяйства, где нематофаговые грибы могут служить естественными антагонистами фитопаразитических нематод, таких как виды Meloidogyne и Heterodera (Тагиев, 2015; Soliman MS. et al., 2021). Учитывая широкое распространение этих организмов в природных и искусственных экосистемах, их взаимодействие имеет значительные экономические и экологические последствия (A. Ragozzino, G.D'Errico, 2011). Хотя морфологические аспекты формирования ловушек у *Arthrobotrys spp*. хорошо изучены (Nordbring-Hertz, B., 2004; Bakr R.A., 2014; Мигунова, 2002), биохимические и физиологические процессы, сопровождающие хищничество, остаются менее изученными. В частности, регуляция протеолитических ферментов, изменения первичного метаболизма и реакции на окружающую среду, такие как закисление среды во время переваривания нематод, являются критически важными областями исследования (Гасимова, 2005; Tunlid A., Jansson S. 1991; Li, Y et al., 2005; Mendoza P., 2003; (Acevedo-Ramírez,2015). Эти биохимические изменения могут отражать адаптивные стратегии грибов по оптимизации получения питательных веществ во время хищничества.

Цель данного исследования — изучить взаимосвязь между ферментативной активностью, участвующей в формировании ловушек, и метаболическими изменениями у трех видов *Arthrobotrys — A. musiformis, A. oligospora, A. longa,* подвергшихся воздействию нематод, с целью выявления ключевых физиологических изменений, сопровождающих хищничество.

Материалы и методы

Три изолята *Arthrobotrys spp.* были ранее получены из образцов Апшеронской почвы и культивировались на чашках с сусло-агаром (СА). Культуры подвергались воздействию живых нематод (Panagrellus redivivus) для индукции образования ловушек. Контрольные группы содержались без нематод. Структуры ловушек количественно оценивались через 24 часа с использованием световой микроскопии. Данные выражены как средняя плотность ловушек (ловушки/см^2) (Мехтиева, 1979).

Общая концентрация белка определялась с использованием метода Лоури. Стандартная кривая была построена с использованием бычьего сывороточного альбумина (БСА). Грибковые супернатанты (центрифугированные при 10000xg, 10 мин) смешивали с реактивом Брэдфорда (1:5), инкубировали при комнатной температуре в течение 5 минут и измеряли при 595 нм. Результаты выражали в мг/ммоль. Активность протеазы измеряли с помощью азоказеина: 200 мкл супернатанта смешивали с 200 мкл 1 % азоказеина (в 50 мМ Трис-HCl, pH 7,5), инкубировали при 37 °C в течение 1 часа, затем добавляли 400 мкл 10 % трихлоруксусной кислоты для остановки реакции. После центрифугирования (10000xg, 5 мин) абсорбцию измеряли при 440 нм. Одна единица (U) = Δ0,01 абсорбции/мин, активность выражалась в U/мг белка (Билай, 1982).

pH измеряли с помощью цифрового pH-метра до и после воздействия нематод.

Результаты и обсуждение

Проведенные исследования показали, что все три изолята образовывали адгезивные сетчатые ловушки в течение 12–24 часов после воздействия нематод, в среднем количество ловушек составило 15 ловушек/см^2 (таблица 1). Как видно их данных, приведенных в таблице уже через 12 часов после контакта с нематодами начинается формирование ловушек: у *A. musiformis* было зарегистрировано 6 ловушек/см^2, у *A. oligospora* 4 ловушки/см^2 и 5 ловушек/см^2 у *A. longa*.

Таблица 1.

Динамика формирования ловушек у грибов рода *Arthrobotrys* после экспозиции с нематодами (ловушки/см^2)

Hours	*A. musiformis*	*A. oligospora*	*A. longa*
0	0	0	0
12	6	4	5
24	12	10	13
36	14	12	15
48	16	14	17

К 24 часу количество ловушек значительно увеличилось. У *A. musiformis* показатель составил 12 ловушек/см^2, а у *A. longa* — 13 ловушек/см^2. На 36-й час наблюдалось дальнейшее нарастание числа ловушек: *14 ловушек/см^2 у A. musiformis*, *12 ловушек/см^2* у *A. oligospora* и *15 ловушек/см^2* у *A. longa*. Максимальные значение были зафиксированы через 48 часов: *у A. musiformis — 16 ловушек/см,^{2}* у *A. oligospora — 14 ловушек/см^2* и *17 ловушек/см^2* у *A. longa*.

Таким образом, у всех трех видов отмечается постепенное увеличение количества формируемых ло-

вушек с течением времени. Наиболее интенсивное образование ловушек наблюдалось у *A. longa, тогда как A. oligospora* демонстрировал несколько более низкие показатели. *A. musiformis* занимал промежуточное положение, однако также характеризовался высокой динамикой роста.

Изучение воздействия исследуемых грибов на смертность нематод отражают данные, указанные ниже (таблица № 2, рисунок). Как показали результаты, смертность нематод после экспозиции (0, 12, 24, 36 и 48 часов) с различными штаммами демонстрировала схожую тенденцию, но с небольшими различиями в эффективности (табл. 2)

Таблица 2.

Смертность нематод (%) с течением времени после воздействия грибов *Arthrobotrys*

Time (h)	*A. musiformis*	*A. oligospora*	*A. longa*
0	0	0	0
12	18	20	23
24	47	50	54
36	70	73	75
48	78	80	82

Как видно, уже через 12 часов наблюдается начальный эффект: смертность составила 18 % у *A. musiformis*, 20 % у *A. oligospora* и 23 % у A. longa. Через 24 часа показатель значительно увеличился и достиг 47 % у *A. musiformis*, 50 % у *A. oligospora* и 54 % у *A. longa*. На 36-й час смертность продолжила расти: 70 %, 73 % и 75 % соответственно. Максимальные значения были зафиксированы через 48 часов: 78 % у *A. musiformis*, 80 % у *A. oligospora* и 82 % у *A. longa*.

Таким образом, во всех вариантах отмечается постепенное увеличение смертности нематод с течением времени. Наиболее высокая хищническая активность наблюдалась у *A. longa*, которая на всех этапах демонстрировала несколько более высокий уровень смертности по сравнению с другими видами. *A. oligospora* занимала промежуточное положение, а *A. musiformis* характеризовалась наименьшими показателями, хотя различия между видами были незначительными.

График на рисунке 1 наглядно отражает эти данные: все три кривые имеют сходную возрастающую динамику, с наиболее интенсивным ростом смертности в интервале 12–36 часов. К 48 часам наблюдается тенденция к замедлению прироста, что может свидетельствовать о достижении предельного уровня поражения нематод в данных условиях эксперимента.

После воздействия *A. musiformis* смертность нематод через 12 часов достигала 18 %, которая через 48 часов возросла до 78 %. Эффективность воздействия *A. oligospora* достигла 20 % через 12 часов и 80 % через 48 часов. *A. longa* показала наибольшую эффективность: 23 % смертности к 12 часам и 82 % к 48 часам.

С целью изучения метаболических процессов исследуемых грибов была проведена оценка биохимических параметров грибов рода *Arthrobotrys.* В таблице 3 пред-

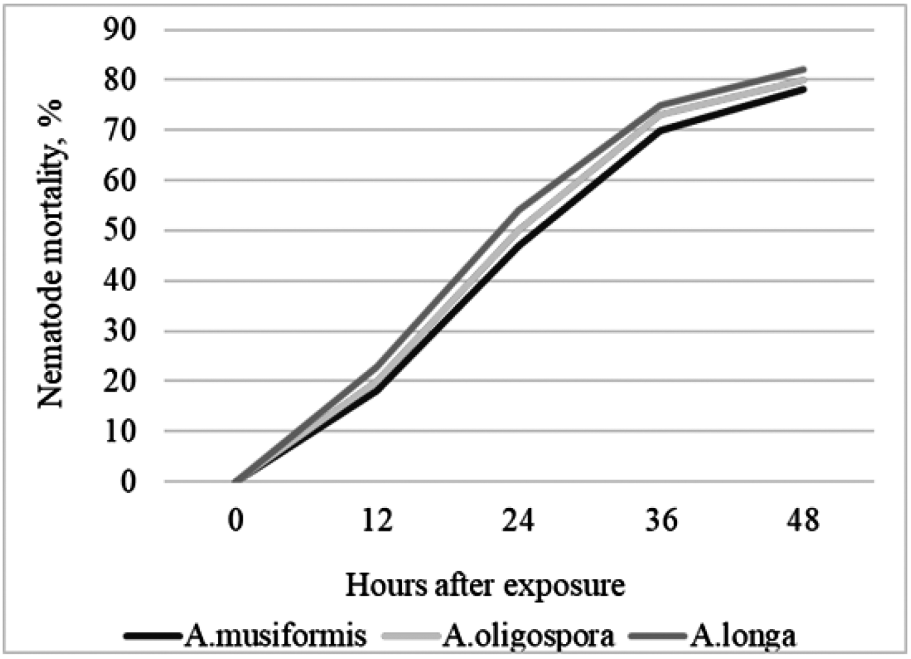


Рис. 1. Графическое отображение данных по смертности нематод (%) с течением времени после воздействия грибов *Arthrobotrys*

ставлены биохимические параметры в контрольных условиях и при индукции нематодами.

Таблица 3.

Биохимические параметры в контрольных и индуцированных нематодами культурах грибов *Arthrobotrys*

Параметры	Контроль	Индукция нематодами
Общий белок	0,8mg/mmol	1,3mg/mmol
Протеазная активность	20 U/mg	50 U/mg
pH	6,8	5,2

Анализ данных показал, что содержание общего белка в контроле составляло 0,8 мг/ммоль, тогда как при воздействии нематод увеличивалось до 1,3 мг/ммоль. Это свидетельствует об усилении синтетических процессов в ответ на присутствие жертвы.

Протеазная активность в контрольной группе составляла 20 Ед/мг, а после индукции нематодами возрастала до 50 Ед/мг. Более чем двукратное повышение активности протеаз указывает на активную секрецию гидролитических ферментов, участвующих в разрушении кутикулы нематод.

Значение pH культуральной среды в контроле было 6,8, тогда как после индукции снижалось до 5,2. Подкисление среды может быть связано с выделением кислых метаболитов в процессе хищнической активности.

Таким образом, присутствие нематод вызывает выраженные биохимические изменения, направленные на усиление хищнической функции грибов.

Заключение

Проведённые исследования показали, что воздействие нематод индуцирует у грибов рода Arthrobotrys комплекс морфологических и биохимических изменений. В присутствии нематод происходит активное формирование адгезивных ловушек, увеличение синтеза белка и значительное повышение протеазной активности, сопровождающееся подкислением культуральной среды.

Наиболее высокую хищническую эффективность продемонстрировал штамм *A. longa*, что выражалось в большем количестве формируемых ловушек и более высокой скорости гибели нематод по сравнению с A. musiformis и A. oligospora. Это может свидетельствовать о различиях в метаболической активности и регуляции ферментных систем между исследуемыми изолятами.

Полученные результаты подтверждают, что взаимодействие с нематодами запускает у грибов адаптивный ответ, направленный на эффективное захватывание и разрушение жертвы. Выявленные изменения расширяют представления о механизмах хищничества нематофаговых грибов и подтверждают перспективность использования представителей рода Arthrobotrys в качестве агентов биологического контроля фитопаразитических нематод в сельском хозяйстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Билай В.И. Методы экспериментальной микологии К.: Наук. Думка, 1982, 550 с.
2. Гасымова С., Намазов Н., Гасанов Ч., Мурадов П. (2005). Изучение образования протеолитических ферментов хищными грибами// Географическая среда и живые системы. №4: с. 102–105. https://www.geoecosreda.ru/jour/article/view/999/937
3. Мехтиева Н.А. Хищные нематофаговые грибы-гифомицеты Издательство «Элм». Баку: 1979, 243 с.
4. Мигунова В.Д. Выбор трофической стратегии хищным нематофаговым грибом Arthrobotrys oligospora. Диссертация. кандидата биологических наук: 03.00.07. — Москва, 2002. — 139 с.
5. Тагиев М.М. Нематоды, поражающие овощные растения в условиях Апшеронской области и разработка мер по борьбе с ними. Дисссертация доктора философии по биологии. Гянджа. 2015.24 с.
6. A. Martínez-Medina, I. Fernandez, G.B. Lok, MJ. Pozo, C-M. J. Pieterse, S-C. M. Van Wees, Shifting from priming of salicylic acid— to jasmonic acid-regulated defences by Trichoderma protects tomato against the root knot nematode Meloidogyne incognita. New Phytol, 213 (2017), 1363–1377. https://doi.org/10.1111/nph.14251.
7. Acevedo-Ramírez P.M, del C., et al. Proteolytic activity of extracellular products from Arthrobotrys musiformis and their effect in vitro against Haemonchus contortus infective larvae. Vet Rec Open 2015; 2e000103. doi:10.1136/vetreco-2014-000103.
8. Bakr R.A., Mahdy M.E. and E.M. Mousa. Biological control of root-knot nematode Meloidogyne incognita by Arthrobotrys oligospora // Egyptian journal of crop protection. 9(1). 2014. P.1–11.
9. Hussain M., Zouhar M., Rysánek P. (2017). Effects of nematophagous fungi on viability of eggs and juveniles of Meloidogyne incognita. J Anim. Plant.Sci.; 27(1): 252–258.
10. Kokolova L.M., Stepanova S.M., Gavrilyeva L.Yu. Methodology for obtaining a biologically active agent with a biomycelial mass of strains of the nematophagous fungus Athrobotrys oligospora I3 -1 and I3 -2, 2018, 16 p.
11. Li Y., Zhang K.Q., & Liu X.Z. (2005). Trap fotmation by nematode-trapping fungi: a role for signaling molecules. Mycological Research, 109 (8), 877–883 https://doi.org/10.1017/S0953756205003244.
12. Mendoza P., Benhke J., Davies K. (2003) Extracellular enzyme production by nematophagous fungi in the presence and absence of nematodes. International Journal of Nematology 13, 27–36.

13. Nordbring-Hertz, B. (2004). Morphogenesis in nematode— trapping fungus Arthrobotrys oligospora — an axtensive plasticity of infection structures. The Mycologist, 18(3), 125–133. https://doi.org/10.1017/S0269915X04003061.
14. Soliman M.S. et al. (2021). Suppression of root-knot nematode Meloidogyne incognita on tomato plants using the nematode trapping fungus Arthrobotrys oligospora Fresenius. // J Appl. Microbiol., V.131(5), p.2402–2415. https://doi: 10.1111/jam.15101.
15. Tunlid A., Jansson S. (1991) Proteases and their involvement in the infection and immobilization of nematodes by the nematophagous fungus Arthrobotrys oligospora. Applied Environmental Microbiology 57, 2868–2872.
16. Yang J., Tian B., Liang L.Zhang K-Q. (2007). Extracellular enzymes and the pathogenesis of nematophagous fungi // Appl. Microbiol. Biotechnol, 75:21–31.
17. Zhang N., & Hyde K.D. (2014). Nematode-trapping fungi. In D. (2014). Nematode-trapping fingi. In D. Hibbett & K.D. Hyde (Eds.), Fungal Biodiversity.

© Бабаева Ирада Халид кызы (babayevairada@mail.ru); Алиева Лала Ариф кызы (lalaalieva75@mail.ru);
Мамедова Асмар Эльман кызы (esmer_mammadova90@mail.ru); Абушова Айтен Рахиб кызы (ayten-z@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.08

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПАРАЗИТОФАУНЫ ПАРАЗИТИЧЕСКИХ ПРОСТЕЙШИХ У ПРОМЫСЛОВЫХ РЫБ В АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОМ БАССЕЙНЕ В 2021–2025 ГОДАХ

THE CURRENT STATE OF PARASITIC PROTOZOAN PARASITOFAUNA IN COMMERCIAL FISH IN THE AZOV-BLACK SEA BASIN IN 2021–2025

I. Vodolazskaya
S. Seryogin

Summary. The Azov-Black Sea basin has always been an important source of aquatic biological resources. Fishing plays a special role as one of the most important economic sectors for the Crimean Peninsula. Fishing is a solution to several issues, such as food security and employment for the working-age population in the Russian Federation. The study of the parasitofauna of commercial fish species is of utmost importance, as some parasites can pose a potential threat to humans, while others can negatively impact the processing and quality of fish products, as well as the abundance of fish. Based on the data obtained during the studies conducted in 2021–2025, the classes of parasites found in commercial fish were identified, the degree of parasitosis in fish was determined, and conclusions were made about the dependence of the degree of parasitosis on the fishing season.

Keywords: parasitofauna, commercial fish, ecological parasitology, Azov-Black Sea basin, degree of infestation, parasitic protozoan.

Водолазская Ирина Владимировна
Керченский государственный морской технологический университет
sternirina27@gmail.com
Серёгин Станислав Сергеевич
кандидат экономических наук, доцент, главный специалист, Керченский государственный морской технологический университет
seregin2@gmail.com

Аннотация. Азово-Черноморский бассейн всегда являлся актуальным местом добычи водных биологических ресурсов. Особую роль играет промысел рыбы, как одно из наиболее важных экономических направлений для Крымского полуострова. Рыболовство является решением некоторых вопросов, таких как сфера продовольственной безопасности, сфера занятости трудоспособного населения Первостепенную значимость имеет исследование паразитофауны промысловых видов рыб, так как некоторые виды паразитов могут представлять потенциальную опасность для человека, другие виды паразитов могут негативно сказываться на переработке и качестве рыбного сырья, а также наносить урон численности рыб. Исходя из полученных данных в ходе проведенных исследований в 2021–2025 годах были определены классы встречающихся простейших паразитов у промысловых рыб, был определен процент зараженности рыб паразитами, а также сформированы выводы о зависимости степени зараженности рыб от сезона вылова.

Ключевые слова: паразитофауна, промысловые рыбы, экологическая паразитология, Азово-Черноморский бассейн, степень зараженности, простейшие паразиты.

Введение

Исследования ихтиофауны Азово-Черноморского бассейна имеют давнюю историю, начиная с работ Зернова С.А. (1909), посвященных черноморскому побережью Крыма. Значительный вклад в изучение ихтиофауны и паразитофауны внесли Салехова Л.П., Костенко Н.С., а также современные исследователи, такие как Шаганов В.В. (2018) [1, 2].

Особое внимание в последние десятилетия уделяется экологическим изменениям в АЧБ, связанным с антропогенным воздействием и климатическими факторами, которые влияют на состав ихтиофауны и паразитарных сообществ.

Экосистемы АЧБ претерпевают изменения, включая проникновение теплолюбивых видов рыб из Средиземного моря через Босфор. Хотя большинство средиземноморских иммигрантов обосновались в АЧБ в период послеледникового потепления (около 5 млн лет назад), современные климатические изменения и антропогенные факторы способствуют дальнейшему расширению ареалов как рыб, так и их паразитов [3].

Ключевыми абиотическими факторами, детерминирующими распространение и динамику популяций простейших паразитов в водных экосистемах, выступают температурный режим, а также комплекс гидрохимических (концентрация растворенного кислорода, pH, соленость, содержание биогенных элементов) и гидрологических параметров (скорость течения, динамика водных масс).

Паразитозы, индуцированные простейшими, оказывают существенное негативное воздействие на попу-

ляции ихтиофауны, имеющей промысловое значение. Патогенное влияние проявляется в форме снижения ростовых показателей, угнетения репродуктивной функции (снижение плодовитости), ухудшения соматических характеристик, определяющих товарное качество продукции, а в эпидемиологических ситуациях — в виде эпизоотий, приводящих к массовой гибели гидробионтов. Наибольшую уязвимость к инвазиям демонстрируют ранние онтогенетические стадии — молодь (мальки), что обусловлено несовершенством иммунологических и барьерных механизмов [4, 5].

У морских рыб АЧБ встречаются три основных класса простейших паразитов: споровики (Sporozoa), книдоспоридии (Cnidosporidia) и ресничные инфузории (Ciliata).

Несмотря на значительное количество исследований паразитофауны рыб АЧБ, выполненных сотрудниками ФИЦ ИнБЮМ, АзЧЕРНИРО и других учреждений, ряд аспектов остается недостаточно изученным [14]. К ним, в частности, относятся закономерности сезонной динамики инвазированности основных промысловых видов и количественная оценка влияния паразитарных инвазий на технологические параметры переработки рыбного сырья в современных производственных условиях.

Актуальность настоящего исследования обусловлена комплексом факторов:

1) необходимостью актуализации данных по паразитофауне промысловых рыб в условиях прогрессирующих изменений экологической обстановки (включая климатические колебания и эвтрофикацию) и усиления антропогенного пресса;
2) потребностью в оценке потенциальных эпизоотологических рисков для устойчивого рыболовства;
3) важностью мониторинга паразитологической ситуации для прогнозирования ветеринарно-санитарных и медико-эпидемиологических рисков, связанных с качеством рыбной продукции.

Цель исследования

Изучение современного состояния паразитофауны простейших у промысловых рыб АЧБ в 2021–2025 годах с акцентом на сезонные особенности зараженности и влияние паразитов на переработку сырья.

Для достижения данной цели были сформированы следующие задачи:

— проанализировать видовой состав паразитофауны промысловых рыб в прибрежной зоне Крыма;
— определить степень зараженности рыб паразитами с учетом сезонных факторов;
— оценить влияние локализации паразитов на возможность переработки рыбного сырья.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в период с 2021 по 2025 годы в прибрежной зоне Азовского и Черного морей, в акватории Южного и Юго-Восточного побережья Крыма (районы Севастополя, Ялты, Феодосии, Орджоникидзе, Ленинского района (с. Соляное, с. Мысовое) и Керчи).

В ходе исследования были проанализированы следующие виды промысловых рыб АЧБ (с указанием количества исследованных экземпляров на паразитологию):

— Скат морская лисица (*Raja clavata* Linnaeus, 1758) — 50 экз.;
— Скат морской кот (*Dasyatis pastinaca* Linnaeus, 1758) — 45 экз.;
— Ставрида (*Trachurus trachurus* Linnaeus, 1758**)** — 100 экз.;
— Хамса (*Engraulis encrasicolus* Linnaeus, 1758) — 150 экз.;
— Сарган (*Belone belone* Linnaeus, 1760) — 80 экз.;
— Бычок кругляк (*Neogobius melanostomus* Pallas, 1814) — 120 экз.;
— Лобан (*Mugil cephalus* Linnaeus, 1758) — 90 экз.;
— Сингиль (*Chelon auratus* Risso, 1810) — 85 экз.;
— Остронос (*Liza saliens* Risso, 1810) — 70 экз.;
— Атерина черноморская (*Atherina boyeri* Risso, 1810) — 60 экз.;
— Сельдь азово-черноморская (*Alosa maeotica* Grimm, 1901) — 110 экз.;
— Барабуля (*Mullus barbatus* Linnaeus, 1758) — 75 экз.;
— Камбала глосса (*Platichthys flesus* Linnaeus, 1758) — 65 экз.;
— Камбала калкан (*Scophthalmus maeoticus* Pallas, 1814) — 55 экз.

Для визуализации районов сбора материала представлена карта-схема (рисунок 1).

Сбор материала проводился сезонно (весна, лето, осень, зима) с использованием тралов и сетей. Исследование рыб выполнялось с применением методов полного и частичного паразитологического вскрытия по методике Быховской-Павловской [6]. Данная методика обеспечивает наиболее полный учет эндопаразитов, локализующихся во всех органах и тканях (жабрах, мышечной ткани, пищеварительном тракте, печени, почках и т.д.). В случаях работы с крупными промысловыми объектами применялся метод частичного вскрытия, направленный на изучение конкретных органов-мишеней, что позволило оптимизировать процесс без значительной потери репрезентативности данных.

Паразиты фиксировались согласно общепринятым методикам, а их идентификация проводилась с использованием определителей Гаевской и др. [7]. При помощи тринокулярного микроскопа Micromed XS-4130 и бино-

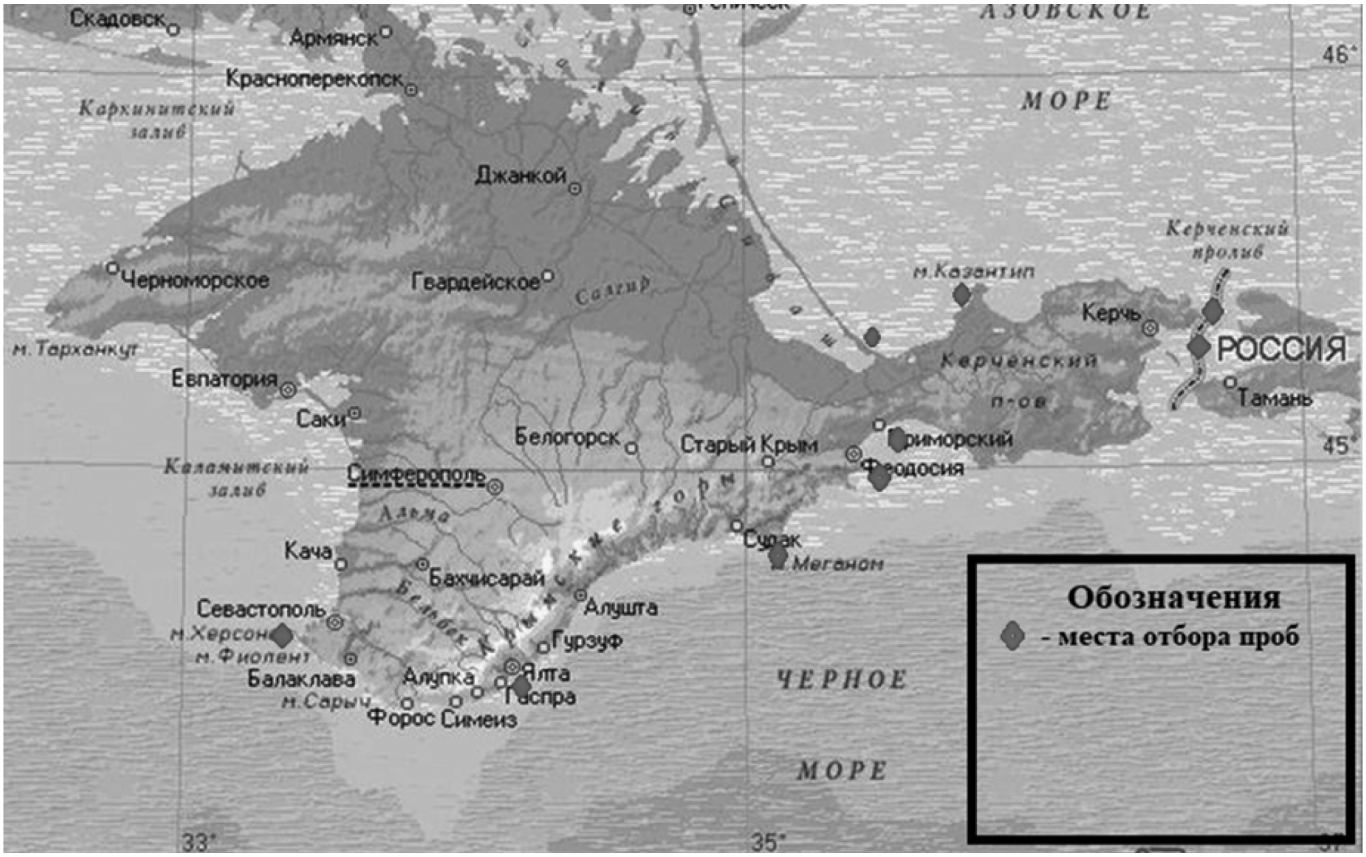


Рис. 1. Карта-схема районов сбора биологического материала в Азово-Черноморском бассейне

кулярного стереоскопического микроскопа Micromed XS-6320. Для статистической обработки данных использовались стандартные методы (расчет процента зараженности, анализ сезонной динамики) [8].

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе исследований 2021–2025 годов были изучены 1215 экземпляров промысловых рыб из 14 видов, выловленных в прибрежной зоне Южного и Юго-Восточного Крыма [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Было выявлено 11 видов простейших паразитов, относящихся к 9 родам, 7 семействам и 3 классам: споровики (Sporozoa), книдоспоридии (Cnidosporidia) и ресничные инфузории (Ciliata). Ниже представлены данные по зараженности рыб с учетом видовой принадлежности и локализации паразитов.

Зараженность простейшими паразитами по видам рыб

— Хамса (*Engraulis encrasicolus* Linnaeus, 1758): зараженность споровиками (*Eimeria sardinae* Thélohan, 1892) составила 2 % (3 из 150 экз.), паразиты локализованы в половых железах; зараженность миксоспоридиями (*Sphaerospora caudate* Parisi, 1910) — 6 % (9 из 150 экз.), локализация — мочевой пузырь и мочевые канальцы.

— Сарган (*Belone belone* Linnaeus, 1760): зараженность миксоспоридиями (*Myxobolus sphaericum* Thélohan, 1895) — 6 % (5 из 80 экз.), локализация — желчный пузырь; зараженность ресничными инфузориями (Trichodina sp.) — 0.4% (1 из 80 экз.), локализация — жаберный аппарат.

— Бычок кругляк (*Neogobius melanostomus* Pallas, 1814): зараженность миксоспоридиями (*Myxobolus melanostomi* Najdenova, 1970) — 6.4 % (8 из 120 экз.), локализация — желчный пузырь; зараженность ресничными инфузориями (Trichodina sp.) — 2.4 % (3 из 120 экз.), локализация — жаберный аппарат.

— Лобан (*Mugil cephalus* Linnaeus, 1758): зараженность миксоспоридиями (*Zschokkella nova* Klokacewa, 1914) — 12 % (11 из 90 экз.), локализация — желчный пузырь; зараженность ресничными инфузориями (Trichodina sp.) — 2 % (2 из 90 экз.), локализация — жаберный аппарат.

— Сингиль (*Chelon auratus* Risso, 1810): зараженность миксоспоридиями (*Zschokkella nova* Klokacewa, 1914) — 11 % (9 из 85 экз.), локализация — желчный пузырь; зараженность ресничными инфузориями (Trichodina sp.) — 1.3 % (1 из 85 экз.), локализация — жаберный аппарат.

— Скат морской кот (*Dasyatis pastinaca* Linnaeus, 1758): зараженность миксоспоридиями (*Leptotheca*

agilis Thélohan, 1892) — 5 % (2 из 45 экз.), локализация — желчный пузырь.
- — Атерина (Atherina boyeri Risso, 1810): зараженность миксоспоридиями (*Leptotheca hepsetis* Thélohan, 1895) — 5.8 % (3 из 60 экз.), локализация — желчный пузырь.
- — Сельдь азово-черноморская (*Alosa immaculata* Bennett, 1835): зараженность миксоспоридиями (*Sphaerospora caspialosae* Parisi, 1910) — 6.3 % (7 из 110 экз.), локализация — мочевые канальцы; зараженность ресничными инфузориями (Trichodina sp.) — 1.6 % (2 из 110 экз.), локализация — жаберный аппарат.
- — Скат морская лисица (*Raja clavata* Linnaeus, 1758): зараженность миксоспоридиями (*Chloromyxum leydigi* Mingazzini, 1890) — 5 % (3 из 50 экз.), локализация — желчный пузырь; зараженность ресничными инфузориями (Trichodina sp.) — 5 % (3 из 50 экз.), локализация — жаберный аппарат.
- — Камбала глосса (*Platichthys flesus* Linnaeus, 1758): зараженность миксоспоридиями (*Myxobolus platessae* Basikalowa, 1932) — 8.8 % (6 из 65 экз.), локализация — мочевой пузырь; зараженность ресничными инфузориями (Trichodina sp.) — 2.8 % (2 из 65 экз.), локализация — жаберный аппарат.
- — Ставрида (*Trachurus trachurus* Linnaeus, 1758): зараженность ресничными инфузориями (Trichodina sp.) — 2.2 % (2 из 100 экз.), локализация — жаберный аппарат.
- — Барабуля (*Mullus barbatus* Linnaeus, 1758): зараженность ресничными инфузориями (Trichodina sp.) — 2.4 % (2 из 75 экз.), локализация — жаберный аппарат.
- — Камбала калкан (*Scophthalmus maeoticus* Pallas, 1814): зараженность ресничными инфузориями (Trichodina sp.) — 3.6 % (2 из 55 экз.), локализация — жаберный аппарат.
- — Остронос (*Liza saliens* Risso, 1810): зараженность ресничными инфузориями (Trichodina sp.) — 6 % (4 из 70 экз.), локализация — жаберный аппарат.

Сезонная динамика зараженности. Анализ сезонной динамики показал, что наибольшая зараженность рыб простейшими паразитами наблюдается в весенний период (в среднем 5.2 % от общего числа исследованных особей), что может быть связано с повышением температуры воды и активностью паразитов.

В летний период зараженность снижается до 3.8 %, в осенний — до 1.5 %, а в зимний период практически отсутствует (0.3 %).

Общая зараженность. Общая зараженность рыб по классам паразитов составила:
- — Споровики (Sporozoa) — 0.2 % (3 из 1215 экз.);
- — Книдоспоридии (Cnidosporidia, подкласс Myxosporidia) — 4.5 % (55 из 1215 экз.);
- — Ресничные инфузории (Ciliata) — 1.8 % (22 из 1215 экз.) (рисунок 2).

Обсуждение

Полученные данные свидетельствуют о низкой общей зараженности промысловых рыб АЧБ простейшими паразитами (6.5 % от общего числа исследованных особей). Наиболее часто встречаются миксоспоридии, что соответствует данным предыдущих исследований.

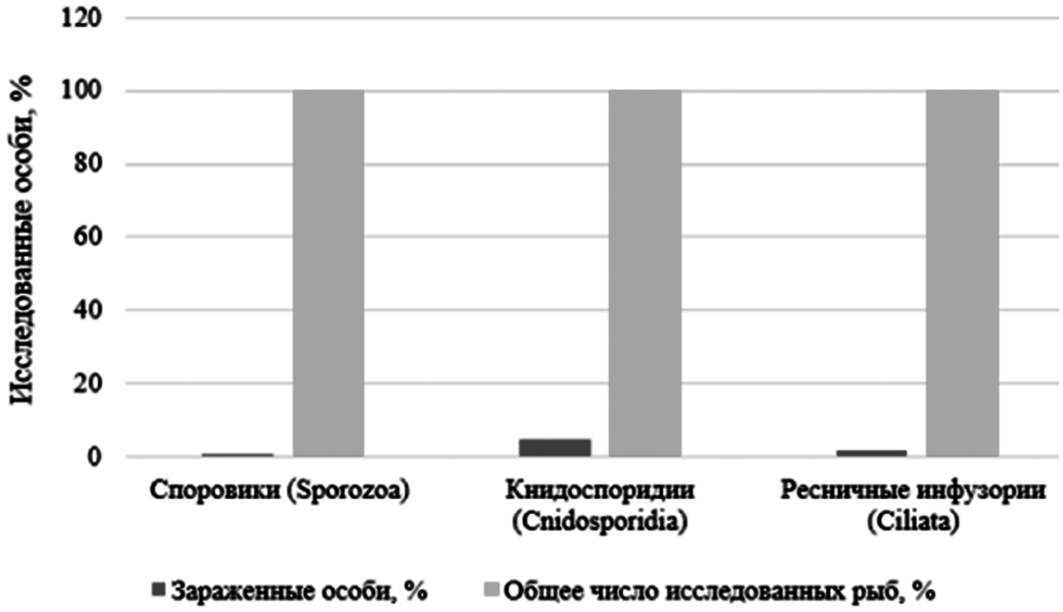


Рис. 2. Процентное соотношение зараженных особей по классам паразитов к общему числу исследованных рыб (1215 экз.)

Новизна работы заключается в выявлении сезонной динамики зараженности, что ранее недостаточно освещалось в литературе по АЧБ. Также уточнены данные о локализации паразитов, что важно для оценки их влияния на переработку рыбного сырья. Сравнение с работами ФИЦ ИнБЮМ и АзЧЕРНИРО показывает, что состав паразитофауны остается стабильным, однако современные экологические условия могут способствовать изменению интенсивности заражений.

На основании проведенных в 2021–2025 гг. паразитологических исследований 1215 экземпляров 14 видов промысловых рыб Азово-Черноморского бассейна можно сформулировать следующие **выводы**:

— Установлен современный видовой состав паразитических простейших. Фауна представлена 11 видами, относящимися к 3 классам: *Sporozoa, Myxosporidia* (ранее *Cnidosporidia*) и *Ciliata*. Наиболее разнообразны и часто встречаются миксоспоридии (роды *Myxobolus*, *Zschokkella*, *Sphaerospora*, *Leptotheca*, *Chloromyxum*), что подтверждает их доминирующую роль в протозойных паразитоценозах рыб АЧБ, отмеченную в предыдущие годы.

— Выявлена низкая общая и видовая зараженность. Суммарная экстенсивность инвазии (ЭИ) всеми группами простейших составила 6.6 %, что указывает на относительно благополучную паразитологическую ситуацию в период исследований. Наиболее высокая видовая зараженность отмечена у лобана (*Mugil cephalus*, 12.2 % миксоспоридиями *Zschokkella nova*). Для большинства других видов ЭИ не превышала 6–8 %.

— Обнаружена выраженная сезонная динамика. Максимальные показатели зараженности зарегистрированы в весенний период (средняя ЭИ 5.2 %), что закономерно связано с сезонной активизацией жизненных циклов паразитов и повышением температуры воды. Минимальные значения отмечались зимой (0.3 %). Данный паттерн необходимо учитывать при планировании мониторинговых и ветеринарно-санитарных мероприятий.

— Оценено потенциальное влияние на переработку сырья и качество продукции. Выявленные паразиты были локализованы преимущественно во внутренних органах (желчный и мочевой пузырь, почки, жабры, гонады) и не образовывали цист в мышечной ткани. Следовательно, их присутствие не приводит к прямым технологическим потерям филетированного мяса или необходимости его выбраковки. Основное патогенное влияние, теоретически, может сказываться на упитанности и физиологическом состоянии рыбы, но при наблюдаемой низкой интенсивности инвазии это влияние, вероятно, незначительно.

— Определены ветеринарно-санитарные риски как низкие. Отсутствие в выборке высокопатогенных видов, вызывающих массовые эпизоотии или формирующих цисты в мускулатуре, а также общий низкий уровень инвазии позволяют заключить, что в исследуемый период протозойные инвазии не представляли существенной угрозы для популяций промысловых рыб АЧБ и не являлись значимым фактором риска с точки зрения безопасности рыбопродукции для человека.

— Общий итог: Проведенный мониторинг свидетельствует о стабильной и благоприятной паразитологической обстановке в отношении простейших у промысловых рыб Азово-Черноморского бассейна в 2021–2025 гг. Однако выявленная сезонная динамика и постоянные изменения морских экосистем подчеркивают необходимость продолжения регулярного контроля для своевременного выявления потенциально опасных тенденций.

Рекомендации: дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение влияния климатических изменений на динамику паразитозов и разработку мер по минимизации экономических потерь в рыболовстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Салехова Л.П., Костенко Н.С. Рыбы. Флора и фауна заповедников СССР. Фауна Карадагского заповедника (паразитофауна рыб; рыбы; земноводные и пресмыкающиеся; птицы; млекопитающие). М.: Производственно-издательский комбинат ВИНИТИ, 1989. С. 21–33.
2. Шаганов В.В. Рыбы. Биология Чёрного моря у берегов Юго-Восточного Крыма / Под ред. Н.С. Костенко. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2018. С. 130–143.
3. Линник В.Я. Паразиты рыб, опасные для человека и животных. Минск: Ураджай, 1977. 96 с.
4. Developmental Stability in Natural Populations / Eds. V.M. Zakharov, J.H. Graham // Acta Zool. Fennica. 1992. № 191. 200 p
5. Извекова Г.И. Физиологическая специфика взаимоотношений между Triaenophorus nodulosus (Cestoda) и его хозяевами — рыбами // Паразитология. 2001. Т. 35. № 2. С. 60–68.
6. Быховская-Павловская И.Е. Паразитологическое исследование рыб (методы паразитологических исследований). Ленинград: Наука, 1969. 108 с.
7. Гаевская А.В. и др. Определитель паразитов позвоночных Чёрного и Азовского морей. К.: Наукова думка, 1975. 551 с.
8. Гончаров С.Л., Сорока Н.М. Изменения внешней среды и деструкция метацеркария Paracoenogonimus ovatus (Trematoda, Cyathocotylidae) в окружении рыбы // Вестник АГАУ. 2016. № 3 (137). С. 155–160.
9. Определитель паразитов пресноводных рыб фауны СССР: в 3 т. Паразитические простейшие. Л.: Наука, 1984. Т. 1. 428 с.
10. Skorping A. Population biology of the nematode Camallanus lacustris in perch, Perca fluviatilis L., from an oligotrophic lake in Norway // Journal of Fish Biology. 1980. Vol. 16 (5). P. 483–492.

11. Студеникина Е.И., Мирзоян З.А., Сафронова Л.М., Фроленко Л.Н., Мартынюк М.Л., Марушко Е.А. Характеристика биологических сообществ Азовского моря по результатам исследований 2010–2011 гг. // Осн. пробл. рыбн. хоз-ва и охраны рыбохоз. водоемов Азово-Черноморского бас. (2010–2011 гг.): сб. науч. тр. АзНИИРХ. Ростов-н/Д. 2012. С. 253–271.
12. Данилевский Н.Н. Важнейшие факторы, определяющие сроки и районы образования промысловых скоплений черноморской хамсы // Труды АзчерНИРО. 1964. Вып. 22. С. 115–124.
13. Костюченко В.А. Возраст и темп роста бычка-кругляка (Neogobius melanostomus (Pallas)) в Азовском море // Труды АзЧерНИРО. 1961. Вып. 19. С. 45–60.
14. Миронов О.Г., Кирюхина Л.Н., Алемов С.В. Санитарно-биологические аспекты экологии Севастопольских бухт в XX веке. Севастополь: ИнБЮМ НАНУ, 2003. 185 с.
15. Ломакин П.Д., Попов М.А. Современное состояние основных компонентов экосистемы Балаклавской бухты по материалам комплексного мониторинга ИнБЮМ НАН Украины // Вестник Гидрометцентра Черного и Азовского морей. 2011. Вып. 1 (12). С. 83–95.

© Водолазская Ирина Владимировна (sternirina27@gmail.com); Серёгин Станислав Сергеевич (seregin2@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.23

ЛИМИТИРУЮЩИЕ ФАКТОРЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОМЕЛЫ БЕЛОЙ (VISCUM ALBUM L.) В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА КАЛИНИНГРАД)

Костыркин Максим Максимович
Аспирант, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, г. Калининград
mkostyrkin@stud.kantiana.ru

Аннотация. Омела белая (*Viscum album L.*) относится к полупаразитическим растениям и представляет собой вечнозеленый куст шаровидной формы, который развивает устойчивые гаустории в деревехозяине [1]. Интенсивное распространение фитопаразита представляет серьёзную угрозу для городских зелёных насаждений Калининграда. Впервые проведён комплексный анализ лимитирующих факторов этого процесса в условиях калининградской урбоэкосистемы. В 2019 году на территории 25 км^2 проведено детальное обследование 3663 деревьев с использованием методов полевого учёта и статистического анализа (коэффициент корреляции Спирмена). Установлено, что распространение паразита ограничено лиственными породами (*V. album subsp. album*) [2, 3]. Наибольшая доля поражённых деревьев зафиксирована у *Tilia cordata Mill.* (24,5 %), *Acer platanoides L.* (22,7 %) и *Populus spp.* (20,3 %), а максимальная интенсивность поражения — у *Acer saccharinum L.* (20,10 ± 16,47 экз./дерево). Выявлена статистически значимая положительная корреляция между окружностью ствола и количеством омел ($\rho = 0{,}342$, $p < 0{,}001$), подтверждающая роль старовозрастных деревьев как основных резерватов паразита. Обнаружена корреляция между количеством омел и их максимальным диаметром ($\rho = 0{,}411$, $p < 0{,}001$), свидетельствующая о кумулятивно-прогрессирующем характере поражения. Пространственное распределение омелы демонстрирует чёткую связь с типами городской среды: максимальная численность отмечена в зонах исторической застройки и парках, минимальная — в районах жилой застройки. Полученные результаты позволяют создать рекомендации для контроля численности омелы, а именно внедрение системы приоритетного мониторинга старовозрастных деревьев, проведение регулярных санитарных мероприятий и разработку перспективной дендрополитики с заменой высоковосприимчивых видов на устойчивые таксоны.

Ключевые слова: урбоэкосистемы, фитопаразиты, омела белая, *Viscum album L.*, распространение.

LIMITING FACTORS IN THE DISTRIBUTION OF WHITE MISTLETOE (VISCUM ALBUM L.) IN URBAN ENVIRONMENTS (BASED ON THE EXAMPLE OF THE CITY OF KALININGRAD)

M. Kostyrkin

Summary. White mistletoe (*Viscum album L.*) is a semi-parasitic plant and is an evergreen, spherical shrub that develops persistent haustoria on its host tree [1]. The rapid spread of plant parasite poses a serious threat to Kaliningrad's urban green spaces. For the first time, a comprehensive analysis of the limiting factors of this process has been conducted within the context of the Kaliningrad urban ecosystem. In 2019, a detailed survey of 3,663 trees was conducted across an area of 25 km^2 using field inventory methods and statistical analysis (Spearman's correlation coefficient). It was established that the spread of the parasite is limited to deciduous tree species (V. album subsp. album) [2, 3]. The highest proportion of infested trees was recorded in *Tilia cordata Mill.* (24.5 %), *Acer platanoides L.* (22.7 %), and *Populus spp.* (20.3 %), while the highest infestation intensity was observed in *Acer saccharinum L.* (20.10 ± 16.47 specimens). A statistically significant positive correlation was found between trunk circumference and the number of mistletoe plants ($\rho = 0.342$, $p < 0.001$), confirming the role of old-growth trees as the main reservoirs of the parasite. A correlation was found between the number of mistletoe plants and their maximum diameter ($\rho = 0.411$, $p < 0.001$), indicating the cumulative and progressive nature of the infestation. The spatial distribution of mistletoe demonstrates a clear association with urban environment types: the highest abundance was observed in historic districts and parks, and the lowest in residential areas. The results obtained allow for the formulation of recommendations for controlling mistletoe populations, namely the implementation of a priority monitoring system for old-growth trees, the conduct of regular sanitary measures, and the development of a forward-looking dendropolicy involving the replacement of highly susceptible species with resistant taxa.

Keywords: urban ecosystems, plant parasites, white mistletoe, *Viscum album L.*, distribution.

Введение

Омела белая (*Viscum album L.*) — вечнозелёный полупаразитический кустарник из семейства Санталовые, широко распространённый в Европе и традиционно считающийся важным элементом биоразнообразия лесных экосистем [4]. В последние десятилетия наблюдается интенсивная экспансия вида в урбанизированные ландшафты, где его участие в сложных взаимодействиях на уровне сообщества с растениями-хозяевами представляет серьёзную угрозу для здоровья и долголетия городских зелёных [5, 6]. В условиях города омела вызывает преждевременное усыхание крон, снижение декоративности, ослабление механической устойчивости деревьев к ветровалам и, в конечном счёте, гибель ценных древесных растений [6, 7].

Особую актуальность эта проблема приобретает для Калининградской области, где отмечается активное расселение омелы белой, в том числе на территории городских зелёных насаждений [8, 9]. Исторически сложившийся зелёный фонд Калининграда, включающий многочисленные старовозрастные деревья в районах довоенной застройки и парковых зонах, представляет собой идеальный субстрат для распространения полупаразита, ввиду сложившейся с возрастом строением коры конкретных видов дендрофлоры. Комплексный анализ факторов, лимитирующих распространение *V. album* в условиях именно калининградской урбоэкосистемы, до настоящего времени не проводился. Работы, выполненные исследователями Балтийского федерального университета имени И. Канта, затрагивают в основном общие вопросы городской экологии и фитопатологии [8, 9], в то время как специализированные исследования экологии омелы носят фрагментарный характер.

Экология *V. album* определяется сложным комплексом абиотических и биотических факторов. К числу ключевых из них, согласно литературным данным, относятся: наличие подходящих растений-хозяев, деятельность птиц-распространителей (орнитохория), микроклиматические условия (прежде всего влажность воздуха и инсоляция), возрастная структура древостоя и характер антропогенного воздействия [5, 6, 7, 11]. Известно, что в Европейской России, включая Калининградскую область, распространён подвид *V. album* subsp. *album*, паразитирующий преимущественно на лиственных породах [2, 3].

Таким образом, целью данного исследования являлось выявление и оценка значимости лимитирующих факторов распространения омелы белой на территории города Калининграда. Для достижения цели были решены следующие задачи:

1. Оценить видовой состав деревьев-хозяев и интенсивность их поражения омелой.
2. Проанализировать связь между распространением омелы и возрастом деревьев.
3. Изучить влияние особенностей городской среды (тип застройки и антропогенная нагрузка) на пространственное распределение паразита.
4. Разработать практические рекомендации для системы управления зелёными насаждениями Калининграда.

Материалы и методы

Исследование проводилось в период с апреля по декабрь 2019 года на территории городского округа Калининград. Общая площадь обследованной территории составила 25 км^2. Ключевыми участками исследования стали районы с разнообразными типами застройки и землепользования: зона застройки многоквартирными жилыми домами, историческая малоэтажная застройка, промышленная зона, территории, прилегающие к основным транспортным магистралям, а также природно-рекреационная зона с преобладанием старовозрастных древостоев. Выбор ключевых участков осуществлялся методом стратифицированной выборки для обеспечения репрезентативности данных по основным типам городской среды.

Сбор данных осуществлялся методом маршрутного учета с последующим детальным обследованием каждого дерева. Всего обследовано 3663 дерева. Для каждого дерева-хозяина фиксировались следующие параметры:

- Видовая принадлежность.
- Окружность ствола на высоте 1,3 м (см), измеренная с помощью мерной ленты. Данный параметр использовался в качестве косвенного показателя возраста и общего размера дерева [11].
- Количество кустов омелы белой (шт.).
- Диаметральные параметры кустов омелы: средний, минимальный и максимальный диаметр проекции кроны (см).
- Координаты местоположения с использованием GPS-навигатора для последующего картографического анализа.

Для анализа влияния микроклиматических и антропогенных факторов для каждого дерева визуально оценивался и фиксировался:

- Тип городской среды: историческая застройка, парковая зона, современная жилая застройка, транспортная магистраль.
- Уровень антропогенной нагрузки**:** на основе частоты проведения санитарных обрезок и близости к источникам загрязнения (дороги, промзоны).

Первичная обработка данных и статистический анализ проводились с использованием программного пакета IBM SPSS Statistics 22. Для описания выборки рас-

считывались стандартные описательные статистики: среднее арифметическое (M), стандартное отклонение (SD), стандартная ошибка среднего (SE). Для проверки гипотез о связях между параметрами использовался непараметрический коэффициент корреляции Спирмена, что обусловлено отклонением распределения данных от нормального, проверенного с помощью критерия Колмогорова-Смирнова. Статистическая значимость различий и корреляций определялась при уровне $p \leq 0,05$. Пространственное распределение омелы визуализировано с помощью геоинформационной системы QGIS 3.28.4.

Результаты

Общая описательная статистика по основным изучаемым параметрам представлена в Таблице 1. Анализ данных демонстрирует значительный разброс значений по всем показателям, что отражает неоднородность городских насаждений. Средняя окружность ствола составила 175,89 ± 86,61 см, при этом разброс значений был чрезвычайно широк — от минимальных до максимальных значений в несколько раз. Распределение количества омелы на дереве также характеризовалось высокой вариабельностью (11,74 ± 12,50 экземпляров), указывая на наличие как слабопораженных, так и критически инфицированных деревьев.

Таблица 1.

Описательная статистика основных параметров исследованной выборки деревьев (n = 3663)

Параметр	n	Среднее	Станд. отклонение	Станд. ошибка среднего
Окружность ствола, см	3663	175,89	86,61	1,43
Количество омел, шт.	3663	11,74	12,50	0,21
Диаметр омелы, см	3663	60,37	13,68	0,23
Мин. диаметр омелы, см	3663	55,08	12,03	0,20
Макс. диаметр омелы, см	3663	66,50	21,83	0,36

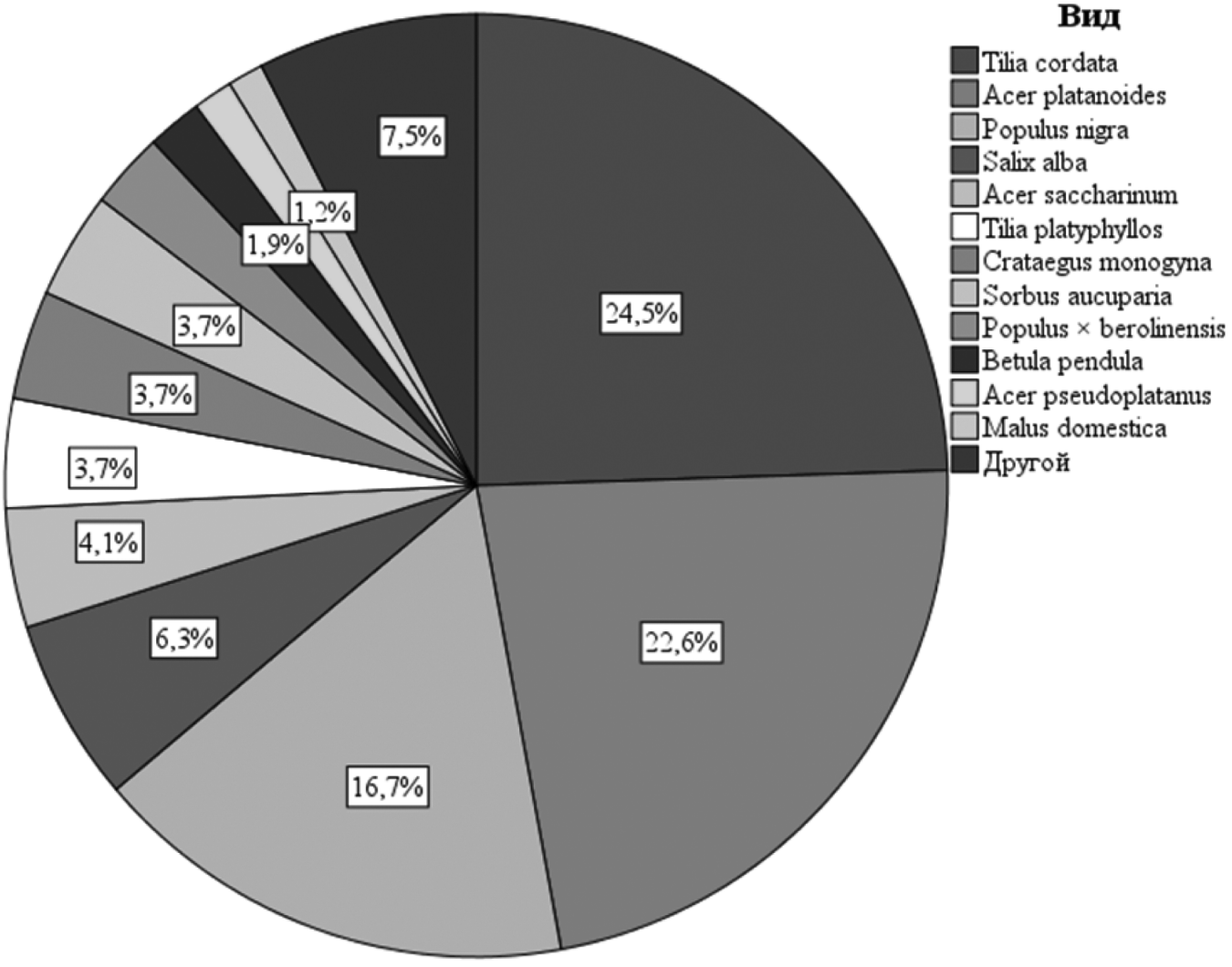


Рис. 1. Диаграмма процентного количества пораженной дендрофлоры

Одновыборочный t-тест подтвердил, что все средние значения достоверно отличаются от нуля (p <0,001), что свидетельствует о репрезентативности полученных данных.

Видовой состав деревьев-хозяев и интенсивность поражения

Всего было зафиксировано 43 027 экземпляров паразита. Анализ видовой структуры показал, что наибольшая доля пораженных деревьев пришлась на *Tilia cordata Mill.* (897 деревьев, или 24,5 % от выборки), *Acer platanoides L.* (831 дерево, 22,7 %) и *Populus spp*. (744 дерева, 20,3 %) (Рис.1).

Распространение омелы белой было строго ограничено лиственными породами, что однозначно указывает на распространение в городской среде подвида *V. album* subsp. *album*.

Интенсивность поражения, измеряемая как среднее количество омел на одном дереве, существенно варьировала между видами (Таблица 2). Наибольшая интенсивность поражения была характерна для *Acer saccharinum L.* (20,10 ± 16,47 экз./дерево), видов рода *Populus L.* (17,97 ± 16,79 экз./дерево) и *Salix alba L.* (15,26 ± 15,84 экз./дерево). При этом у наиболее частого хозяина *Tilia cordata L.*, этот показатель был ниже (11,05 ± 10,33 экз./дерево), что может свидетельствовать о различной восприимчивости пород или о стадийности процесса поражения.

Таблица 2.

Интенсивность поражения омелой белой для основных видов-хозяев

Вид	Количество деревьев (n)	Среднее количество омел (M ± SD)
Acer saccharinum	157	20,10 ± 16,47
Populus spp.	744	17,97 ± 16,79
Salix alba	230	15,26 ± 15,84
Robinia pseudoacacia	30	6,87 ± 4,82
Tilia cordata	897	11,05 ± 10,33
Acer platanoides	831	7,89 ± 8,29
Sorbus aucuparia	134	8,07 ± 6,72
Betula pendula	78	5,65 ± 5,95

Корреляционный анализ связей между параметрами

Для выявления силы и направленности связей между ключевыми параметрами был проведен корреляционный анализ с использованием коэффициента корреляции Спирмена, устойчивого к отклонениям от нормального распределения. Проведенный анализ выявил ряд статистически значимых и экологически интерпретируемых взаимосвязей, которые позволяют углубить понимание факторов, лимитирующих распространение и развитие омелы белой в урбоэкосистеме.

Выявлена статистически значимая положительная связь между окружностью ствола, как показатель, и количеством омел на дереве (r = 0,342, p <0,001) (Таблица 3). Это подтверждает, что более взрослые и крупные деревья в большей степени подвержены инфицированию и накоплению паразитарной нагрузки.

Таблица 3.

Результаты корреляционного анализа показателей окружность ствола, количества омел и диаметр омелы

Показатель	Окружность ствола	
	r	p-value
Кол-во омел	0,342	0,01
Диаметр омелы	0,309	0,01

Несмотря на то, что омела может поражать и молодые деревья, в большинстве исследований отмечается прямая корреляционная зависимость между возрастным составом зеленых насаждений и степенью поражения их омелой. В частности, данные из Польши и Венгрии (на примере лесных насаждений) подтверждают, что инфицирование зависело от возраста [3, 7].

Из таблицы 4 видно, что обнаруживается значимая положительная корреляция между количеством кустов омелы на дереве и их максимальным диаметром (r = 0,411, p <0,001), что указывает на то, что процесс поражения носит не случайный, а кумулятивно-прогрессирующий характер [10]. Это означает, что на деревьях, выступающих в роли основных резерватов паразита, создаются не только благоприятные условия для первоначального закрепления семян (что приводит к высокому количеству особей), но и оптимальный микроклимат и обеспеченность ресурсами для их последующего роста и развития. Данный факт подчеркивает, что при оценке ущерба необходимо учитывать не только численность паразита, но и его онтогенетическое состояние, так как крупные, зрелые кусты оказывают более сильное стрессовое воздействие на хозяина за счет большего потребления воды и ассимилятов.

Между средним, минимальным и максимальным диаметрами кустов омелы наблюдаются сильные положительные корреляции (r от 0,754 до 0,848, p <0,001), что свидетельствует о внутренней согласованности этих измерений. Подтверждается однородность условий развития паразита в пределах кроны отдельного дерева-хозяина. Это позволяет рассматривать диаметр омелы

Таблица 4.

Результаты корреляционного анализа показателей количество омелы, диаметр омелы, минимальный диаметр омелы, максимальный диаметр омелы

Показатель	Кол-во омел	
	r	p-value
Диаметр омелы	0,246	0,01
Мин. диаметр омелы	0,085	0,01
Макс. диаметр омелы	0,411	0,01

как надежный и интегральный показатель успешности ее паразитической деятельности в конкретных местообитаниях. Отсутствие существенных различий в размерах кустов на одном дереве свидетельствует о том, что ресурсный потенциал хозяина распределяется относительно равномерно между паразитами, и локальные микроклиматические условия в разных частях кроны сходны.

Качественный анализ данных, согласованный с полевыми наблюдениями, выявил четкие закономерности пространственного распределения омелы. Максимальная численность и проективное покрытие паразита были зафиксированы в зонах исторической застройки, а также в старых городских парках, где сохранились зрелые и старовозрастные древостои. Напротив, в районах новой многоэтажной застройки и вдоль магистралей с интенсивным движением, где проводится регулярная санитарная и формовочная обрезка крон, популяция омелы была минимальной. Полученные данные о распространении омелы в различных функциональных зонах города Калининграда согласуются с результатами исследований, проведенных на территории Варшавы [3]. Аналогично варшавским данным, в городских лесах Калининграда инвазия омелы не носила сплошного характера; зараженные особи были зафиксированы исключительно на окраинных участках лесных массивов. Отсутствие паразита в глубине лесных экосистем города, по всей видимости, связано с его экологической требовательностью, в частности, с необходимостью высокого уровня инсоляции для успешного развития, что подтверждается рядом научных источников [1].

Обсуждение и выводы

Проведенное исследование выявило комплекс факторов, определяющих распространение и интенсивность поражения омелой белой (*Viscum album L.)* в условиях урбоэкосистемы Калининграда. Полученные результаты согласуются с данными исследований, проведенных на территории Прибалтики, и позволяют дать им глубокую экологическую интерпретацию [1–3, 7, 10, 11].

Установленная статистически значимая положительная корреляция между окружностью ствола и количеством омел является ожидаемой и документально подтверждена в ряде работ [5, 6]. Старовозрастные деревья, с их сложным строением коры и кроны, представляют собой идеальные объекты для орнитохории и последующего паразитизма. Таким образом, высокая пораженность омелой в районах исторической застройки Калининграда является прямым следствием преобладания в них зрелых древостоев, что создает устойчивые резерваты паразита в городской среде.

Выявленный спектр деревьев-хозяев, ограниченный лиственными породами, характерен для подвида *V. album subsp. album*. Наибольшая интенсивность поражения у *Acer saccharinum L.* и *Populus spp.* может быть связана с высокой проводимостью ксилемы и относительно мягкой древесиной, что облегчает формирование гаустории [6]. Тот факт, что *Tilia cordata L.*, будучи самым частым хозяином, демонстрировала среднюю интенсивность поражения, может указывать на определенную степень толерантности данного вида или на более медленные темпы накопления паразитарной нагрузки.

Обнаруженная корреляция между количеством кустов омелы на дереве и их максимальным диаметром свидетельствует о том, что процесс поражения носит самоподдерживающийся характер. Деревья-хозяева предоставляют не только условия для закрепления семян, но и ресурсы для роста и развития паразита. Это формирует петлю положительной обратной связи: крупные кусты производят больше ягод, привлекающих птиц-распространителей, что увеличивает вероятность заноса новых семян на то же дерево.

Пространственное распределение омелы четко коррелирует с характером городского землепользования. Минимальная численность паразита в районах новой застройки и вдоль магистралей, где проводится регулярная обрезка, полностью согласуется с данными об эффективности механического контроля в урбанизированной среде.

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Основным лимитирующим фактором распространения омелы в Калининграде является возрастная структура древостоя: старовозрастные деревья выступают основными резерватами паразита.
2. Интенсивность поражения варьирует в зависимости от вида-хозяина, достигая максимума у *Acer saccharinum L.*, *Populus spp.* и *Salix alba L.*
3. Процесс поражения имеет кумулятивно-прогрессирующую динамику, при которой высокая численность паразита коррелирует с его успешным развитием и крупными размерами.

4. Пространственное распределение омелы белой в городе Калининград связано в первую очередь со старовозрастными посадками и аккумулировано в зоне доевоенной застройки.

Заключение

Проведенное исследование раскрывает комплексный характер распространения омелы белой в городской среде Калининграда. Анализ данных выявил три ключевых фактора, определяющих динамику этого процесса: возрастная структура древостоев, видовая специфичность растений-хозяев и уровень антропогенного воздействия.

На основании установленных закономерностей можно предложить конкретные меры для совершенствования управления городскими зелеными насаждениями:

1. Создание системы приоритетного мониторинга, ориентированной на старовозрастные деревья ценных пород в зонах исторической застройки и парковых территориях.
2. Внедрение регулярных санитарных мероприятий, предусматривающих механическое удаление побегов омелы на начальных стадиях заражения для прерывания цикла репродукции паразита.
3. Разработка перспективной дендрополитики, направленной на постепенную замену высоковосприимчивых видов более устойчивыми таксонами при проведении реконструкции зеленых насаждений.

Реализация предложенного комплекса мероприятий позволит не только контролировать численность омелы, но и способствовать сохранению биоразнообразия и повышению устойчивости городских экосистем в долгосрочной перспективе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vardanyan R.L., Vardanyan L.R., Atabekyan L.V. Antioxidant effect of extract of white mistletoe (*Viscum album L.*) grown in different trees. Chemical Journal of Armenia. 2011. 64: 335–343.
2. Kołodziejek Jeremi & Patykowski Jacek & Kołodziejek Rafał. (2012). Distribution, frequency, and host patterns of European mistletoe (*Viscum album subsp. album*) in the major city of Lodz, Poland. Biologia. 68. 10.2478/s11756-012-0128-4.
3. Zachwatowicz M., Petrović K., Sudnik-Wójcikowska B. The occurrence of European mistletoe under the conditions of high human impact in the central part of Warsaw, Poland. In Problemy Ekologii Krajobrazu XXII. Warsaw University, Warsaw, Poland. 2008. 101–114.
4. Nickkrent D.L.; Malécot V.; Vidal-Russell R.; Der J.R. A revised classification of Santalales. Taxon 2010, 59, 538–558.
5. Popp M., Richter A. Ecophysiology of Xylem-Tapping Mistletoes. In Progress in Botany, Behnke H.-D., Esser K., Kadereit J.W., Lüttge U., Runge M., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1998; pp. 659–674. ISBN 978-3-642-80448-9.
6. Zuber D. Biological flora of Central Europe: *Viscum album L.* // Flora. 2004. Vol. 199. P. 181–203.
7. Varga I., Poczai P., Tiborcz V., Aranyi N.R., Baltazár T., Bartha D., Pejchal M., Hyvönen J. Changes in the distribution of European mistletoe (Viscum album) in Hungary during the last hundred years. Folia Geobot. 2014. 49: 559–577.
8. Экология распространения и биотехнологический потенциал омелы белой (*Viscum album L.*) на территории Калининградской области / Л.Н. Скрыпник, П.В. Масленников, П.В. Федураев [и др.] // Актуальная биотехнология. — 2020. — № 3(34). — С. 513–516. — EDN TAVZSQ.
9. Skrypnik L., Maslennikov P., Feduraev P., Pungin A., Belov N. Ecological and Landscape Factors Affecting the Spread of European Mistletoe (*Viscum album L.*) in Urban Areas (A Case Study of the Kaliningrad City, Russia). Plants (Basel). 2020 Mar 23;9(3):394. doi: 10.3390/plants9030394. PMID: 32210052; PMCID: PMC7154876.
10. Lech P., Żółciak A., Hildebrand R. Occurrence of European Mistletoe (*Viscum album L.)* on Forest Trees in Poland and Its Dynamics of Spread in the Period 2008–2018. Forests 2020, 11, 83. https://doi.org/10.3390/f11010083.
11. Sayad E., Boshkar E., Gholami S. Different role of host and habitat features in determining spatial distribution of mistletoe infection. For. Ecol. Manage. 2017. 384: 323–330.

© Костыркин Максим Максимович (mkostyrkin@stud.kantiana.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.24

АНАЛИЗ ЛЕКАРСТВЕННОЙ ФЛОРЫ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РЕСПУБЛИКИ КОМИ

ANALYSIS OF THE MEDICINAL FLORA OF THE ARCTIC ZONE OF THE KOMI REPUBLIC

V. Lazareva
E. Tsulaya
E. Kryazheva
E. Eruntsova

Summary. The article presents an ecological and biological analysis of medicinal plants in the Arctic zone of the Komi Republic and determines their practical significance. This study includes taxonomic, biomorphological, ecological, and geographical analyses. The obtained data are crucial for the effective use and study of the medicinal potential of the flora in the study area soon. The results are fundamental for understanding the flora's adaptation mechanisms to the harsh Arctic climate and have practical implications for the rational use of the region's plant resources.

Keywords: medicinal plants, Arctic zone, taxonomic composition, biomorphological spectrum, ecological characteristics, geographical element.

Лазарева Виктория Георгиевна
Доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО Ухтинский Государственный Технический Университет
lazareva-vg@yandex.ru
Цулайя Екатерина Эдуардовна
ФГБОУ ВО Ухтинский Государственный Технический Университет
ekaterinaculaja@gmail.com
Кряжева Екатерина Юрьевна
Старший преподаватель, ФГБОУ ВО Ухтинский Государственный Технический Университет
eremina_83@mail.ru
Ерунцова Екатерина Робертовна
Аспирант, ФГБОУ ВО Ухтинский государственный технический университет
89042005273@mail.ru

Аннотация. В статье представлен эколого-биологический анализ лекарственных растений Арктической зоны Республики Коми и определено их практическое значение. В рамках данного исследования проведен таксономический, биоморфологический, экологический и географический анализы. Полученные данные имеют большое значение для эффективного использования и изучения лекарственного потенциала растительного мира исследуемого района в будущем. Полученные результаты имеют фундаментальное значение для понимания адаптационных механизмов флоры к суровым климатическим условиям Арктики и практическое значение для рационального использования растительных ресурсов региона.

Ключевые слова: лекарственные растения, Арктическая зона, таксономический состав, биоморфологический спектр, экологическая характеристика, географический элемент.

Введение

Тысячелетиями человечество использует лекарственные растения (ЛР) для лечения различных заболеваний. Препараты лекарственных растений занимают значительный удельный вес в общем объеме лекарственных средств — более 40 %. Но последние десятилетия использование природных соединений растительного происхождения уступило свои позиции синтетическим препаратам, являющихся продуктами химической промышленности, ориентированных скорее на прибыль, чем на лечение организма. В результате возникла необходимость в поиске новых источников природного сырья для его внедрения в медицину.

Изучение лекарственной флоры Арктической зоны Республики Коми (РК) представляет собой важное направление в познании биологического разнообразия и природных ресурсов региона. Это способствует выявлению и сохранению биологического разнообразия, позволит понять культурные традиции местного населения в использовании народной медицины и обеспечить основу для разработки новых лекарственных препаратов.

Полученные данные имеют большое значение для эффективного использования и изучения лекарственного потенциала растительного мира исследуемого района в недалеком будущем.

Материалы и методы

Исследования проводились в течение летнего периода 2024–25 гг. Объектами изучения являлись лекарственная флора и ее видовой состав. Даны эколого-биологи-

ческие характеристики для 127 видов лекарственных растений, произрастающих в луговых, лесных, болотных местообитаниях Арктической зоны РК, включающей в себя такие природные зоны, как: южная тундра, северная лесотундра, южная лесотундра, крайне северная тайга и северная тайга.

При анализе и типизации сообществ лекарственной флоры использованы стандартные методики геоботанических и флористических исследований, основанных на классических трудах: В.Н. Сукачева [1], Л.Г. Раменского [2], В.Б. Сочавы [3] и др. Определено и проанализировано 127 видов лекарственной флоры по Б.И. Груздеву и др [4, 5]. Биоморфологическая характеристика видового состава дана по И.Г. Серебрякову (1964) [6] и К. Раункиеру (1907), экологическая характеристика по А.П. Шенникову (1964) [7], Ф.Я. Левиной (1964) [8] и по Л.Г. Раменскому и др., (1956) [9]. Названия видов растений уточнялись по сводке С.К. Черепанова (1995) [10]. Классификация отделов, классов и семейств даны по «Флоре европейской части СССР» (1974) [11].

Таксономический состав лекарственных растений Арктической зоны Республики Коми, представленный в таблице 1, слагают 4 отдела и 5 классов, включающих 46 семейств, 106 родов и 127 видов.

Таблица 1.

Таксономический состав лекарственной флоры Арктической зоны РК

Отдел	Класс	Семейства	Род	Вид
			Кол-во	Кол-во
Покрытосеменные (*Angiospermae*)	Двудольные (*Magnoliopsida*)	Астровые (*Asteraceae*)	16	18
		Розоцветные (*Rosaceae*)	11	16
		Крестоцветные (*Brassicaceae*)	7	8
		Лютиковые (*Ranunculaceae*)	6	7
		Вересковые (*Ericaceae*)	5	7
		Бобовые (*Fabaceae*)	4	6
		Губоцветные (*Lamiaceae*)	5	5
		Гречишные (*Polygonaceae*)	2	5
Покрытосеменные (*Angiospermae*)	Двудольные (*Magnoliopsida*)	Зонтичные (*Apiaceae*)	5	5
		Гвоздичные (*Caryophyllaceae*)	3	4
		Березовые (*Betulaceae*)	1	2
		Ивовые (*Salicaceae*)	1	2
		Крыжовниковые (*Grossulariaceae*)	1	2
		Толстянковые (*Crassulaceae*)	2	2
		Белозоровые (*Parnassiaceae*)	1	1
		Валериановые (*Valerianaceae*)	1	1
		Вахтовые (*Menyanthaceae*)	1	1
		Водяниковые (*Empetraceae*)	1	1
		Волчниковые (*Thymelaeaceae*)	1	1
		Вьюнковые (*Convolvulaceae*)	1	1
		Гераниевые (*Geraniaceae*)	1	1
		Дымянковые (*Fumariaceae*)	1	1
		Зверобойные (*Hypericaceae*)	1	1
		Камнеломковые (*Saxifragaceae*)	1	1
		Кипрейные (*Onagraceae*)	1	1
		Крапивные (*Urticaceae*)	1	1
		Кувшинковые (*Nymphaeaceae*)	1	1
		Мальвовые (*Malvaceae*)	1	1

Отдел	Класс	Семейства	Род	Вид
			Кол-во	Кол-во
Покрытосеменные (*Angiospermae*)	Двудольные (*Magnoliopsida*)	Маревые (*Chenopodiaceae*)	1	1
		Норичниковые (*Scrophulariaceae*)	1	1
		Первоцветные (*Primulaceae*)	1	1
		Пионовые (*Paeoniaceae*)	1	1
		Подорожниковые (*Plantaginaceae*)	1	1
		Росянковые (*Droseraceae*)	1	1
		Синюховые (*Polemoniaceae*)	1	1
		Фиалковые (*Violaceae*)	1	1
	Однодольные (*Liliopsida*)	Мятликовые (*Poaceae*)	3	3
		Ароидные (*Araceae*)	1	1
		Луковые (*Alliaceae*)	1	1
		Мелянтовые (*Melanthiaceae*)	1	1
		Триллиевые (*Trilliaceae*)	1	1
Голосеменные (*Gymnospérmae*)	Хвойные (*Pinopsida*)	Сосновые (*Pinaceae*)	4	5
		Кипарисовые (*Cupressáceae*)	1	1
Плауновидные (*Lycopodiophyta*)	Плауновые (*Lycopodiopsida*)	Баранцовые (*Huperziaceae*)	1	1
		Плауновые (*Lycopodiaceae*)	1	1
Хвощевидные (*Equisetophýtina*)	Хвощёвые (*Equisetopsida*)	Хвощовые (*Equisetaceae*)	1	1
Итого:	***4***	***5***	***46***	***106***

Из таблицы следует, что отдел Покрытосеменные (*Angiospermae*) является господствующим, включающим в себя 118 видов, что составляет 92,9 % от общего числа видов. Отдел Голосеменные (*Gymnospérmae*) включает 6 видов (4,7 %). Остальные отделы, такие как Плауновидные (*Lycopodiophyta*) — 2 вида (1,6 %) и Хвощевидные (*Equisetophýtina*) — 1 вид (0,8 %), являются второстепенными.

Доминирующую роль занимает класс Двудольные (*Magnoliopsida*), включая 111 видов (87,4 %). В подчиненном положении находятся классы: Однодольные (*Liliopsida*) — 7 видов (5,5 %); Хвойные (*Pinopsida*) — 6 видов (4,7 %); Плауновые (*Lycopodiaceae*) — 2 вида (1,6 %); Хвощовые (*Equisetopsida*) — 1 вид (0,8 %). Ведущие семейства составляют 64,6 % от общего числа видов лекарственных растений. К ним относятся: Астровые (*Asteraceae*) — 18 видов (14,2 %) (*Lepidotheca suaveolens*, *Senecio vulgaris*, *Centaurea cyanus* и др.); Розоцветные (*Rosaceae*) — 16 видов (12,6 %) (*Rubus saxatilis*), *Filipendula ulmaria*, *Rosa acicularis* и др.); Крестоцветные (*Brassicaceae*) — 8 видов (6,3 %) (*Descurainia sophia*, *Capsella bursa-pastoris*, *Barbarea vulgaris* и др.); Лютиковые (*Ranunculaceae*) (*Delphinium elatum*, *Caltha palustris*, *Trollius europaeus* и др.), Вересковые (*Ericaceae*) (*Vaccinium uliginosum*, *Vaccinium myrtillus*, *Andromeda polifolia* и др.) — по 7 видов (5,5 % каждое); Бобовые (*Fabaceae*) — 6 видов (4,8 %) (*Melilotus officinalis*, *Trifolium repens*, *Hedysarum alpinum* и др.); Губоцветные (*Lamiaceae*) — 5 видов (3,9 %) (*Glechoma hederacea*, *Prunella vulgaris*, *Lamium album* и др.); Гречишные (*Polygonaceae*) — 5 видов (3,9 %) (*Polygonum bistorta*, *Polygonum aviculare*, *Rumex acetosa* и др.); Зонтичные (*Apiaceae*) — 5 видов (3,9 %) (*Cicuta virosa*, *Angelica archangelica*, *Carum carvi* и др.); Сосновые (*Pinaceae*) — 5 видов (3,9 %) (*Picea obovata*, *Larix sibirica*, *Abies sibirica* и др.).

Олиготипные семейства имеют в своём составе от 2 до 4 видов, насчитывая суммарно до 15 видов, что составляет 11,8 % от общего числа растений. К этим семействам относятся: Гвоздичные (*Caryophyllaceae*) (*Dianthus superbus*, *Stellaria holostea*, *Stellaria media*, *Silene tatarica*); Мятликовые (*Poaceae*) (*Anthoxanthum odoratum*, *Hierochloë odorata*), *Elytrigia repens*); Березовые (*Betulaceae*) (*Betula pendula*, *Betula pubescens*); Ивовые (*Salicaceae*) (*Salix caprea*, *Salix phylicifolia*); Крыжовниковые (*Grossulariaceae*) (*Ribes nigrum*, *Ribes hispidulum*); Толстянковые (*Crassulaceae*) (*Sedum acre*), *Rhodiola rosea*).

Монотипные семейства, содержат, в данном случае только один вид, насчитывая суммарно 30 видов, что составляет 23,6 % от общего числа растений. К этим семействам относятся: Белозоровые (*Parnassiaceae*), Валериановые (*Valerianaceae*), Вахтовые (*Menyanthaceae*), Водяниковые (*Empetraceae*), Волчниковые (*Thymelaeaceae*), Вьюнковые (*Convolvulaceae*), Гераниевые (*Geraniaceae*), Дымянковые (*Fumariaceae*), Зверобойные (*Hypericaceae*), Камнеломковые (*Saxifragaceae*), Кипрейные (*Onagraceae*), Крапивные (*Urticaceae*) и др.

Биоморфологический спектр исследуемой флоры по классификации Серебрякова И.Г., представленный на рисунке 1, включает в себя следующие жизненные формы: деревья — 10 видов (7,9 %) (*Padus avium*, *Picea obovata*, *Salix caprea* и др.); кустарники — 8 видов (6,3 %) (*Salix phylicifolia*, *Ribes hispidulum*), *Daphne mezereum* и др.); кустарнички — 8 видов (6,3 %) (*Oxycoccus palustris*, *Empetrum hermaphroditum*, *Andromeda polifolia* и др.); поликарпические травянистые растения — 84 вида (66,1 %) (*Lepidotheca suaveolens*, *Thalictrum minus*, *Menyanthes trifoliata* и др.); двулетние травянистые растения — 7 видов (5,5 %) (*Descurainia sophia*, *Centaurea cyanus*, *Capsella bursa-pastoris* и др.); монокарпические травы — 10 видов (7,9 %) (*Senecio vulgaris*, *Erysimum cheiranthoides*, *Fumaria officinalis* и др.).

Биоморфологический спектр данной флоры по классификации К. Раункиера, представленный на рисунке 2, показал, что в исследуемой флоре преобладают гемикриптофиты (*Inula britannica*, *Rubus saxatilis*, *Potentilla anserina* и др.), составляющие более половины видов, то есть 71 вид (55,9 %). Второе место занимают фанерофиты (*Sorbus aucuparia*, *Abies sibirica*, *Ribes nigrum* и др.), которые представлены 18 видами (14,2 %), и третье — хамефиты (17 видов — 13,4 %). Также имеются виды, относящиеся к терофитам — 15 видов (11,8 %) (*Polygonum aviculare*, *Malva pusilla*, *Chenopodium album* и др.) и криптофитам — 6 видов (4,7 %) (*Nuphar lutea*, *Allium schoenoprasum*, *Equisetum arvense* и др.).

Соотношение видов по требовательности растений к степени увлажнения представлено на рисунке 3. В исследуемой флоре преобладает мезофитный компонент — 78 видов (61,4 %), в пределах которого выделяются мезофиты — 75 вида (59,1 %) (*Lathyrus pratensis*, *Convolvulus arvensis*, *Veratrum lobelianum* и др.), мезогигрофиты — 2 вида (1,6 %) (*Cirsium heterophyllum*, *Pinus sylvestris*) и мезоксерофиты — 1 вид (0,8 %) (*Thymus talijevii*).

Присутствие видов гигрофитного и гидрофитного компонентов (28,4 % и 0,8 %, соответственно) обуслов-

Рис. 1. Биоморфологический состав лекарственной флоры по классификации И.Г. Серебрякова, 1964 г.

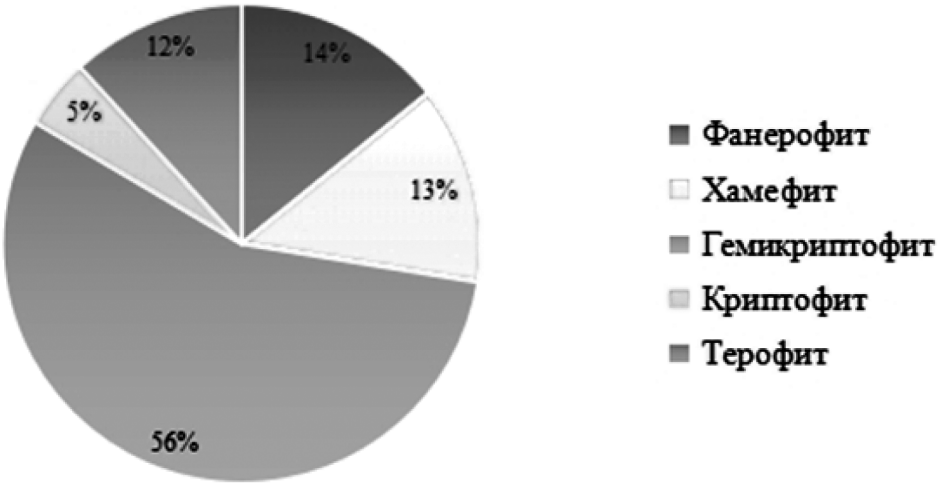


Рис. 2. Биоморфологический состав лекарственной флоры по классификации К. Раункиера, 1907 г.

лено повышенной влажностью из-за климатических особенностей исследуемой территории, приводящих к обилию болот и рек. Именно в этих биотопах встречаются *Polygonum amphibia*, *Rubus chamaemorus*, *Ranunculus repens*, *Huperzia selago* и др. Ксеромезофиты представлены 12 видами (9,5 %): *Berteroa incana*, *Berteroa incana*, *Antennaria dioica*, *Linaria vulgaris* и др.

Также выявлено 2 вида (1,6 %) лекарственных растений, относящихся к криофитам — растениям, приспособленным к холодным условиям окружающей среды и относительно низким температурам (*Cochlearia arctica*, *Rhodiola rosea*).

Соотношение видов по требовательности растений к почвенному плодородию показано на рисунке 4. Лекарственные растения делятся следующим образом: доминируют мезотрофы 77 видов, составляя 60,6 % (*Tanacetum vulgare*, *Rubus saxatilis*, *Mentha arvensis* и др.), далее следуют олиготрофы — 19 видов (15 %) (*Sedum acre*, *Hierochloë odorata*, *Vaccinium uliginosum* и др.).

Мезоэвтрофами является 20 видов (15,7 %) (*Artemisia vulgaris*, *Sanguisorba officinalis*, *Erysimum cheiranthoides* и др.), эвтрофами — 9 видов (7,1 %) (*Filipendula ulmaria*, *Padus avium*, *Lamium album* и др.) и олигомезотрофами — 3 вида (2,4 %) (*Cochlearia arctica*, *Pimpinella saxifraga*, *Huperzia selago*).

Спектр широтных географических элементов, представленный на рисунке 5, показывает преобладание бореальных видов — 91 вид (71,7 %) (*Cirsium heterophyllum*, *Pentaphylloides fruticosa*, *Barbarea vulgaris* и др.), что вполне согласуется с зональным положением района исследований. Второе место по количеству занимают полизональные виды — 17 видов (13,4 %) (*Turritis glabra*, *Plantago major*, *Equisetum arvense* и др.). Доля арктических (1 вид — 0,8 %) (*Cochlearia arctica*) и неморальных

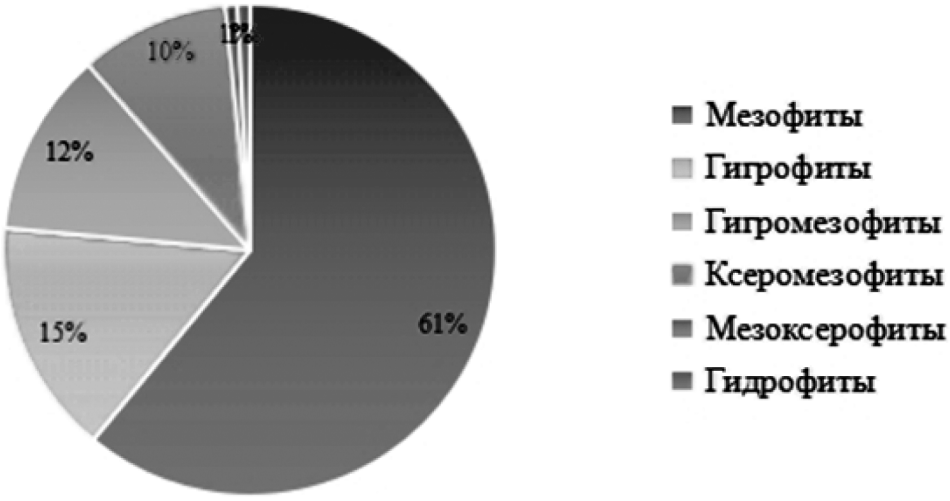


Рис. 3. Соотношение видов по требовательности растений к степени увлажнения местообитаний в Арктической зоне Республики Коми

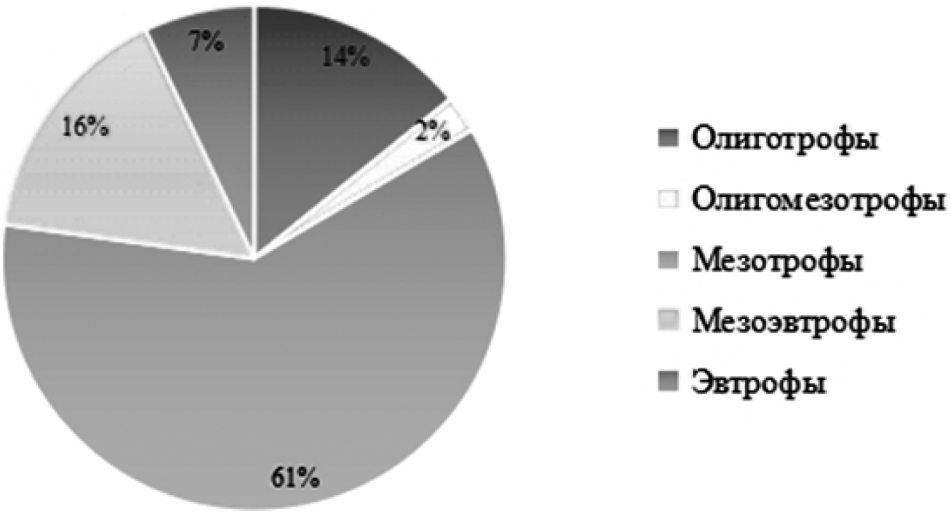


Рис. 4. Соотношение видов по требовательности растений к почвенному плодородию в Арктической зоне Республики Коми

(1 вид — 0,8 %) (*Daphne mezereum*) видов в составе флоры незначительна. Несколько выше доля гипоарктических (7 видов — 5,5 %) (*Rubus arcticus*, *Salix phylicifolia*, *Huperzia selago* и др.), лесостепных видов (5 видов — 3,9 %) (*Centaurea scabiosa*, *Berteroa incana*, *Hedysarum alpinum* и др.) и бореально-неморальных видов (5 видов — 3,9 %) (*Padus avium*, *Glechoma hederacea*, *Lamium album* и др.).

Спектр долготных географических элементов, представленный на рисунке 6, показывает, что наиболее значительно представлена евразиатская группа — 51 вид (40,2 %) (*Antennaria dioica*, *Fragaria vesca*, *Thalictrum minus* и др.), довольно существенную роль во флоре играют виды голарктической долготной группы — 44 вида (34,6 %) (*Caltha palustris*, *Vaccinium myrtillus*, *Prunella vulgaris* и др.). Европейские виды представлены 21 видом (16,5 %) (*Viola tricolor*, *Paris quadrifolia*, *Valeriana wolgensis* и др.), сибирские — 6 видами (4,7 %) (*Picea obovata*, *Hedysarum alpinum*, *Ribes hispidulum* и др.) и космополитные (*Polygonum aviculare*, *Convolvulus arvensis*, *Chenopodium album*) — 3 видами (2,4 %). Азиатско-американская (*Pentaphylloides fruticosa*) и азиатская (*Paeonia anomala*) группы представлены по одному виду и составляют 1,6 % от общего числа видов.

В лекарственной флоре Арктической зоны Республики Коми были определены редкие виды растений, занесенные в Красную Книгу РК. К ним относится 6 видов: *Hedysarum alpinum*, *Pentaphylloides fruticosa*, *Potentilla erecta*, *Rhodiola rosea*, *Pinus sibirica* и *Paeonia anomala*. Пион уклоняющийся (*Paeonia anomala*) также занесен в Красную книгу Российской Федерации.

Большая часть представителей лекарственной флоры данного региона обладают рядом лекарственных свойств, что связано их составом, куда входит несколько биологически активных веществ. Эти вещества оказывают комплексное воздействие на организм и проявляют разные фармакологические эффекты одновременно. В этом исследовании впервые для данного региона сделана попытка построения эколого-клинической класси-

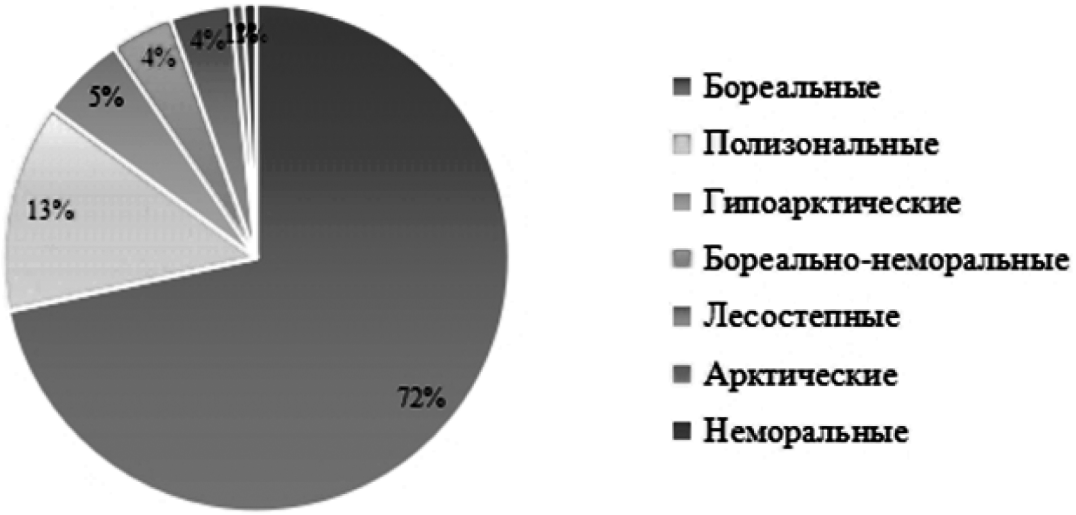


Рис. 5. Спектр широтных географических элементов лекарственной флоры Арктической зоны Республики Коми

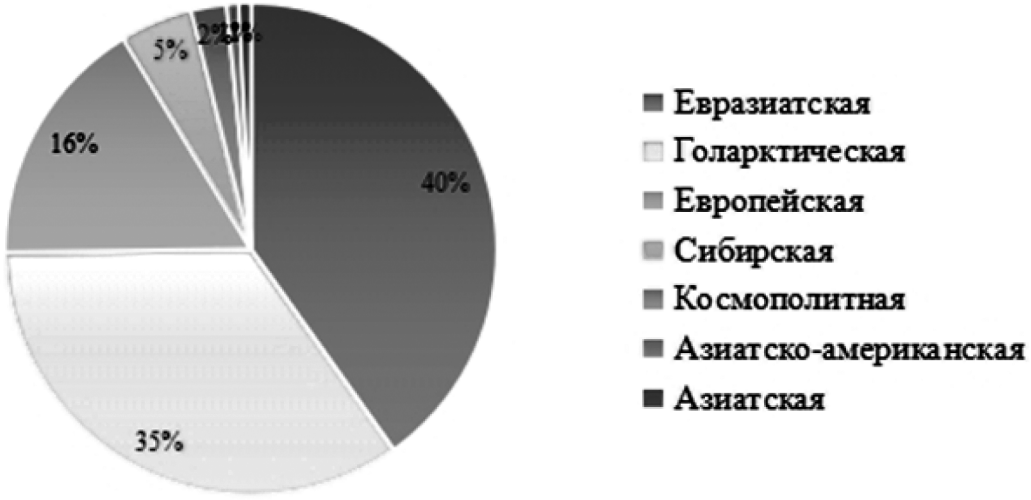


Рис. 6. Спектр долготных географических элементов лекарственной флоры Арктической зоны Республики Коми

фикационной схемы по некоторым клиническим группам воздействия лекарственных растений на организм человека, их химический состав и место произрастания (табл. 2). Следует отметить, что единой обоснованной классификации по клинике отравлений для живых организмов, до сих пор, не существует по разным причинам, а процесс отравления отражает влияние целого комплекса ядовитых веществ, содержащихся в растении (табл. 2), [12, 13, 14].

Из составленной эколого-клинической классификационной схемы следует, что в лекарственной флоре

Таблица 2.

Фрагмент эколого-клинической классификационной схемы по группам воздействия лекарственных растений на организм человека, их химический состав и место произрастания в пределах Арктической зоны Республики Коми [12, 13, 14].

Клинические группы воздействия	Название растения	Химический состав	Место произрастания
1. Растения с преимущественным действием на центральную нервную систему (ЦНС).	1. Вороний глаз четырехлистный (*Paris quadrifolia*)	Все части растения содержат экдистероиды, флавоноиды, алкалоиды.	Растет во влажных темнохвойных и смешанных разнотравных лесах, в поймах рек, на лесных опушках, в кустарниках по берегам рек, ручьев, озер.
	2. Родиола розовая (*Rhodiola rosea*)	Корневища и корни содержат фенолоспирттиразол и его глюкозид салидрозид, флавоноиды, гликозиды коричного спирта (розавин, розарин, розин), флавонолигнан родиолин, монотерпены (розиридол и розиридин), дубильные вещества (около 20 %), эфирное масло и органические кислоты, аккумулятор молибдена, селена и железа.	Растет в моховых и ерниковых равнинных и горных тундрах, на луговинах и скалах.
	3. Валериана волжская (*Valeriana wolgensis*)	Корневища с корнями содержат эфирное масло (изоборнилизовалерат, борнилацетат, борнеол и др.).	Растет в таежной зоне на опушках, в высокотравных смешанных лесах, на лугах, в кустарниках, на окраинах болот, в тундровой зоне — на луговинах. Предпочитает местообитания с достаточным и избыточным увлажнением.
	4. Герань луговая (*Geranium pratense*)	Все части растения содержат тритерпеновые гликозиды, алкалоиды, фенолкарбоновые кислоты, флавоноиды, антоцианы, дубильные вещества.	Произрастает в таежной и лесотундровой зоне республики на злаково-разнотравных и разнотравных пойменных и суходольних лугах, опушках, в березовых травянистых лесах, на сорных местообитаниях, огородах.
2. Растения, с преимущественным действием на печень.	1. Белозор болотный (*Parnassia palustris*)	Все части растения содержат алкалоиды, флавоноиды, дубильные вещества и горечи.	Предпочитает сырые или переувлажненные местообитания. Встречается на пойменных лугах, вырубках, на задерненных склонах оврагов, по берегам рек, в различных типах лесов. В тундре растет вдоль рек, на Урале доходит до верхнего предела леса.
	2. Вахта трехлистная (*Menyanthes trifoliata*)	Все части растения содержат монотерпеноидные горечи (логанин, сверозид, ментиафолин) и флавоноиды (рутин, гиперозид и трифолин). В листьях обнаружено не большое количество йода и алкалоидов. Листья являются также концентраторами селена и марганца.	Доминирует в ельниках и сосняках вахтово-сфагновых, растет на низинных болотах, торфянистых берегах стариц и водораздельных озер.
	3. Золотарник обыкновенный (*Solidago virgaurea*)	Надземные части растения содержат алкалоиды, тритерпеновые гликозиды, производные олеаноловой кислоты, дубильные вещества, флавоноиды и кумарины (эскулетин, эскулин).	Распространен на пойменных и суходольных лугах, в кустарниках, еловых, березовых лесах, сосняках разнотравно-зеленомошных, в ерниковых равнинных тундрах. На Урале на субальпийских мелкотравных лугах, ольховниках, травянистых ерниковых и ивняковых горных тундр.

Клинические группы воздействия	Название растения	Химический состав	Место произрастания
2. Растения, с преимущественным действием на печень.	4. Одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale*)	Надземная часть растения содержит витамины B1, B2, C, каротин, кумарины, флавоноиды и сесквитерпиноиды; корни — сахара, инулин, тритер пены и фенилкарбоновые кислоты.	Растет на разнотравных суходольных и пойменных лугах, по берегам рек, в кустарниках, сосновых и смешанных лесах, на вырубках и опуш ках. Встречается вблизи жилья, у дорог, на пастбищах, огородах.
3. Растения, с преимущественным действием на почки.	1. Горец птичий (*Polygonum aviculare*)	Стебли и листья содержат флавоноиды, фенилкарбоновые кислоты, кумарины и антоцианы. Содержание дубильных веществ 1,8–4,8 %.	Встречается в населенных пунктах, вдоль дорог, на пастбищах, в посевах.
	2. Земляника лесная (*Fragaria vesca*)	Надземные части растения содержат эфирное масло, витамин С, флавоноиды, дубильные вещества (до 9 %) и каротин, плоды — сахара, пектины, органические кислоты.	Растет в поймах по вершинам и склонам незаливаемых грив, на суходольных лугах, вырубках, по склонам коренных берегов, лесным полянам, на опушках, в травянистых разреженных березовых, смешанных, а иногда в еловых, лиственничных и сосновых лесах.
4. Растения, с преимущественным действием на желудочно-кишечный тракт (ЖКТ).	3. Бедренец-камнеломка (*Pimpinella saxifraga*)	Корни растения содержат эфирные масла (до 0,7 %) и кумарины (0,4 %), флавоноиды.	Приурочен к водораздельным и пойменным лугам высокого уровня, лесным опушкам.
	4. Вербейник обыкновенный (*Lysimachia vulgaris*)	Надземная часть растения содержит флавоноиды (рутин), витамин С, фенолкарбоновые кислоты, антоцианы в гидролизате (дельфинидин, цианидин).	Растет на сырых разнотравных и осоковых лугах, в ивняках, ольшаниках по берегам рек, озер и на островах. Обычен на лесных опушках в травянистых, еловых, березовых и смешанных лесах. Изредка встречается по канавам и вдоль дорог.
	5. Иван-чай узколистный (*Chamaenerion angustifolium*)	Листья содержат полисахариды и алкалоиды, флавоноиды, тритерпеновые гликозиды, производные олеаноловой и урсоловой кислот, а также дубильные вещества.	Образует чистые заросли на вырубках, гарях, по обочинам дорог, встречается в травянистых лесах, на опушках, активно заселяет нарушенные экотопы.
	6. Крестовник обыкновенный (*Senecio vulgaris*)	Все части растения содержат пирролизидиновые алкалоиды.	Встречается на огородах, залежах, мусорных местах, в посевах, около дорог и жилья в не значительных количествах.
	7. Кровохлебка аптечная (*Sanguisorba officinalis*)	Корневища содержат до 20 % дубильных веществ, катехины, флавоноиды, сапонины, эфирное масло.	Растет на пойменных и суходольных лугах, береговых склонах, на обнажениях известняков, тундровых луговинах. В тундре и лесотундре произрастает на луговинах и бечевниках.

Арктической зоны РК изученные по физиологическому воздействию ядовитых веществ на организм выделено 8 групп, где доминируют растения с преимущественным влиянием на желудочно-кишечный тракт (ЖКТ), включающих 7 видов от изученной флоры.

Кроме того, встречаются растения, обладающие противовоспалительными, жаропонижающими, мочегонными, потогонными, желчегонными, вяжущими, обезболивающими, кровоостанавливающими и многими другими свойствами. Мочегонное действие оказывают 55 видов, к ним относятся: *Calla palustris*, *Betula pendula*, *Menyanthes trifoliata*, *Descurainia sophia*, *Rosa majalis* и др. К группе растений с потогонными свойствами относятся 23 вида, среди них: *Melilotus albus*, *Elytrigia repens*, *Rubus arcticus*, *Prunella vulgaris* и др. Желчегонным действием обладают 13 видов, включая: *Sorbus aucuparia*, *Rosa acicularis*, *Taraxacum officinale*, *Tanacetum vulgare* и др.

К растениям вяжущего действия принадлежат 21 вид: *Parnassia palustris*, *Heracleum sibiricum*, *Polygonum amphibia*, *Polygonum bistorta*, *Polygonum aviculare*, *Chrysosplenium alternifolium* и др. Для остановки кровотечений используют 28 видов, куда входят: *Lysimachia vulgaris*, *Geum rivale*, *Urtica dioica*, *Senecio vulgaris*, *Equisetum arvense* и др. При заболеваниях органов дыхания как отхаркивающие средства применяют 23 вида растений, например, *Ledum palustre*, *Inula britannica*,

Stellaria holostea, *Drosera rotundifolia* и др. Более 60 наименований растений относят к желудочным средствам, включая: *Plantago major*, *Carum carvi*, *Menyanthes trifoliata* и все виды вяжущего действия. Также есть растения, применяемые как седативные (успокаивающие): *Valeriana wolgensis*, *Polemonium caeruleum*, *Mentha arvensis* и др. Для избавления от паразитов (простейших) применяют: *Tanacetum vulgare*, *Veratrum lobelianum*, *Rumex crispus* и др. Более 10 видов содержат вещества, обладающие болеутоляющим действием: *Nuphar lutea*, *Ranunculus repens*, *Lycopodium clavatum* и др. При проблемах со зрением употребляют плоды Черники (*Vaccinium myrtillus*).

Действия лекарственных растений не ограничиваются вышеперечисленными, так как многие виды обладают дополнительными и не всегда хорошо изученными свойствами. Растения, которые занесены в Красную книгу, не подлежат заготовке.

Заключение

Изучение биоэкологических свойств лекарственных растений арктической зоны Республики Коми имеет очень важное значение для:

— сохранения биологического разнообразия и выявления возможных потенциальных угроз, способных привести к утрате аборигенных видов и для разработки мер по их охране;
— оценки их лечебных свойств и создания основ для рационального применения в профилактике и лечении различных заболеваний;
— развития фармакологических исследований для расширения физиотерапевтических ресурсов региона и разработки новых лекарственных препаратов на основе природных соединений;
— повышения осведомленности населения о целебных свойствах региональной флоры и возможностях ее использования для профилактики здоровья;
— выявления наиболее продуктивных сообществ для оценки запасов природного лекарственного сырья с целью создания новых лекарств и биологически активных добавок и разработки маркетинговой стратегии и продвижения на рынок продукции на основе регионального растительного сырья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сукачев В.Н. Некоторые общие теоретические вопросы фитоценологии. Вопросы ботаники. — 1954. — С. 201–309.
2. Раменский Л.Г. Введение в комплексное почвенно-геоботаническое исследование земель. — С. 1938. — 620.
3. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. — 1978. — 318 с.
4. Груздев Б.И., Мартыненко В.А. Сосудистые растения Республики Коми. — 2008. — 136 с.
5. Володин В.В., Груздев В.А., Мартыненко В.А., Канев В.А. Растения-продуценты важнейших классов биологически активных веществ. — 2004. — 206 с.
6. Серебряков И.Г. Жизненные формы и их изучение. Полевая геоботаника. — 1964. — С. 118–139.
7. Шенников А.П. Экология растений. — 1950. — С. 12–251.
8. Левина Ф.Я. Растительность полупустыни Северного Прикаспия и ее кормовое значение. — 1964. — 336 с.
9. Раменский Л.Г., Цаценкин Л.Г., Чижиков О.Н., Антипин О.Н. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову — 1956. — 472 с.
10. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР) — 1995. — 992 с.
11. Барбарич А.И., Бобров Е.Г., Васильев В.Н., Виноградова В.М. [и др.] Флора европейской части СССР — 981. — 380 с.
12. Гусев Н.Ф., Немерешина О.Н., Петрова Г.В., Филиппова А.В. Лекарственные и ядовитые растения Урала как фактор биологического риска. Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2011. 400 с.
13. Нгуен В.З., Бананова В.А., Лазарева В.Г., Горяев И.А. Классификация сообществ ядовитых растений Калмыкии, их характеристика // Степи Северной Евразии: Материалы X международного симпозиума (Международного степного форума). Оренбург, 2024. С. 887–892.
14. Нгуен В.З., Лазарева В.Г. Ядовитые растения пастбищ Калмыкии // Степи Северной Евразии: Материалы X международного симпозиума (Международного степного форума). Оренбург, 2024. С. 893–900.

© Лазарева Виктория Георгиевна (lazareva-vg@yandex.ru); Цулайя Екатерина Эдуардовна (ekaterinaculaja@gmail.com);
Кряжева Екатерина Юрьевна (eremina_83@mail.ru); Ерунцова Екатерина Робертовна (89042005273@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.34

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНОКУЛЯЦИИ РАСТЕНИЙ СОИ БАКТЕРИЯМИ РОДОВ ENTEROBACTER SP. И BRADYRHIZOBIUM SP. В ВЕГЕТАЦИОННЫХ И ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

EFFICIENCY OF INOCULATION OF SOYBEAN PLANTS WITH BACTERIA OF THE GENERA ENTEROBACTER SP. AND BRADYRHIZOBIUM SP. UNDER VEGETATION AND FIELD CONDITIONS

A. Sidorin
V. Bobrov
K. Kargapolova
O. Tkachenko

Summary. The efficiency of soybean plant inoculation with new bacterial strains of the genera *Enterobacter* sp. and *Bradyrhizobium* sp. was studied under vegetation and field conditions of the Lower Volga region. Effective native strains of *Enterobacter* sp. GmNf6s, *Bradyrhizobium* sp. I-1 and II-2 were isolated in vegetation experiments. *Bradyrhizobium* sp. strains ensured the formation of functionally active nodules and more intensive accumulation of plant biomass compared to *Enterobacter* sp., which do not form nodules, but can exert a growth-stimulating effect on the growth of plant biomass. In field studies, a significant positive effect of soybean seed coinoculation with *Enterobacter* sp. and *Bradyrhizobium* sp. strains on the formation of the symbiotic apparatus of plants was observed. The maximum effect was achieved with inoculation with *Bradyrhizobium* sp. strain. II-2: seed weight per plant and yield increased by 87.8 %. The obtained results demonstrate the potential of using the selected strains and their combinations to increase soybean yields on dark chestnut soils of the Lower Volga region.

Keywords: *Bradyrhizobium, Enterobacter,* soybean, inoculation, yield.

Сидорин Александр Сергеевич
Аспирант,
ФГБОУ ВО Вавиловский университет, г. Саратов
sasha.sidorin2013@mail.ru
Бобров Владислав Александрович
Аспирант,
ФГБОУ ВО Вавиловский университет, г. Саратов
vladbobrov8@gmail.com
Каргаполова Кристина Юрьевна
Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,
ФГБОУ ВО Вавиловский университет, г. Саратов
kinaschchri@gmail.com
Ткаченко Оксана Викторовна
Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,
ФГБОУ ВО Вавиловский университет, г. Саратов
oktkachenko@yandex.ru

Аннотация. Изучена эффективность инокуляции растений сои новыми штаммами бактерий родов *Enterobacter* sp. и *Bradyrhizobium* sp. в вегетационных и полевых условиях Нижнего Поволжья. В вегетационных опытах выделены эффективные аборигенные штаммы *Enterobacter* sp. GmNf6s, *Bradyrhizobium* sp. I-1 и II-2. Штаммы *Bradyrhizobium* sp., обеспечивали формирование функционально активных клубеньков и более интенсивное накопление биомассы растений по сравнению с *Enterobacter* sp., не формирующими клубеньков, но способными оказывать рост-стимулирующий эффект на рост биомассы растений. В полевых исследованиях наблюдалось существенное положительное влияние коинокуляции семян сои штаммами *Enterobacter* sp. и *Bradyrhizobium* sp. на формирование симбиотического аппарата растений. Максимальный эффект достигался при инокуляции штаммом *Bradyrhizobium* sp. II-2: масса семян с одного растения и урожайность увеличивались на 87,8 %. Полученные результаты показывают перспективность применения отобранных штаммов и их сочетания для повышения урожайности сои на темно-каштановых почвах Нижневолжского региона.

Ключевые слова: *Bradyrhizobium, Enterobacter,* соя, инокуляция, урожайность.

Введение

Соя (*Glycine max* (L.) Merr.) является одной из важнейших зернобобовых культур, играющей ключевую роль в обеспечении населения растительным белком и маслом [Gawęda, D., 2020]. В последние десятилетия наблюдается устойчивое расширение посевных площадей культуры, в том числе в Российской Федерации, в том числе в регионах с аридным климатом, включая Нижнее Поволжье. Однако продуктивность сои в засушливых условиях Саратовской области часто ограничивается неблагоприятными почвенно-климатическими условиями, что обусловливает необходимость внедрения методов повышения урожайности культуры [Загоруй-

[1] Работа выполнена по государственному заданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 1025120800043-6-4.1.6

ко, М.Г., 2024; Basal, O., 2020; Farming, 2023; Munareto, G., 2025].

Одним из наиболее эффективных направлений биологизации земледелия является использование микробных препаратов на основе симбиотических и ассоциативных ризосферных бактерий [Волобуева, О.Г., 2022; Куликов, Я.К., 2022]. Известно, что формирование азотфиксирующего симбиоза сои с бактериями рода *Bradyrhizobium* обеспечивает растения биологическим азотом и способствует повышению урожайности с уменьшением зависимости от минеральных азотных удобрений [Сатаева, Л.В., 2025]. По данным многочисленных исследований, предпосевная инокуляция семян сои штаммами *Bradyrhizobium japonicum* обеспечивает формирование активных клубеньков и может увеличивать урожайность культуры на 10–30 % в условиях недостатка естественной популяции ризобий [Сытников, Д.М., 2021; Саенко, Г.М., 2018]. Кроме того, показано, что эффективность инокуляции зависит от конкурентоспособности биопрепаратов по отношению к аборигенной микрофлоре почвы и от агроэкологических условий выращивания культуры [Крутило, Д.В. 2014; Pannecoucque, J., 2018].

Наряду с симбиотическими ризобиями, в последние годы большое внимание уделяется ассоциативным и эндофитным бактериям, относящимся к группе PGPR (plant growth-promoting rhizobacteria). Среди них важное место занимают бактерии рода *Enterobacter*, обладающие комплексом рост-стимулирующих свойств [Ji, C. et al. 2020]. Представители данного рода способны синтезировать фитогормоны, растворять фосфаты, продуцировать сидерофоры и ферменты, повышающие доступность элементов питания для растений. Например, было показано, что штаммы *Enterobacter cloacae*, выделенные из ризосферы сои, способствуют повышению содержания питательных элементов в растениях и увеличению массы семян, что подтверждает их перспективность для создания биопрепаратов [Ramesh, A. et al. 2014; Alkurtany, A.E., 2023].

В ряде исследований показан синергический эффект совместного применения ризобиальных и ассоциативных бактерий. Комбинированная инокуляция бактериями *Bradyrhizobium* и PGPR может усиливать развитие корневой системы, увеличивать площадь листовой поверхности и повышать устойчивость растений к абиотическим стрессам, включая засуху и засоление почв [Zeffa, D.M. et al. 2020; Win, K.T. et al. 2024]. В частности, показано, что ассоциативные бактерии способствуют повышению эффективности азотфиксации и улучшению физиологического состояния растений сои [Masciarelli, O., 2014; Ferri, G.C. et al.].

Несмотря на значительное количество исследований, вопросы эффективности инокуляции различных сортов сои новыми штаммами бактерий остаются недостаточно изученными для почвенно-климатических условий Нижнего Поволжья. Особенно актуально изучение реакции различных сортов сои на применение бактериальных препаратов на темно-каштановых почвах, где формирование эффективного симбиоза может существенно варьировать [Шадских, В.А., 2015].

В литературе нет упоминания о выделении штаммов-симбионтов сои в Нижнем Поволжье, где соя является интродуцированной культурой. Поэтому особый интерес представляет изучение эффективности инокуляции этой сельскохозяйственной культуры аборигенными штаммами, адаптированными к засушливому климату и почвам региона. В связи с этим целью настоящего исследования являлась оценка эффективности инокуляции сои сорта Натали бактериями родов *Bradyrhizobium* и *Enterobacter*, выделенными на территории Нижнего Поволжья.

Материалы и методы

В экспериментах использовали шесть штаммов *Enterobacter* sp. и семь штаммов *Bradyrhizobium* sp., ранее выделенных из корневых клубеньков естественного происхождения растений сои (*Glycine max* (L.) Merr.) сорта Натали, выращенных на темно-каштановой почве Энгельсского района Саратовской области (РФ, Саратовская область, Энгельсский район, село Степное, УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет, 51°07′34.0»N 45°59′59.0»E). Штаммы депонированы в коллекции ризосферных микроорганизмов ИБФРМ РАН (http://collection.ibppm.ru). Для культивирования бактерий использовали жидкую безазотистую питательную среду Yeast Mannitol Agar (YMA) следующего состава (г/л): дрожжевой экстракт — 0,5; K_2HPO_4 — 0,2; $MgSO_4 \times 7H_2O$ — 0,2; маннит — 7,0; агар-агар — 15 (pH 7,0–7,2). Бактерии культивировали при 30 °С в течение 24-48 часов до достижения КОЕ=10^8 клеток/мл.

В вегетационном опыте растения сои сорта Натали выращивали в оранжерее в сосудах с песком, предварительно стерилизованном прогреванием в сухожаровом шкафу при температуре 250 °С в течение 12 часов. Семена стерилизовали в растворе диацида, промывали автоклавированной дистиллированной водой, затем инокулировали погружением в суспензию штаммов на 2 часа. В контрольном варианте стерилизованные семена замачивали в равном объеме воды. Каждый вариант опыта закладывали в 5-кратной повторности. Полив осуществляли дистиллированной водой, подкормку проводили на 15 и 25 сутки выращивания безазотистым раствор Кнопа, содержащим (г/л): $CaNO_3$ — 1; $KHPO_4$ — 0,25; $MgSO_4$ — 1; KCL — 0,125; $FeSO_4$ — 0,0125. Растения выращивали в течение 30 суток, после чего анализировали морфометрические признаки.

Оценку эффективности выделенных штаммов в полевых условиях проводили в учебно-научно-производственном объединении «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет. Растения сои сорта Натали выращивали на темно-каштановой почве на орошаемом участке. Предшественником для выращивания сои являлась кукуруза. Сухие нестерильные семена сои перед посевом обрабатывали суспензией бактерий в концентрации КОЕ=10^8 клеток/мл по 200 мл на 3 кг семян. Контроль обрабатывали таким же объемом стерильной воды без бактерий. Морфометрические признаки растений оценивали в начале фаз цветения и формирования бобов, а также перед уборкой при побурении 2/3 бобов. Площадь учетной делянки составляла 0,5 м^2 в трехкратной повторности. Полевые опыты были повторены дважды в 2024 и 2025 гг.

Полученные данные сравнивали на основе дисперсионного анализа и теста Дункана ($p<0,05$) в программе Statistica.

Результаты и обсуждение

Оценка рост-стимулирующей активности штаммов рода Enterobacter sp. и *Bradyrhizobium sp. в вегетационном опыте*

На 30 сутки выращивания растений сои в вегетационных сосудах в условиях оранжереи не установлено достоверного влияния штаммов на длину побегов и корней, но по сухой массе побегов и корней некоторые опытные варианты отличались от контроля, а именно под влиянием инокуляции штаммом *Enterobacter* sp. GmNs2 уменьшалась масса побега, а под влиянием штаммов *Enterobacter* sp. GmNs1 и GmNr4 — масса корней (табл. 1). Несколько увеличивались показатели массы побегов и корней (соответственно на 16 и 41 % по сравнению с контролем) под влиянием штамма *Enterobacter* sp. GmNf6s, но не достоверно по результатам дисперсионного анализа.

Инокуляция растений сои штаммами рода *Bradyrhizobium sp.* оказывала комплексное влияние как на морфометрические показатели растений, так и на формирование симбиотического аппарата, при этом эффект варьировал в зависимости от штамма.

В сравнении с контролем некоторые штаммы *Bradyrhizobium sp.* проявляли выраженное рост-стимулирующее действие (табл. 2). Наиболее значительный эффект отмечен для штамма *Bradyrhizobium* sp. II-2, при инокуляции которым длина побега сои возрастала в 1,6 раза по сравнению с контролем, сухая масса побега — в 2 раза, а сухая масса корня в 1,7 раза. Штаммы *Bradyrhizobium* sp. I-1 и II-1 достоверно увеличивали сухую массу побега по сравнению с контролем, соответственно на 40 и 38 %. Кроме того, штамм *Bradyrhizobium* sp. I-1 стимулировал рост массы корня в 2,2 раза.

Таблица 1.

Влияние штаммов *Enterobacter* sp. на морфометрические признаки растений сои в вегетационном опыте

Вариант	Длина побега, см	Длина корня, см	Масса побега сухая, мг	Масса корня сухая, мг
Контроль	29,6	19,2	1033,6 bcd	1239,1 bc
GmNf6s	28,8	20,4	1203,7 cd	1736,8 c
GmNf4	30,5	17,3	1224,6 d	1573,1 bc
GmNs1	23,2	15,8	717,5 ab	297,4 a
GmNs2	23,4	18,7	538,3 a	1061,8 abc
GmNr4	24,9	17,5	715,7 ab	828,3 ab
GmNr2	28,8	21,6	764,5 abc	1579,3 bc

Примечание: здесь и далее в таблицах варианты, обозначенные разными буквенными индексами, достоверно различаются по результатам дисперсионного анализа ($p<0,05$).

Таблица 2.

Влияние штаммов *Bradyrhizobium* sp. на морфометрические признаки растений сои в вегетационном опыте

Вариант	Длина побега, см	Масса побега сухая, мг	Масса корня сухая, мг	Количество клубеньков, шт.	Масса клубеньков сухая, мг
Контроль	26,5 ab	283,1 ab	295,2 bc	0a	0a
III-2	24,6 a	195,8 a	71,2 a	10,40 bc	4,3 ab
I-5	35,0 abc	330,5 ab	142,6 ab	11,4 abc	14,7 abc
II-2	42,7 c	561,6 c	488, de	25,0 c	33,1 bc
I-6	34,3 abc	350,0 ab	211,9 abc	15,0 abc	16,6 abc
III-1	32,6 abc	378,4 abc	326,9 c	24,8 c	34,6 c
I-3	38,6 abc	339,4 ab	356,1 cd	18,8 abc	16,6 abc
I-1	40,6 bc	397,6 c	648,3 de	17,0 abc	27,7 abc
I-2	33,7 abc	379,0 abc	344,1 cd	21,8 bc	42,9 c
I-4	26,8 ab	257,0 ab	134,6 ab	5,8 ab	3,7 ab
II-1	35,8 abc	390,7 c	137,7 ab	14,2 abc	17,3 abc

Особое значение в оценке эффективности штаммов *Bradyrhizobium* имеет анализ формирования симбиотического аппарата (табл. 2). В контрольном варианте клубеньки отсутствовали, тогда как все варианты инокуляции обеспечивали образование корневых клубеньков. Наиболее интенсивное клубенькообразование отмечено у растений, инокулированных штаммами *Bradyrhizobium* sp. II-2 и III-1, у которых количество клу-

беньков достигало 25,0 и 24,8 шт. соответственно. Эти же варианты характеризовались высокой сухой массой клубеньков, что указывает на максимальное положительное влияние данных штаммов на формирование функционально активного симбиотического аппарата. Вариант с инокуляцией штаммом *Bradyrhizobium* sp. I-2 отличался умеренным числом клубеньков, однако имел максимальную сухую массу клубеньков (42,85 мг), что может свидетельствовать о формировании менее многочисленных, но более крупных и физиологически зрелых симбиотических структур. Напротив, штаммы *Bradyrhizobium* sp. III-2 и I-4 формировали ограниченное число клубеньков с минимальной массой, что коррелировало с низкими показателями роста и биомассы растений.

Оценка рост-стимулирующей активности штаммов Enterobacter sp. и Bradyrhizobium sp. в полевых условиях

Полевые испытания эффективности инокуляции позволяют оценить влияние штаммов на элементы структуры урожая и продуктивность сои в условиях реального агроценоза. В отличие от лабораторных опытов, данный этап исследований отражает интегральный эффект действия инокулянтов с учётом почвенно-климатических факторов региона.

Для проведения полевых испытаний были отобраны только те штаммы, которые в вегетационном опыте продемонстрировали наиболее выраженный положительный эффект на растения. Из штаммов рода *Enterobacter* был выбран штамм GmNf6s, обеспечивавший увеличение площади листовой поверхности и развитие корневой системы при отсутствии угнетающего воздействия на другие морфометрические признаки. Среди штаммов *Bradyrhizobium* sp. были выбраны штаммы I-1 и II-2, оказавшие влияние на формирование активного симбиотического аппарата и на накопление биомассы растений. Оценивалось не только влияние каждого из выбранных штаммов, но и комплексное воздействие всех трех штаммов одновременно (табл. 3).

Таблица 3.

Оценка влияния штаммов *Enterobacter* sp. GmNf6s, *Bradyrhizobium* sp. I-1 и II-2 на морфометрические параметры растений сои в полевых условиях (в среднем за 2024–2025 гг.)

Признак	Фаза вегетации	Варианты опыта				
		Контроль	GmNf6s	I-1	II-2	Комплекс штаммов
Длина побега, см	Цветение	29,0 a	31,6 ab	34,2 c	34,1 c	33,4 c
	Формирование бобов	41,3 a	49,8 ab	54,1 b	53,1 b	51,4 ab
	Созревание	48,4 a	53,0 b	52,7 b	54,1 b	52,6 b
Длина корня, см	Цветение	18,6 a	19,6 a	20,3 a	21,6 a	21,7 a
	Формирование бобов	21,0 a	24,2 ab	24,8 ab	24,2 ab	25,2 b
	Созревание	19,5 a	22,2 ab	22,8 b	20,8 ab	23,0 b
Площадь листьев, $см^2$	Цветение	319,0 a	427,9 b	498,2 bc	450,7 b	565,7 c
	Формирование бобов	300,0 a	390,2 ab	467,7 b	449,6 b	473,6 b
Масса побега сухая, г	Цветение	5,5 a	7,3 ab	8,5 b	9,0 b	9,3 b
	Формирование бобов	11,4 a	15,5 ab	17,3 ab	22,0 b	23,4 b
Масса корня сухая, г	Цветение	0,9 a	1,1 a	1,2 a	1,7 b	1,6 b
	Формирование бобов	1,6 a	2,2 ab	2,0 ab	2,8 ab	3,0 b
Масса клубеньков сырая, мг	Цветение	86,6 a	100,0 a	163,7 ab	211,9 b	132,9 ab
	Формирование бобов	145,7 a	277,4 ab	348,3 ab	440,8 b	482,0 b
Масса клубеньков сухая, мг	Цветение	33,0 a	48,4 a	59,0 a	64,6 a	62,0 a
	Формирование бобов	55,3 a	134,8 ab	142,3 ab	182,1 b	190,8 b
Количество клубеньков, шт.	Цветение	15,9 a	24,6 ab	29,8 b	22,1 ab	25,6 ab
	Формирование бобов	21,3 a	41,0 ab	36,8 ab	50,1 ab	52,3 b

Анализ линейных параметров роста показал, что влияние инокуляции на высоту растений проявлялось уже в фазу цветения. При инокуляции штаммами *Bradyrhizobium* sp. I-1 и II-2 и при ко-инокуляции тремя штаммами длина побегов увеличивалась на 15–18% по сравнению с контролем. Штамм *Enterobacter* sp. GmNf6s обеспечивал незначительный прирост. В фазу формирования бобов растения, инокулированные штаммами *Bradyrhizobium* sp. I-1 и II-2, по высоте превышали контроль на 28–30 %. К моменту уборки все инокулированные варианты сохраняли преимущество по высоте побега по сравнению с контролем на 8,7–11,8 %, что свидетельствует о пролонгированном эффекте инокуляции.

В фазу цветения различия между вариантами по длине корней были незначительными, однако в период формирования бобов наблюдалось усиление роста корней у инокулированных растений, особенно в варианте с ко-инокуляцией комплексом штаммов, в котором длина корня превышала контрольные растения на 20%. К моменту сбора урожая наиболее устойчивый стимулирующий эффект сохранялся у штамма I-1 и при ко-инокуляции (соответственно +17 и +18 % к контролю), что указывает на их положительное влияние на формирование корневой системы в условиях поля.

Инокуляция также оказывала положительное влияние на формирование ассимиляционной поверхности растений. В фазу цветения площадь листьев под влиянием изучаемых штаммов увеличивалась во всех вариантах опыта по сравнению с контролем в 1,3–1,8 раза, минимально в варианте со штаммом *Enterobacter* sp. GmNf6s и максимально при комплексной ко-инокуляции. В фазу формирования бобов, несмотря на начинающееся общее снижение площади листьев растения, инокулированные штаммами *Bradyrhizobium* sp. I-1 и II-2 и комплексом бактерий сохраняли более высокий уровень данного показателя, превышая контроль в 1,5–1,6 раза, что указывает на поддержание фотосинтетического потенциала во второй половине вегетации.

Накопление сухой массы побега демонстрировало более чёткие различия между вариантами. В фазу цветения растения, инокулированные штаммами *Bradyrhizobium* sp. I-1 и II-2 и при ко-инокуляции, формировали больше сухой массы побега по сравнению с контролем в 1,5–1,7 раза. В фазу налива семян максимальные значения сухой массы побега отмечены у штамма *Bradyrhizobium* sp. II-2 и при ко-инокуляции, что вдвое превышало контроль.

Анализ сухой массы корней показал аналогичную тенденцию. В фазу цветения наибольшее накопление корневой биомассы наблюдалось под влиянием штамма *Bradyrhizobium* sp. II-2 и при ко-инокуляции (соответственно на 77 и 88 % по сравнению с контролем). В фазу налива семян ко-инокуляция обеспечивала максимальные значения сухой массы корней (на 87,5 % выше, чем в контроле). Это указывает на усиленное развитие подземных органов при совместном применении микроорганизмов.

Формирование симбиотического аппарата усиливалось по мере перехода от цветения к формированию бобов и семян. Следует подчеркнуть, что *Enterobacter* sp. GmNf6s не формирует клубеньки на корнях сои, однако в условиях поля в данном варианте отмечалось увеличение числа и массы клубеньков по сравнению с контролем, что связано с активностью аборигенных штаммов ризобий. Наиболее развитый симбиотический аппарат формировался при инокуляции штаммом *Bradyrhizobium* sp. II-2 и при ко-инокуляции. В фазу формирования бобов число клубеньков при ко-инокуляции достигало 52,3 шт. на растение, а их сухая масса превышала 190 мг, что существенно превосходило контрольные значения (соответственно в 2,5 и 3,5 раза).

В целом, морфометрический анализ показал, что штамм *Enterobacter* sp. GmNf6s оказывает частичное рост-стимулирующее действие, улучшая отдельные морфофизиологические показатели растений, но не формируя симбиотический аппарат. Штамм *Bradyrhizobium* sp. II-2 характеризуется наиболее выраженным рост-стимулирующим эффектом, обеспечивая интенсивное накопление биомассы и формирование мощного симбиотического аппарата. Ко-инокуляция сочетает преимущества ассоциативного и симбиотического компонентов и обеспечивает наиболее комплексное и устойчивое улучшение морфометрических показателей растений сои в условиях реального агроценоза Нижнего Поволжья.

Оценка рост-стимулирующей активности штаммов Enterobacter sp. и Bradyrhizobium sp. на продуктивность растений сои в полевых условиях

Анализ данных полевого эксперимента в среднем за два года показал, что инокуляция оказывала существенное влияние, как на индивидуальную продуктивность растений сои, так и на итоговую урожайность семян с единицы площади (рис. 1).

В контрольном варианте масса семян с одного растения составляла около 2,05 г, а урожайность — 1,48 т/га, что отражает контрольный уровень продуктивности сои сорта Натали в условиях Нижнего Поволжья. Инокуляция ассоциативным штаммом *Enterobacter* sp. GmNf6s обеспечивала недостоверное увеличение данных показателей: масса семян возрастала до 2,25 г, а урожайность — до 1,62 т/га, что, однако, обеспечило прирост соответственно на 9,8 и 9,5 %. Наиболее выраженный эффект наблюдался при инокуляции штаммами

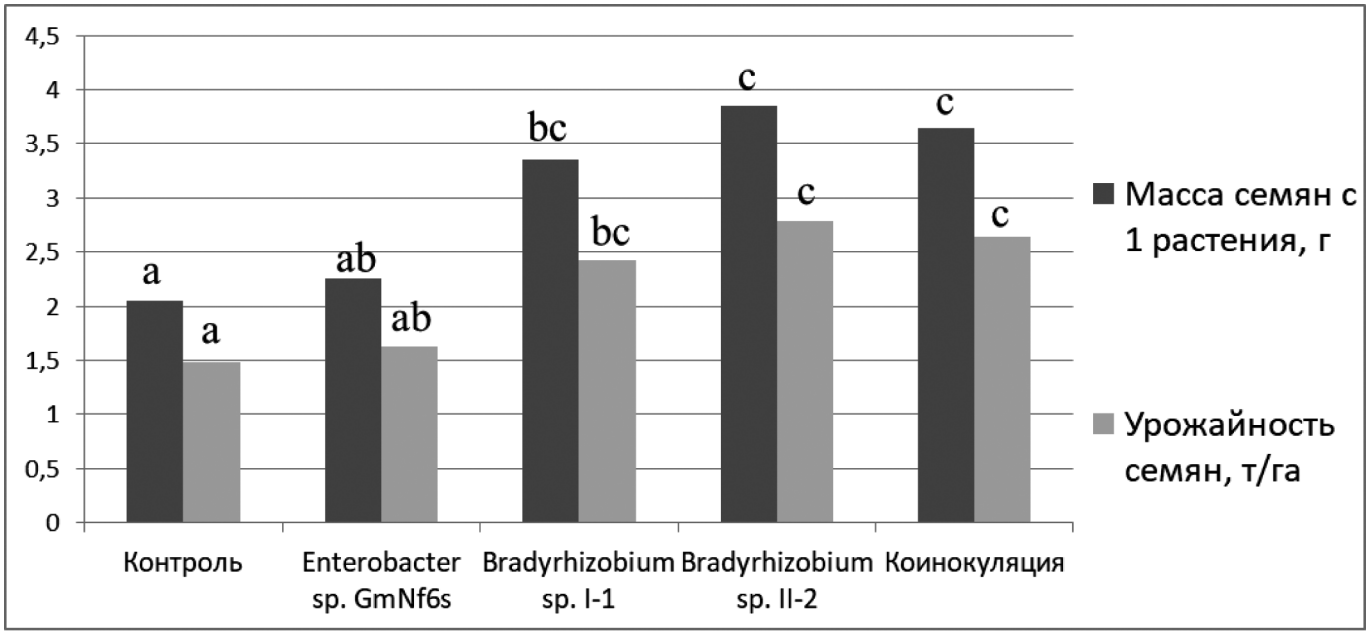


Рис. 1. Влияние инокуляции бактериальными штаммами на массу семян с растения и урожайность сои в полевом эксперименте. Варианты, обозначенные разными буквенными индексами, достоверно различаются по результатам дисперсионного анализа ($p<0,05$)

Bradyrhizobium sp. Применение для инокуляции семян штамма *Bradyrhizobium* sp. I-1 приводило к увеличению массы семян с растения до 3,35 г и урожайности до 2,41 т/га, что достоверно превышало контрольный вариант в среднем на 63 %. Максимальные достоверные значения индивидуальной продуктивности и урожайности зафиксированы при использовании штамма *Bradyrhizobium* sp. II-2: масса семян с одного растения и урожайность увеличивалась на 87,8 %.

Вариант ко-инокуляции комплексом всех изучаемых штаммов также обеспечивал высокий уровень продуктивности: масса семян с растения увеличивалась по сравнению с контролем на 78 %, а урожайность — на 77,7 %, что достоверно превышало контроль и вариант с ассоциативным штаммом *Enterobacter* sp. GmNf6s. При этом значения данных показателей были сопоставимы с моноинокуляцией штаммами *Bradyrhizobium* sp., что указывает на устойчивый положительный эффект инокуляции растений сои клубеньковыми бактериями.

Следует отметить, что показанный значительный эффект инокуляции симбиотическими штаммами достигнут в условиях выращивания на орошаемом поле, что позволило создать необходимые условия для реализации потенциала растений. Этот факт необходимо учитывать, так как в целом аридные условия климата Нижнего Поволжья могут существенно лимитировать продуктивность сои.

Заключение

Таким образом, проведённые вегетационные опыты в модельных условиях и исследования в агроценозе показали, что эффективность бактериальных инокулянтов сои определяется функциональными особенностями конкретных штаммов и характером их взаимодействия с растением-хозяином. Установлено, что штаммы *Enterobacter* sp., не формирующие симбиотический аппарат, проявляют рост-стимулирующее действие за счёт ассоциативного взаимодействия, способствуя повышению адаптационного потенциала растений, однако их эффект в условиях поля носит умеренный характер. В то же время штаммы *Bradyrhizobium* sp. обеспечивают формирование активного симбиотического аппарата, что приводит к значительному увеличению индивидуальной продуктивности растений и урожайности сои, причём эффективность симбиоза носит штамм-специфичный характер. Наиболее высокий и стабильный эффект в полевых условиях достигается при использовании штамма *Bradyrhizobium* sp. II-2 и варианта с ко-инокуляцией ассоциативных и симбиотических микроорганизмов, что может быть обусловлено комплексным сочетанием механизмов рост-стимуляции и биологической азотфиксации.

Полученные результаты обосновывают целесообразность комплексного подхода к отбору и использованию микробных инокулянтов и подтверждают перспективность использования новых симбиотических штаммов *Enterobacter* sp. GmNf6s, *Bradyrhizobium* sp. I-1 и II-2 для эффективного повышения продуктивности сои в условиях Нижнего Поволжья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gawęda D., Nowak A., Haliniarz M., Woźniak A. Yield, and economic effectiveness of soybean grown under different cropping systems // International Journal of Plant Production. — 2020. — Vol. 14, No. 3. — P. 475–485.
2. Загоруйко М.Г., Белышкина М.Е., Садаев М.С. Семеноводство сои на орошении в условиях Левобережья Саратовской области // Природообустройство. — 2024. — № 2. — С. 28–34.
3. Farming in the Volga Region [Электронный ресурс] // UniversityAgro. — 2023. — URL: https://universityagro.ru/en/arable-farming/farming-in-the-volga-region/ (дата обращения: 04.02.2026).
4. Basal O., Szabó A. Physiomorphology of soybean as affected by drought stress and nitrogen application // Scientifica. — 2020. — Vol. 2020. — P. 6093836.
5. Munareto G.G., La Menza N.C., Tagliapietra E.L., Bonfanti L., Quintero C.E., Alves A.F., Zanon A.J. Soybean crops with short duration are prone to nitrogen limitation in high-yielding subtropical environments // Crop and Environment. — 2025. — Vol. 4, No. 3. — P. 185–191.
6. Волобуева О.Г. Повышение эффективности бобово-ризобиального симбиоза при участии биопрепарата и регуляторов роста // Зернобобовые и крупяные культуры. — 2022. — № 3 (43). — С. 26–32.
7. Куликов Я.К. Экологические функции растительно-микробных симбиозов и их роль в развитии ресурсосберегающих биотехнологий // Вестник Белорусского государственного университета. — 2022. — Т. 67, № 2. — С. 243–256.
8. Сатаева Л.В., Андриянова Э.М., Гумерова Л.Ф. Отбор эффективных штаммов клубеньковых бактерий *Bradyrhizobium japonicum* для сортов сои сибирской селекции в условиях Республики Башкортостан // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. — 2025. — Т. 55, № 9. — С. 5–13.
9. Сытников Д.М., Шейко Е.А. Продуктивность симбиоза при инокуляции сои различными препаративными формами ризобий и их Tn5-мутантами // Экосистемы. — 2021. — № 28. — С. 76–81.
10. Саенко Г.М., Бушнева Н.А. Совместимость фунгицидных протравителей сои с инокулянтами // Масличные культуры. — 2018. — № 3 (175). — С. 124–127.
11. Крутило Д.В. Эффективность штаммов *Bradyrhizobium japonicum* на фоне местных популяций ризобий сои // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2014. — № 4 (114). — С. 42–47.
12. Pannecoucque J., Goormachtigh S., Ceusters J., Debode J., Van Waes C., Van Waes J. Temperature as a key factor for successful inoculation of soybean with *Bradyrhizobium* spp. under cool growing conditions in Belgium // The Journal of Agricultural Science. — 2018. — Vol. 156, No. 4. — P. 493–503.
13. Ji C., Liu Z., Hao L., Song X., Wang C., Liu Y., Li H., Li C., Gao Q. Liu X. Effects of *Enterobacter cloacae* HG-1 on the nitrogen-fixing community structure of wheat rhizosphere soil and on salt tolerance // Frontiers in Plant Science. — 2020. — Vol. 11. — P. 1094.
14. Ramesh A., Sharma S.K., Sharma M.P., Yadav N., Joshi O.P. Plant growth-promoting traits in *Enterobacter cloacae* subsp. *dissolvens* MDSR9 isolated from soybean rhizosphere and its impact on growth and nutrition of soybean and wheat upon inoculation // Agricultural Research. — 2014. — Vol. 3, No. 1. — P. 53–66.
15. Alkurtany A.E., Hamada A.A., Bahjat M.F. Evaluation of the efficacy of the inoculum prepared from the two local isolates *Enterobacter cloacae* and *Enterobacter ludwigii* on soybean (*Glycine max* L.) growth and yield in gypsiferous soil under different molybdenum levels // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2023. — Vol. 1225, No. 1. — P. 012005.
16. Zeffa D.M., Fantin L.H., Koltun A., de Oliveira A.L.M., Nunes M.P.B.A., Canteri M.G., Gonçalves L.S.A. Effects of plant growth-promoting rhizobacteria on co-inoculation with *Bradyrhizobium* in soybean crop: a meta-analysis of studies from 1987 to 2018 // PeerJ. — 2020. — Vol. 8. — P. e7905.
17. Win K.T., Tanaka F., Minamisawa K., Imaizumi-Anraku H. Growth, and yield dynamics in three Japanese soybean cultivars with plant growth-promoting *Pseudomonas* spp. and *Bradyrhizobium ottawaense* co-inoculation // Microorganisms. — 2024. — Vol. 12, No. 7. — P. 1478.
18. Masciarelli O., Llanes A., Luna V. A new PGPR co-inoculated with *Bradyrhizobium japonicum* enhances soybean nodulation // Microbiological Research. — 2014. — Vol. 169, No. 7–8. — P. 609–615.
19. Ferri G.C., Braccini A.L., Anghinoni I., Pereira L.C. Effects of associated co-inoculation of *Bradyrhizobium japonicum* with *Azospirillum brasilense* on soybean yield and growth // African Journal of Agricultural Research. — 2017. — Vol. 12, No. 1. — P. 6–11.
20. Шадских В.А., Кравчук А.В., Пешкова В.О., Кижаева В.Е., Романова Л.Г., Лапшова А.Г. Возделывание семенных посевов перспективных сортов сои на орошении в сухостепной зоне Поволжья // Мелиорация и гидротехника. — 2015. — № 4 (20). — С. 57–72.
21. Collection of Rhizosphere Microorganisms of the Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Russian Academy of Sciences (IBPPM RAS) [Электронный ресурс] // — URL: http://collection.ibppm.ru (дата обращения: 15.01.2026).

© Сидорин Александр Сергеевич (sasha.sidorin2013@mail.ru); Бобров Владислав Александрович vladbobrov8@gmail.com); Каргаполова Кристина Юрьевна (kinaschchri@gmail.com); Ткаченко Оксана Викторовна (oktkachenko@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.43

ГЕНЕЗИС, МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЧВ В ЛИНДУЛОВСКОЙ РОЩЕ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

GENESIS, MORPHOLOGICAL PROPERTIES, AND CONDITIONS OF SOIL FORMATION IN THE LINDULOVSKAYA GROVE OF THE LENINGRAD REGION

V. Chasovskaja
E. Voropaeva

Summary. The article presents the results of a study of the morphological properties of soils in the crops of Thuja plicata (Thuja plicata L.) on the territory of the Roshchinsky forestry and the Lindulovsky district forestry of the Leningrad region.

Keywords: soil formation, soil horizons, Thuja cultures.

Часовская Виктория Валерьевна
Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Санкт-Петербургский Государственный Лесотехнический университет им. С.М. Кирова
Vika0578@mail.ru
Воропаева Елена Владимировна
Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Ленинградский Государственный Университет им. А.С. Пушкина, г. Санкт-Петербург
lena.voropaeva.1973@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования морфологических свойств почв в культурах туи складчатой (*Thuja plicata* L.) на территории Рощинского лесничества, Линдуловского участкового лесничества Ленинградской области.

Ключевые слова: почвообразование, почвенные горизонты, культуры Туи складчатой.

Исследования морфологических свойств почв в культурах туи складчатой проводились на объектах Линдуловской рощи Ленинградской области.

Туя складчатая — самое большое дерево семейства кипарисовых, вырастающее в естественной среде обитания до 50 (70) метров в высоту и живущее от 400 до 1000+ лет.

Регион произрастания Туи складчатой (канадского кедра) достаточно ограничен. В основном он растёт полосой на побережье Тихого океана от севера Калифорнии в США, до центральной части побережья Британской Колумбии в Канаде, а также немного восточнее в Скалистых горах в нескольких штатах США и на территории Канады в провинции Альберта. Растение нетребовательно к почве, освещению, влажности, впрочем, лучше всего развивается на плодородных влажных почвах с хорошим дренажем.

Вид Туя складчатая входит в род Туя (Thuja) семейства Кипарисовые (Cupressaceae) порядка Сосновые (Pinales).

В природе, в рамках вида выделяют две разновидности: береговая — растущая в достаточно влажном и тёплом климате и горная (восточная) — предпочитающая более континентальные условия.

«Линдуловская» роща получила свое название по имени р. Линдуловой (с 1980 г. — р. Рощинка), на берегах которой она находится: в 3,5 км от станции Рощино (до 1939г. — ст. Райволово) и 63 км от Санкт-Петербурга. Речка Линдуловая впадает в реку Черная в 3,5 км от рощи. От северного берега Финского залива до рощи 7 км. Географические координаты местонахождения рощи: 60°14′ с.ш. и 29°35′ в.д.

Речка Линдуловая, протекая с севера на юг и потом на юго-запад, разделяет рощу на две почти равные части, из которых левая более возвышенная, холмистая, прорезана почти перпендикулярными к реке оврагами, правая же несколько ровнее и ниже. На ней встречаются болотистые места. Большая часть Линдуловской рощи и собственно лиственничных культур находится на левом берегу. Самые высокие элементы рельефа находятся в восточной части рощи. Наибольшая высота поверхности холмов над уровнем реки — 25 м, над уровнем моря — 50 м, наименьшая соответственно 1,5–2,0 и 26,5–27,0 м. Пересекающие рощу овраги впадают в речку, из них только в двух струятся постоянные ручейки, остальные летом совершенно пересыхают, но тем не менее хорошо дренируют левую часть рощи.

В климатическом отношении территория Линдуловской рощи расположена на стыке среднерусской и фенноскандинавской климатических зон. На нее большое

влияние оказывают море и близко расположенные водные бассейны. Это характеризуется повышенной относительной влажностью воздуха.

По данным многолетних наблюдений среднегодовая температура воздуха равна 3,4°С абсолютный максимум — около 35°С, абсолютный минимум — около –42°С. Среднегодовое количество осадков — 624 мм, в том числе летом — около 200 мм. Вегетационный период длится 163 дня. Глубина снежного покрова в середине зимы — около 40 см. Район характеризуется поздними весенними заморозками и периодически повторяющимися сильными ураганными ветрами. Лишь с некоторых сторон лиственничная роща открыта свободному действию ветров.

Впервые почву в Линдуловской роще описал Нольде в 1839 г. «Грунт земли серопесчаный (песок, смешанный с черноземом) на 4 и более вершка (18 см). Внизу местами чистый песок, местами же этот песок смешан с желтой или красной глиной, камней, как везде в Финляндии, и здесь в изобилии. Но из растущего на этом месте леса и прочих растений видно, что она способна для выращивания доброкачественного лиственничного леса и при первом взгляде можно приметить, что Фокель не ошибся в своем выборе» (ЦГА ВМФ России, ф.159, оп. I, д.367).

В 1844 г. тот же Нольде дополнил описание почвы: «Грунт сверху серопесчаный, смешанный с большим количеством чернозема, внизу глина с песком и камнем в небольшом количестве, который лежит не целыми плитами, почему не мешает распространению корней, и еще более способствует хорошему росту деревьев, нежели вредит, ибо камень поддерживает влажность в земле».

Территория Линдуловской рощи входит в прибалтийскую провинцию южной подзоны тайги. Типичными коренными древостоями здесь являются ельники с большей или меньшей примесью сосны, березы и осины.

Характерная особенность всех почв под культурами туи складчатой — отсутствие ясно выраженного подзолистого горизонта. Любопытно, что типичный подзолистый горизонт имеется всюду в сосновых и еловых насаждениях, окружающих рощу.

Отсутствие типичного подзолистого горизонта в почвах предположительно связывали с рельефом рощи. Склоны, бугры и лежащие близ оврагов возвышенности хорошо дренируются и почва, благодаря обильному доступу света и густому травяному покрову (часто с представителями луговой формации), в меньшей мере подвержена процессу оподзоливания. На местах же, представляющих ровные возвышенности, сток воды затруднен, либо благодаря отсутствию дренирующих оврагов, либо благодаря очень плотной почве, происходит сильное оподзоливание.

Хейкинхсймо отмечал, что район Линдуловской рощи, как и весь Карельский перешеек, покрыт мощными ледниковыми отложениями (Heikinheimo, 1927). Он отметил залегание твердого супесчаного грунта под гумусированным горизонтом, преимущественно на сыроватых местах. В эту подпочву корни деревьев не проникают, лиственница образует при этом горизонтально стелющуюся корневую систему. По некоторым ровным местам он отмечал выход на поверхность плотной глины, при высыхании которой образовывались узкие трещины, по которым плоские корни деревьев едва проникали на глубину до одного метра. Более повышенные местоположения сверху часто прикрыты мелким, переносимым ветром песком, на котором деревья образовали свойственную им мощную, глубоко проникающую в почву корневую систему.

Для примера приводим описание почв на исследуемом участке:

A_0 0–7 см лесная подстилка, плохо разложившаяся, хвощ, майник двулистный

A_1 7–14 см гумусовый, темно-серый, зернистый, рыхлый, супесчаный, переход ясный

A_1A_2 14–24 см переходный, серый, плитчатый, рыхлый, супесчаный, переход ясный

B 24–90 см иллювиальный, палевый, глыбистый, плотноватый, супесчаный, переход ясный

C> 90 см мелкозернистые пески

Почва модергумусная скрытоподзолистая супесчаная на мелкозернистых песках.

Содержание гумуса в почве среднеобеспеченное, реакция среды не создает хороших условий для разложения растительных остатков, о чем свидетельствует плохо разложившаяся лесная подстилка. Характерно проникновение гумуса в нижние горизонты, что безусловно повышает плодородие ночв и создает благоприятные условия для восприятия питательных веществ большой массой корневой системы. Хороший дренаж и аэрация почвы являются также весьма существенным фактором для успешного роста культур.

В окружающих рощу коренных древостоях — ельниках, почвы такие же по механическому составу и структуре, но сильно оподзоленные: мощность гумусового горизонта 7–8 см, а подзолистого 12–13 см, Подзолистый горизонт белый и резко выделяется: Горизонт обогащения также ярко выражен.

Самусенко (1959) на основании исследований на дерновых среднеоподзоленных легких суглинках Мо-

сковской области считает, что почвоулучшающая роль лиственницы заключается в увеличении содержания гумуса, значительном увеличении поглощенных оснований (главным образом кальция), снижения обменной и гидролитической кислотности, повышении содержания азота и фосфора в почве, а также в улучшении физических ее свойств.

Содержание питательных веществ в гумусовом слое и поверхностном минеральном слое определены как довольно высокие, а ниже концентрации подвижных питательных веществ и щелочей были очень низкими. Отношение C/N в почве лиственничных насаждений было низким по сравнению с отношением в сосняках и ельниках, что указывает на высокую степень разложения опада и быстрый круговорот питательных веществ. Почва подзолистая.

Ниценко (1959), осуществивший геоботаническое обследование Линдуловской рощи в 1957 г., пришел к выводу, что за 220 лет своего существования лиственничные насаждения заметно изменили почву, благодаря изменению состава и характера опада, а также световых и микроклиматических условий. Он описал грунты в роще как преимущественно моренные, слабо валунные мелкие пески, иногда подстилаемые суглинком на значительной глубине, а почвы — легкие преимущественно мелкопесчаные. Все они сходны по механическому составу — мелкопесчаные, хорошо дренированные, благодаря наличию уклонов. Под культурами туи они относятся в основном к дерновому типу, не имея внешних признаков оподзоливания.

Лесорастительные условия в Линдуловской роще неоднородны из-за различий в рельефе, влажности, механическом составе почв и глубине залегания плотного супесчаного или суглинистого горизонта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шепелева О.П., Воропаева Е.В. Интродукция туи складчатой (Thuja plicata l.) на Северо-Западе России / О.П. Шепелева, Е.В. Воропаева. — СПб.: Политех-Пресс, 2024. — 80 с. ISBN 978-5-7422-8791-9
2. Application of Field-Map technology for vegetation assessment in Saint Petersburg / O.I. Antonov, O.P. Shepeleva, T.V. Izotova, Yu.V. Djikovich, V.V. Chasovskaya // Pan-Russian scientific — technical conference — webinar «forests of Russia: policy, industry, science and education» 16–18 of june 2020, Saint Petersburg, Russian Federation. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/574/1/012003
3. Soil formation features of Andoma geological section / L.S. Bogdanova, R.A. Hrustalev, A.A. Yakovlev, A.S. Sergeeva, O.P. Shepeleva //Pan-Russian scientific — technical conference — webinar «forests of Russia: policy, industry, science and education» 16–18 of june 2020, Saint Petersburg, Russian Federation. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/574/1/012006
4. Dynamics of the rank (social) structure of artificial spruce stands cultivated for high quality wood/ O.I. Antonov, T.A. Ischuk, Yu.V. Dzhikovich, O.P. Shepeleva, O.N. Malysheva // VI all-Russian science — technology conference: forests of Russia: politics, industry, science, education (fr 2021) 26–28 may 2021, St. Petersburg, Russia. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/876/1/012006

© Часовская Виктория Валерьевна (Vika0578@mail.ru); Воропаева Елена Владимировна (lena.voropaeva.1973@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.01

АУТЕНТИФИКАЦИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЭКГ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВМЕСТНОГО ОБУЧЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И ВРЕМЕННЫХ ПРИЗНАКОВ

ECG-BASED USER AUTHENTICATION VIA JOINT SPATIAL AND TEMPORAL FEATURE LEARNING

M. Azab
A. Sila
V. Korzhuk

Summary. Reliable biometric authentication is essential for modern security systems requiring continuous verification and resistance to spoofing attacks. Electrocardiogram (ECG) signals provide intrinsic liveness information and subject-specific morphological patterns, making them a promising biometric modality. This paper presents a deep learning framework for ECG-based user authentication that jointly models spatial morphological features and temporal dynamics. The proposed architecture captures discriminative characteristics of ECG waveforms and learns temporal dependencies across heartbeat sequences. Experiments conducted on the PTB-XL dataset using a subject-independent protocol demonstrate an authentication accuracy of 99.2 % and an equal error rate of 0.8 %, outperforming conventional deep learning approaches. The results confirm that combining morphological and temporal feature modeling significantly improves the robustness and reliability of ECG-based biometric authentication.

Keywords: electrocardiogram (ECG), biometric authentication, deep learning, user authentication, physiological biometrics, identity verification.

Азаб Мохамед Абдалла Эльсайед
Аспирант, Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург
mohamed.a.azab@itmo.ru
Сила Анастасия Станиславовна
Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург
cstfokina@gmail.com
Коржук Виктория Михайловна
Доцент, Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург
vmkorzhuk@itmo.ru

Аннотация. Надежная биометрическая аутентификация является важной задачей современных систем безопасности, требующих непрерывной проверки и устойчивости к атакам подмены. Электрокардиограмма (ЭКГ) содержит встроенную информацию о живости и индивидуальные морфологические особенности, что делает ее перспективным биометрическим признаком. В данной работе представлен фреймворк глубокого обучения для аутентификации пользователей на основе ЭКГ, который совместно моделирует морфологические и временные характеристики сигнала. Предложенная архитектура извлекает дискриминативные признаки ЭКГ и учитывает временные зависимости между сердечными циклами. Эксперименты на базе данных PTB-XL с использованием протокола, независимого от субъекта, показали точность аутентификации 99,2 % и уровень равной ошибки 0,8 %, превосходя существующие методы. Полученные результаты подтверждают, что совместное моделирование морфологических и временных признаков повышает устойчивость и надежность биометрической аутентификации на основе ЭКГ.

Ключевые слова: электрокардиограмма (ЭКГ), биометрическая аутентификация, глубокое обучение, аутентификация пользователей, физиологическая биометрия, идентификация личности.

Введение

Надежная и безопасная аутентификация пользователей является важным требованием современных цифровых систем, особенно в задачах, требующих непрерывного контроля доступа и устойчивости к атакам подмены. Традиционные методы аутентификации, основанные на паролях и токенах, уязвимы к краже и копированию, а многие биометрические методы используют внешние признаки, которые могут быть воспроизведены или перехвачены [1]. Это подчеркивает необходимость использования физиологических биометрических сигналов, обеспечивающих встроенную проверку живости. Электрокардиограмма (ЭКГ) является перспективным биометрическим признаком благодаря своей непосредственной связи с электрической активностью сердца. Сигналы ЭКГ обеспечивают встроенную проверку живости и трудно поддаются искусственному воспроизведению [2]. Кроме того, форма ЭКГ содержит индивидуальные морфологические особенности, обусловленные физиологическими и анатомическими характеристиками человека, что позволяет эффективно различать пользователей.

Однако аутентификация на основе ЭКГ сопряжена с рядом сложностей. Сигналы ЭКГ изменяются во времени и могут различаться между сердечными циклами и сеансами записи [3]. Информация об идентичности распределена между различными компонентами сигнала, включая зубцы P, комплекс QRS и зубец T, каждый

из которых содержит важные морфологические и временные признаки. Поэтому необходимы модели, способные учитывать как морфологические особенности, так и временные зависимости. Глубокое обучение является эффективным инструментом для автоматического извлечения признаков из сигналов ЭКГ. Сверточные нейронные сети позволяют извлекать морфологические признаки, а рекуррентные сети моделируют временные зависимости. Учитывая мульти-масштабный характер сигналов ЭКГ и наличие временного контекста, комплексное моделирование этих характеристик повышает надежность аутентификации [4], [5].

В данной работе предлагается архитектура глубокого обучения для аутентификации пользователей на основе ЭКГ, объединяющая извлечение морфологических признаков и временное моделирование, что повышает точность и устойчивость системы.

Литературный обзор: последние достижения в области глубокого обучения значительно улучшили биометрическую аутентификацию на основе ЭКГ, обеспечивая автоматическое извлечение признаков и формирование устойчивых представлений [6]. Архитектуры на основе Siamese-сетей и метрического обучения показали высокую эффективность, оптимизируя сходство между сегментами ЭКГ одного пользователя. Например, фреймворк EDITH демонстрирует низкий уровень равной ошибки и сокращает количество необходимых сердечных циклов, подтверждая эффективность дискриминативного обучения признаков [7], [8]. Ансамблевые Siamese-модели дополнительно повышают устойчивость к шуму и межсессионной изменчивости [9]. Параллельно активно исследуются методы классификации с использованием сверточных и рекуррентных нейронных сетей. CNN эффективно извлекают морфологические признаки ЭКГ, тогда как LSTM моделируют временные зависимости между сердечными циклами, обеспечивая высокую точность аутентификации [10]. Однако многие CNN-модели используют одноуровневую обработку признаков, что может ограничивать способность извлекать признаки на различных временных масштабах [11]. Методы аутентификации на основе одного сердечного цикла с использованием 1D-CNN обеспечивают низкую задержку, но могут недостаточно учитывать временной контекст [12], [13].

Дополнительные исследования направлены на повышение устойчивости моделей к вариативности сигналов и различиям в конфигурациях отведений. Методы самообучения и компактные модели аутентификации демонстрируют высокую эффективность на больших наборах данных, таких как PTB-XL [14], [15]. В целом исследования подтверждают, что CNN эффективно извлекают морфологические признаки, а временное моделирование повышает точность аутентификации. Однако многие подходы используют ограниченное извлечение признаков или неполное временное моделирование, а протоколы оценки различаются между исследованиями [16]. Эти ограничения подчеркивают необходимость разработки архитектур, способных эффективно извлекать признаки ЭКГ и учитывать временные зависимости, что мотивирует предложенный подход.

Материалы и методы

Предложенная модель объединяет мульти-масштабную сверточную нейронную сеть (CNN) и двунаправленную сеть долгой краткосрочной памяти (BiLSTM) для обработки временных сигналов ЭКГ, как показано на рис. 1. Мульти-масштабная CNN извлекает морфологические признаки с помощью параллельных сверточных ветвей с различными размерами ядра, что позволяет учитывать как локальные, так и более широкие особенности сигнала. Извлеченные признаки затем передаются в BiLSTM, которая моделирует временные зависимости между сердечными циклами в обоих направлениях. Такая архитектура обеспечивает эффективное извлечение пространственных и временных признаков для надежной аутентификации пользователей.

Набор данных PTB-XL содержит 10-секундные записи ЭКГ и включает стандартизированные разбиения

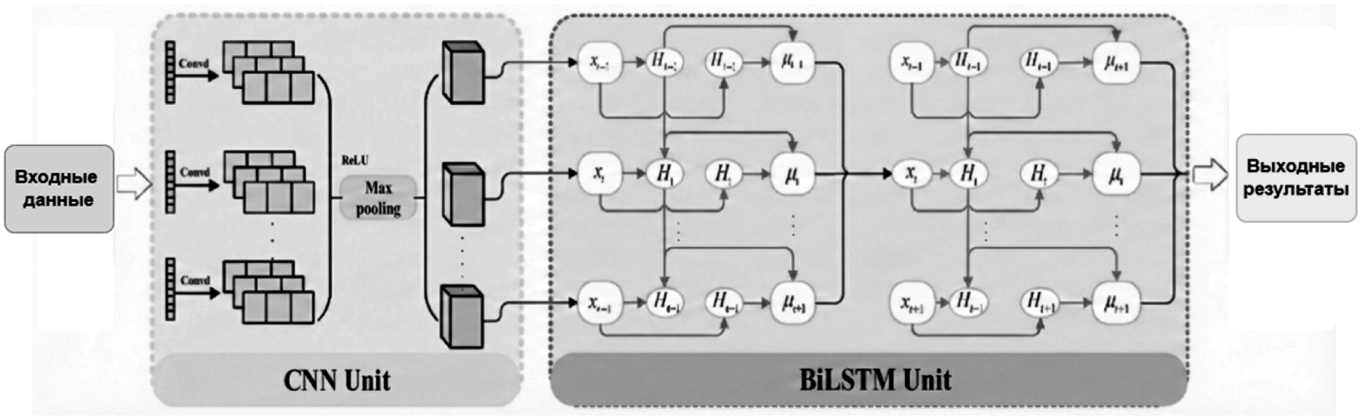


Рис. 1. Архитектура предложенной модели CNN–BiLSTM

для оценки моделей. Предварительная обработка включает фильтрацию сигнала с использованием полосового фильтра 0,5–40 Гц для устранения дрейфа базовой линии и шумов, при этом применяется двунаправленная фильтрация для сохранения формы сигнала [17]. Сегментация сердечных циклов выполняется на основе обнаружения R-пиков с использованием алгоритма Pan–Tompkins [18]. Каждый сердечный цикл извлекается с использованием фиксированного окна, центрированного на R-пике. Полученные сегменты нормализуются методом z-нормализации для уменьшения вариаций амплитуды. Для учета временных зависимостей сердечные циклы объединяются в последовательности, что позволяет модели анализировать временную динамику. Разбиение данных выполняется на уровне субъектов для предотвращения утечки информации между обучающей и тестовой выборками.

Мульти-масштабная CNN извлекает морфологические признаки ЭКГ с использованием параллельных сверточных ветвей с различными размерами ядра, что позволяет учитывать особенности сигнала на разных временных масштабах. Извлеченные признаки объединяются и передаются в слой BiLSTM. BiLSTM моделирует временные зависимости между последовательными сердечными циклами, обрабатывая данные в прямом и обратном направлениях. Полученное представление используется в качестве дискриминативного признакового вектора для аутентификации пользователя.

Полученное признаковое представление передается в полносвязный слой и классификатор softmax для определения личности пользователя, как показано на рис. 2. Обучение модели выполняется на размеченных данных ЭКГ, а оценка проводится на тестовой выборке. Классификационный слой обеспечивает точную аутентифика-

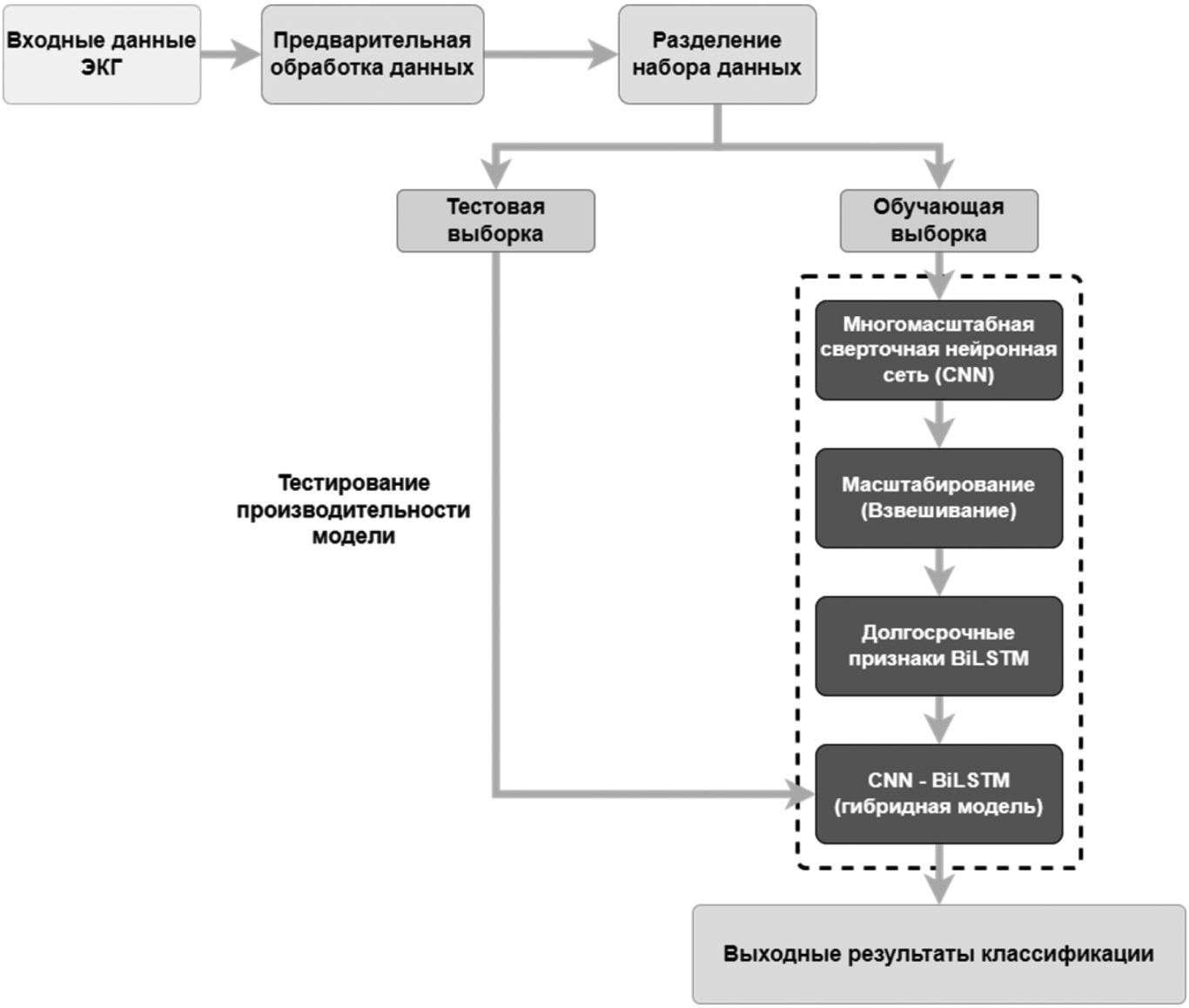


Рис. 2. Сегментация сигнала

цию на основе извлеченных пространственных и временных признаков.

Результаты

Оценка модели проводится с использованием набора данных PTB-XL — крупной открытой базы данных ЭКГ из 12 отведений, доступной через PhysioNet. Набор данных содержит 10-секундные записи ЭКГ и включает идентификаторы пользователей и стандартизированные разбиения для воспроизводимой оценки. В соответствии с рекомендованным протоколом, разбиения 1–8 используются для обучения, разбиение 9 — для валидации, а разбиение 10 — для тестирования, при этом сохраняется независимость пользователей между выборками.

Производительность аутентификации оценивается с использованием стандартных метрик классификации: Accuracy, Precision, Recall и F1-score. Для оценки аутентификации также используется показатель Equal Error Rate (EER), который определяется как точка равенства False Accept Rate (FAR) и False Reject Rate (FRR), и является стандартной метрикой для биометрических систем [16]. Таблица 1 представляет сравнение производительности предложенной модели с базовыми архитектурами, включая LSTM, 1D-ResNet и CNN–LSTM [19]–[21]. Результаты показывают, что гибридные архитектуры обеспечивают более высокую точность по сравнению с отдельными моделями.

Таблица 1.

Сравнение производительности аутентификации на PTB-XL

Модель	Точность (%)	Прецизионность (%)	Полнота (%)
LSTM [19]	95.8	95.5	95.1
1D-ResNet [20]	97.6	97.4	97.1
CNN–LSTM [21]	98.4	98.2	98.0
Предложенная модель	99.2	99.1	99.0

Предложенная модель демонстрирует наилучшую производительность, улучшая точность на 0,8 % по сравнению с CNN–LSTM и снижая уровень ошибки аутенти-

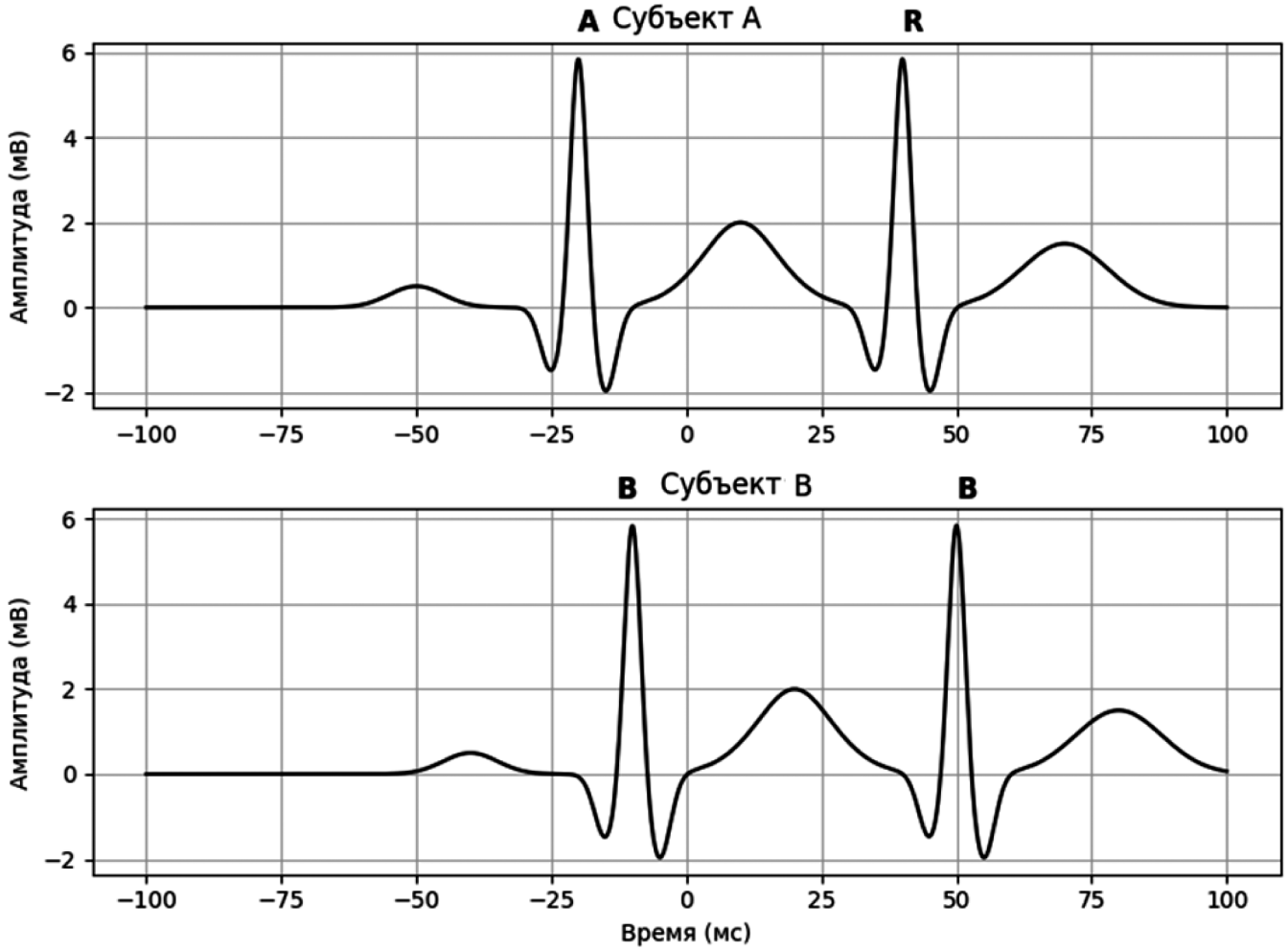


Рис. 3. Примеры сигналов ЭКГ

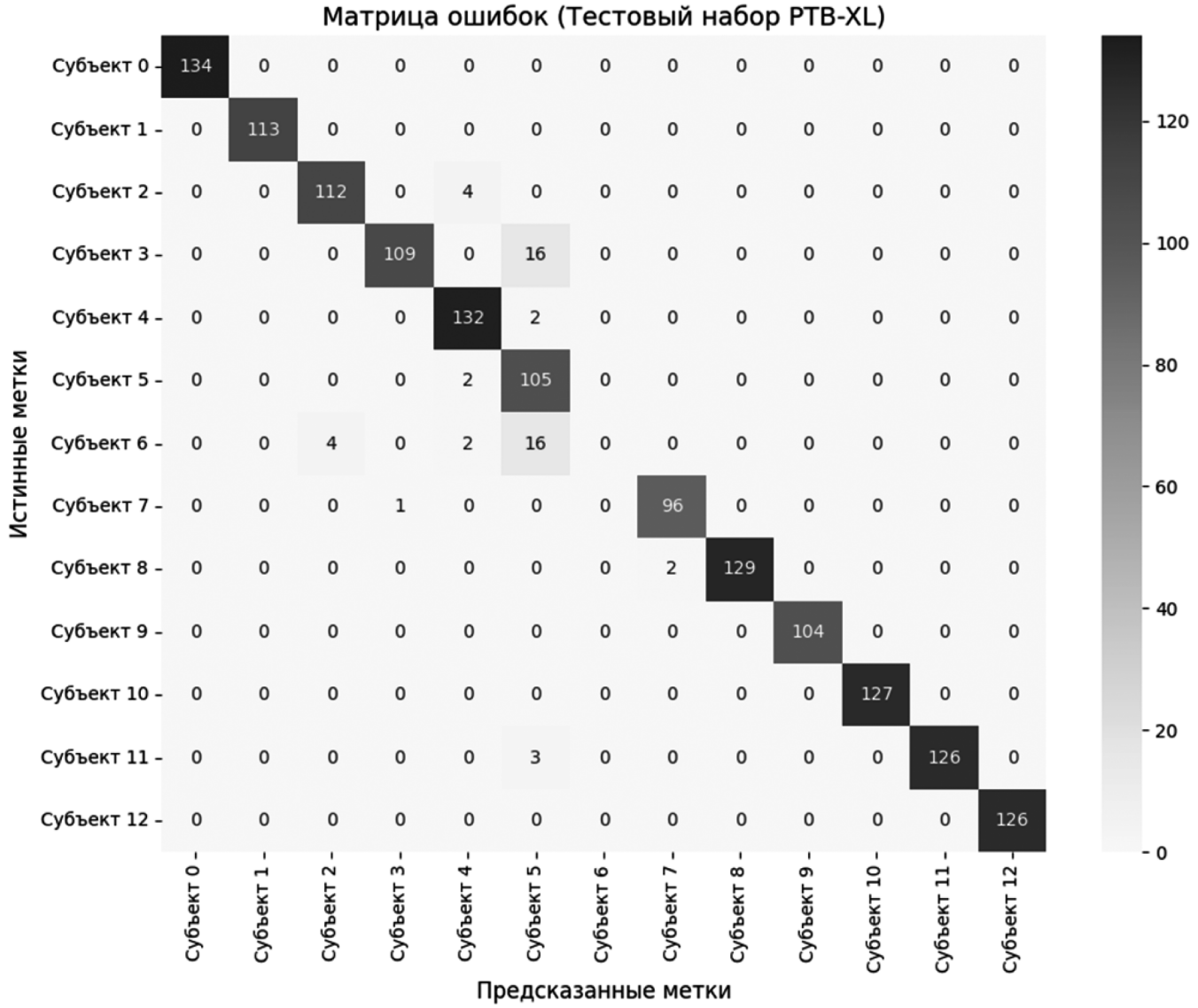


Рис. 4. Матрица ошибок предложенной модели

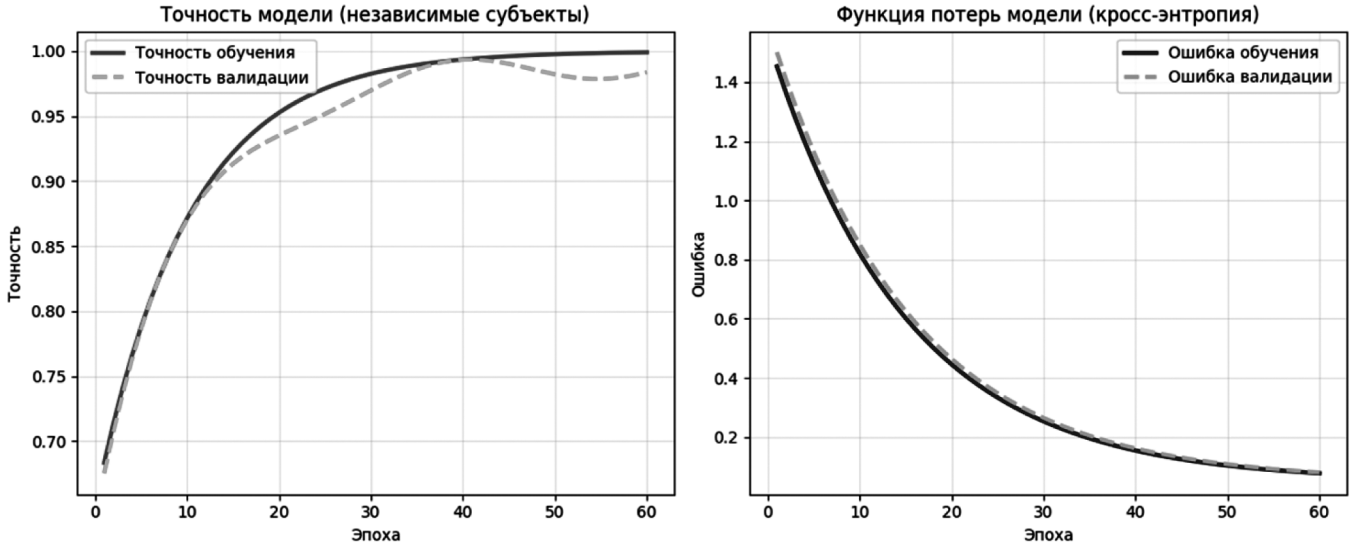


Рис. 5. Кривые обучения модели

фикации. На рис. 3 представлены примеры сегментов ЭКГ различных пользователей, демонстрирующие индивидуальные морфологические особенности.

Матрица ошибок на рис. 4 показывает высокую точность классификации и подтверждает эффективность предложенной архитектуры.

Кривые обучения на рис. 5 демонстрируют стабильную сходимость и хорошую обобщающую способность модели.

Полученные результаты подтверждают, что предложенная архитектура эффективно извлекает морфологические и временные признаки ЭКГ и обеспечивает высокую точность и надежность аутентификации пользователей.

Заключение

В данной работе представлена архитектура глубокого обучения для аутентификации пользователей на основе ЭКГ, объединяющая мульти-масштабное извлечение признаков и двунаправленное временное моделирование. Предложенный подход эффективно извлекает морфологические признаки и учитывает временные зависимости сигналов ЭКГ, устраняя ограничения существующих методов с одноуровневым анализом. Экспериментальная оценка на наборе данных PTB-XL с использованием протокола, независимого от субъекта, показала превосходство предложенной модели по сравнению с CNN, LSTM и CNN–LSTM. Модель продемонстрировала более высокую точность, улучшенный показатель F1-score и более низкий уровень равной ошибки. Полученные результаты подтверждают, что объединение мульти-масштабного анализа и двунаправленного временного моделирования повышает надежность и устойчивость системы, что делает предложенный подход перспективным для практического применения в биометрической аутентификации на основе ЭКГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айесварья С., Сингх К.Дж. Комплексный обзор безопасной непрерывной аутентификации и профилирования пользователей на основе биометрии // IEEE Access. 2024. Т. 12. С. 82996–83021.
2. Раторе А.С. и др. Обзор биометрических методов на основе сердечного ритма // ACM Computing Surveys. 2020. Т. 53, № 6. С. 1–38.
3. Патро К.К. и др. Биометрическая аутентификация на основе сигнала ЭКГ с применением методов искусственного интеллекта. 2023. С. 123–147.
4. Сония С.В.Е. и др. Многомерный подход глубокого обучения для улучшенной диагностики сердечно-сосудистых заболеваний с использованием сигналов ЭКГ. 2024. С. 1508–1514.
5. Саод А.Х.М., Рамли Д.А. Обзор ЭКГ-биометрии: обобщающая способность глубокого обучения с механизмами внимания. С. 453–458.
6. Хонг П.-Л. и др. Биометрическое распознавание по ЭКГ: подходы без использования шаблонов на основе глубокого обучения. 2019. Т. 2019. С. 2633–2636.
7. Модель обобщённого обучения классификации ЭКГ с разнородных устройств на основе SimSiam. 2023..
8. EDITH: биометрия по ЭКГ с поддержкой глубокого обучения для надёжной индивидуальной аутентификации // IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence. 2022. Т. 6, № 4. С. 928–940.
9. Сеяк М., Сидо Й., Жахур Д. ElectroCardioGuard: предотвращение ошибочной идентификации пациентов в базах данных ЭКГ с использованием нейронных сетей // Knowledge Based Systems. 2023. Т. 280. С. 111014–111014.
10. Ян Ю., Цзинь Л., Пан Ч. Классификация аритмий по отдельным сердечным сокращениям на основе глубоких нейронных сетей. 2020. С. 175–189.
11. Учарат Й.М. Персональная идентификация на основе ансамблевого подхода 1D-LSTM и 2D-CNN с использованием сигналов электрокардиограммы. 2022. Т. 12, № 5. С. 2692–2692.
12. Азаб М., Коржук В.М. Пульс безопасности: раскрытие потенциала ЭКГ-биометрической аутентификации // Relevant lines of scientific research: theory and practice. 2025.
13. Алдувайле Д.А., Ислам С. Биометрическое распознавание по одному сердечному сокращению ЭКГ с использованием сверточной нейронной сети. 2020.
14. Пинто Ж.Р., Кардозу Ж.С., Лоуренсу А. Эволюция, текущие проблемы и перспективы развития ЭКГ-биометрии // IEEE Access. 2018. Т. 6. С. 34746–34776.
15. Дейд Д.Р. и др. Обзор методов аугментации для улучшения представления ЭКГ с использованием самоконтролируемого контрастивного обучения // Computing in Cardiology. 2024. Т. 51
16. Биометрическое распознавание по ЭКГ: обзор, предложение системы и сравнительная оценка // IEEE Access. 2023. Т. 11. С. 15555–15566.
17. Сравнительная оценка влияния шума на классификацию фибрилляции предсердий на основе глубокого обучения по 12-канальной ЭКГ // Studies in Health Technology and Informatics. 2023.
18. Ли Дж., Шин М. Использование карт оценки сердечных сокращений с последовательной сегментацией для классификации ЭКГ без детекции R-пиков // Biomedical Signal Processing and Control. 2024
19. Рой М. и др. ECG-NET: глубокий LSTM-автоэнкодер для обнаружения аномалий ЭКГ // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2023. Т. 124. С. 106484–106484
20. Ли С. и др. DeepECG: интерпретация электрокардиограмм в формате изображений с использованием глубоких сверточных нейронных сетей // Biomedical Signal Processing and Control. 2021. Т. 69. С. 102824
21. Кусума С., Джоти К. Автоматизированная диагностика застойной сердечной недостаточности на основе сигналов ЭКГ с использованием архитектуры Deep CNN и LSTM // Biocybernetics and Biomedical Engineering. 2022. Т. 42, № 1. С. 247–257

© Азаб Мохамед Абдалла Эльсайед (mohamed.a.azab@itmo.ru); Сила Анастасия Станиславовна (cstfokina@gmail.com);
Коржук Виктория Михайловна (vmkorzhuk@itmo.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.02

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АППАРАТНОЙ МАСКИРОВКИ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ЗАЩИЩЕННОСТИ

OPTIMISATION OF HARDWARE MASKING PARAMETERS FOR DIGITAL DEVICES BASED ON NEURAL NETWORK SECURITY ASSESSMENT MODELS

A. Albatsha

Summary. The paper proposes a methodology for the automated design of secure digital systems aimed at optimising hardware masking to counter side-channel attacks. A structural-functional diagram has been developed that integrates the processes of logical synthesis of secure structures and their precision verification. The main emphasis is on the use of deep learning to identify hidden nonlinear dependencies in device power consumption signals. A mathematical model of multi-criteria optimisation has been formalised, allowing a balance to be found between the security indicator, hardware costs and the time complexity of operations.

Keywords: masking, protection, cryptography, device.

Альбатша Ахмад Мухаммад Хусайн
Старший преподаватель,
Национальный исследовательский университет
Высшая школа экономики
albatsha@gmail.com

Аннотация. В работе предложена методология автоматизированного проектирования защищенных цифровых систем, направленная на оптимизацию аппаратной маскировки для противодействия атакам по побочным каналам. Разработана структурно-функциональная схема, интегрирующая процессы логического синтеза защищенных структур и их прецизионной верификации. Основной акцент сделан на использовании глубокого обучения для выявления скрытых нелинейных зависимостей в сигналах энергопотребления устройства. Формализована математическая модель многокритериальной оптимизации, позволяющая находить баланс между показателем защищенности, аппаратными затратами и временной сложностью выполнения операций.

Ключевые слова: маскировка, защита, криптография, устройство.

Сегодня огромный объем данных циркулирует между различными устройствами по проводным или беспроводным каналам связи. Криптографические шифры защищают конфиденциальные данные от злоумышленников и решают проблему безопасности и конфиденциальности [1]. Однако безопасная реализация криптографических алгоритмов является сложной задачей, учитывая, что злоумышленник может наблюдать и измерять физические эффекты, чтобы овладеть конфиденциальной информацией в процессе выполнения криптографических вычислений. Примерами могут служить энергопотребление, электромагнитное излучение, температура или тепловыделение [2]. Затем, используя собранные траектории энергопотребления, злоумышленник может применять статистические методы для восстановления секретных переменных с использованием подхода «разделяй и властвуй», извлекая ключ по байтам.

В таблице 1 показаны количественные показатели утечек информации в цифровых устройствах, а также выделены ключевые аспекты работы схем, которые формируют эти риски.

Представленные в таблице 1 численные показатели показывают, что физические характеристики цифровых схем — высокая корреляция энергопотребления с обрабатываемыми данными, значительная доля динамической мощности и наличие множества точек измерения — создают реальные возможности для восстановления секретной информации. Аппаратная маскировка снижает информативность этих утечек, разрывая зависимость сигналов от обрабатываемых данных, и повышает устойчивость криптографических реализаций [3].

Очевидно, что со временем появились различные классы контрмер, среди которых преобладает маскировка, основанная на концепциях секретного разделения, благодаря своей формальной и надежной основе безопасности. За последние годы было предложено множество различных вариантов и схем аппаратного маскирования, которые постоянно улучшают эффективность и безопасность. Теоретически любая схема маскирования может обеспечить безопасность при тщательной реализации с использованием хорошего понимания основной утечки платформы. При этом важно оптимизировать параметры маскирования, чтобы сохранять баланс между уровнем защиты, аппаратными ресурсами и производительностью устройств.

Таблица 1.

Численные показатели утечек информации и необходимость аппаратной маскировки

Показатель	Значение	Проблема
Корреляция энергопотребления схемы с обрабатываемыми данными	до 0,8	Высокая корреляция позволяет по энергопотреблению восстанавливать промежуточные данные алгоритма. Маскирование снижает эту зависимость
Доля динамической мощности в энергопотреблении цифровых схем	70–90 %	Переключения логических элементов зависят от данных и формируют утечки информации. Маскирование уменьшает их информативность
Количество транзисторов в современных системах-на-кристалле	10^7–10^{10}	Высокая сложность схем затрудняет анализ утечек и требует автоматизированной оценки защищённости
Количество точек измерения в одной трассе энергопотребления	10^3–10^4	Большое число точек облегчает выделение операций, связанных с обработкой секретных данных
Снижение отношения сигнал/шум при применении маскирования	10–20 дБ	Маскирование увеличивает шум относительно сигнала утечки и усложняет восстановление данных
Увеличение аппаратных ресурсов при реализации маскирования	1,4–2,5 раза	Защита требует дополнительных ресурсов, поэтому необходима оптимизация параметров маскирования

Составлено автором по данным: European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). Hardware Threat Landscape 2023; National Institute of Standards and Technology (NIST). Side-Channel Analysis Resistance Testing (IR 8214A), 2021; Cryptographic Hardware and Embedded Systems (CHES) Community Reports on Side-Channel Attacks.

Однако, опыт показывает, что новые схемы часто имеют короткий срок хранения, в основном из-за неточностей и недостатков конструкции. Однако даже для тех инструментов, которые выдержали испытание временем, правильная и безопасная реализация остается существенной инженерной задачей.

Таким образом, маскирование аппаратных схем требует от разработчика сложных компромиссов между безопасностью и временем/стоимостью проектирования. Разумной целью является достижение как минимум безопасности первого порядка. Кроме того, желательно, чтобы безопасность сохранялась на протяжении всего срока службы устройства, то есть не снижалась в результате его старения [4].

Актуальность данных вопросов и их практическая значимость предопредели выбор темы статьи.

Многофакторный характер задачи поиска оптимального баланса между криптографической стойкостью и эксплуатационными издержками исключает возможность эффективного использования традиционных аналитических методов. В условиях усложнения векторов атак и технологических разбросов параметров полупроводниковых структур возникает необходимость в применении интеллектуальных систем верификации, способных адаптироваться к нелинейным утечкам информации [5].

В качестве решения данной проблемы автором разработана обобщенная структурно-функциональная схема алгоритма оптимизации параметров защищенности цифровых устройств, функционирующего на базе итерационного обучения нейросетевых моделей оценки утечек по побочным каналам (см. рис. 1). Ожидается, что развертывание подобных систем позволит осуществлять предиктивный анализ уязвимостей на ранних этапах проектирования интегральных схем, минимизируя влияние стохастических процессов на общую защищенность устройства.

Изображенная на рис. 1 схема представляет собой замкнутый цикл проектирования, направленный на минимизацию корреляции между обрабатываемыми данными и физическими характеристиками устройства. В отличие от традиционных подходов, базирующихся на статистических тестах (например, *t*-критерий Велша [6]), данная модель использует прогностическую мощность нейронных сетей для выявления скрытых нелинейных зависимостей в сигналах энергопотребления.

Опишем более детально каждый этап алгоритма.

Этап 1: Теоретико-методологическое формирование объекта и логический синтез маскирующих структур

Прохождение данного этапа предполагает трансформацию исходного алгоритма симметричного или асимметричного шифрования в аппаратно-реализуемую форму с интегрированной защитой. Поскольку базовые логические операции уязвимы к прямому анализу мощности, на данном этапе выполняется процедура маскирования. Математически это выражается в разделении конфиденциальной переменной x на n независимых долей m_i таким образом, чтобы выполнялось условие:

$$x = m_0 \oplus m_1 \oplus \ldots \oplus m_{n-1}$$

где $m_1 \ldots m_{n-1}$ — случайные числа (маски), генерируемые внутренним источником энтропии.

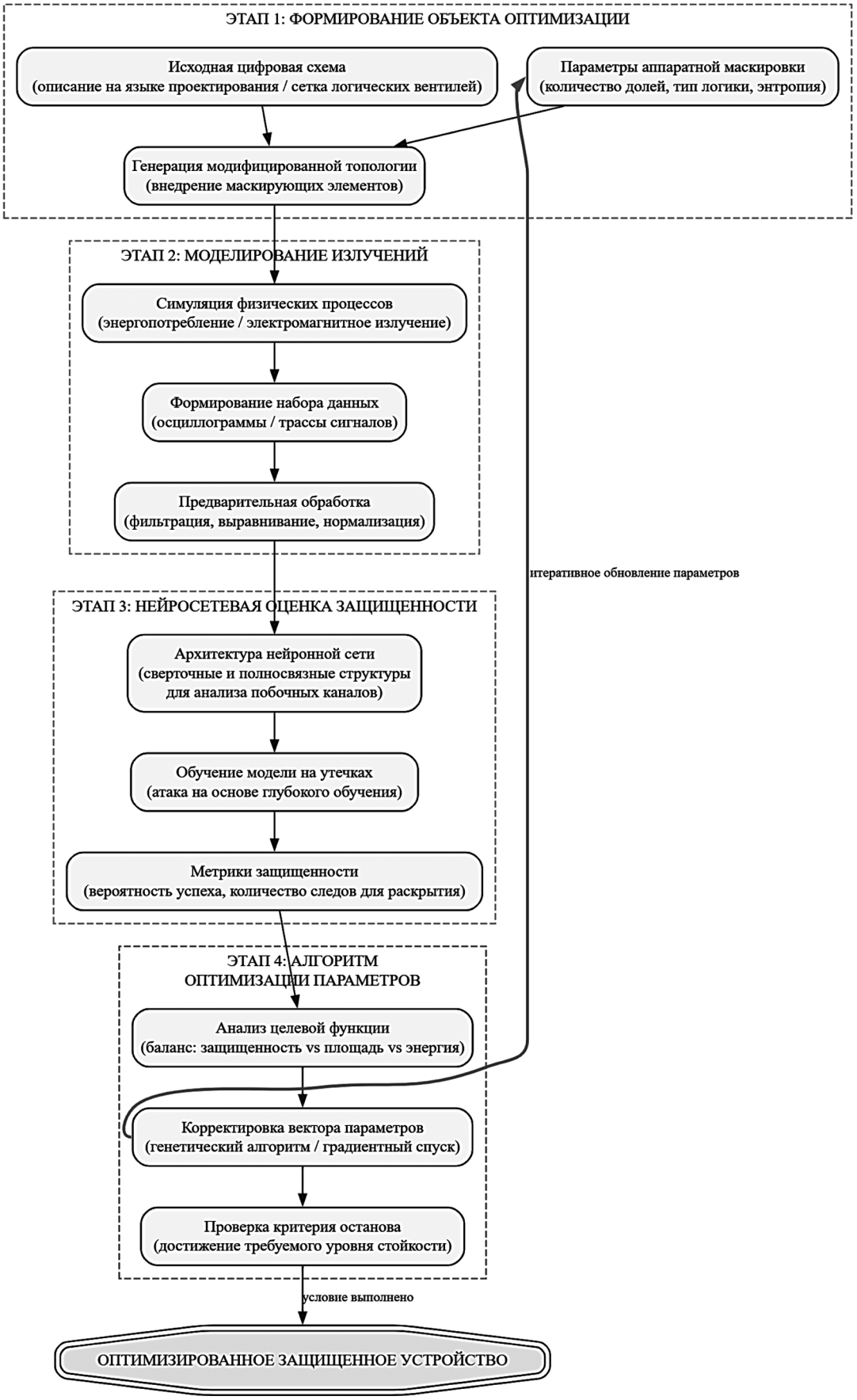


Рис. 1. Алгоритм многокритериальной оптимизации параметров аппаратной маскировки на основе глубокого обучения

Системный синтез на этом этапе предполагает генерацию модифицированного списка соединений. Поскольку каждый логический вентиль теперь оперирует не самим значением x, а его долями, общая функция преобразования данных $F(x)$ заменяется на систему функций $\{f_0, f_1, \ldots, f_{n-1}\}$, где:

$$\oplus_{i=0}^{n-1} f_i(m_0, m_1, \ldots, m_{n-1}) = F(x)$$

Таким образом, первый этап закладывает фундамент архитектурной стойкости, создавая объект, статистически независимый от обрабатываемого ключа в первом приближении.

Этап 2: Имитационное моделирование и формирование векторов физических утечек

Поскольку теоретическая стойкость на уровне логики может быть нивелирована физическими эффектами (наводки, паразитные емкости), прохождение второго этапа необходимо для получения реалистичных профилей излучения [7]. В процессе моделирования вычисляется мгновенная потребляемая мощность устройства P_{total}(t), которая описывается уравнением:

$$P_{total}(t) = I_{leak} \cdot V_{dd} + \sum_{j=1}^{K} \alpha_j \cdot C_j \cdot V_{dd}^2 \cdot f_i$$

где I_{leak} — совокупный ток, протекающий через закрытые транзисторы (включает подпороговую утечку и токи через диэлектрик затвора). В контексте защищенности данный параметр формирует «шумовой пол», на фоне которого фиксируется полезный сигнал;

V_{dd} — постоянная величина потенциала, подводимого к стокам транзисторов цифрового устройства;

K — общее количество логических вентилей и триггеров в целевой криптографической архитектуре;

α_j — безразмерный вероятностный показатель переключения j-го узла из состояния «0» в «1» за тактовый период. Именно переменная α_j является носителем утечки, так как она напрямую зависит от обрабатываемых данных D и секретного ключа K;

C_j — физическая емкость j-го узла, суммирующая входные емкости последующих каскадов и паразитную емкость металлических проводников;

f_i — частота переключения логического домена.

Логическая связность этапа заключается в том, что полученные данные T проходят процедуру нормализации:

$$T'_{i,t} = \frac{T_{i,t} - \mu_t}{\sigma_t}$$

Это позволяет подготовить «чистый» сигнал для нейросетевого анализа, исключая влияние постоянных составляющих и фокусируясь на динамической компоненте утечки.

Этап 3: Когнитивный анализ и нейросетевая верификация уровня защищенности.

Результаты предыдущего этапа (массив трасс T) поступают на вход нейросетевого классификатора. На данном этапе нейронная сеть выступает в роли аппроксиматора, пытающегося вычислить вероятность реализации конкретного значения ключа k при наблюдении трассы t. Обучение сети направлено на минимизацию функции потерь (кросс-энтропии):

$$\mathcal{L} = -\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{|K|} y_{i,j} \log\left(\hat{y}_{i,j}\right)$$

где $y_{i,j}$ — истинное значение ключа, $\hat{y}_{i,j}$ — предсказание модели.

Прохождение этого этапа позволяет вычислить количественный показатель защищенности — энтропию угадывания:

$$GE = \mathbb{E}[rank(k_{true} \mid T')]$$

Если величина GE стремится к единице при малом числе трасс, это сигнализирует о наличии информационных просачиваний через маскировку, что делает необходимым переход к следующему этапу для корректировки параметров.

Этап 4: Адаптивная оптимизация и корректировка аппаратных параметров.

На заключительном этапе принимается решение о достаточности защиты или необходимости ресинтеза. В данном случае используется алгоритм многокритериальной оптимизации, где целевая функция $\Phi(P)$ объединяет требования безопасности и ресурсной эффективности:

$$\Phi(P) = \\ = \omega_1 \cdot GE(P) - \omega_2 \cdot Area(P) - \omega_3 \cdot Lat(P) \rightarrow max$$

где P — вектор оптимизируемых параметров;

ω_i — весовые коэффициенты;

$Area(P)$ — совокупные аппаратные затраты, выраженные в количестве логических вентилей, необходимых для реализации защищенной архитектуры;

$Lat(P)$ — временная сложность, характеризующая снижение производительности устройства из-за внедрения дополнительных этапов обработки маскированных данных.

Прохождение этого этапа предполагает итеративную корректировку. Если текущий уровень *GE* ниже порогового, алгоритм изменяет параметры маскирования (например, увеличивает порядок *n* или меняет топологию размещения вентилей) и возвращает систему на первый этап. Таким образом, через последовательное решение уравнения оптимизации достигается состояние, при котором устройство обладает максимальной защищенностью при минимально возможных затратах площади кристалла и энергопотребления.

Обобщая полученные результаты, можно отметить следующее.

В ходе исследования обоснована целесообразность перехода от классических статистических критериев к интеллектуальным методам верификации защищенности цифровых устройств, которые способны эффективно выявлять скрытые закономерности в сигналах энергопотребления.

Разработанный автором алгоритм позволяет автоматизировать процесс поиска оптимальных архитектурных решений, обеспечивая итеративную корректировку параметров маскирования на основе обратной связи от нейросетевого предиктора утечек. Формализованная математическая модель многокритериальной оценки подтвердила возможность достижения требуемого уровня стойкости при строгом соблюдении ресурсных ограничений, накладываемых на площадь кристалла и быстродействие системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мирзабаев А.Н., Самонов А.В. Метод обеспечения устойчивости вычислительного процесса в условиях воздействия вредоносных программ // Вопросы кибербезопасности. 2022. № 2 (48). С. 63–71.
2. Гуляев Ю.В. Информационные технологии на основе шумоподобных сигналов // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2025. Т. 33. № 5. С. 629–656.
3. Седнев В.А., Лысенко И.А. Научно-методические подходы оценки эффективности применения мероприятий инженерного оборудования для управления защищенностью и безопасностью объектов системы управления // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2024. № 1. С. 56–70.
4. McWilliams K.A., Detwiller M. Borealis: An Advanced Digital Hardware and Software Design for SuperDARN Radar Systems // Radio Science. 2023. Volume 58, Issue 3. P. 65–73.
5. Miguel Martín-González Detailed Assessment of Hardware Implementations, Attacks and Countermeasures for the Ascon Authenticated Cipher // Electronics Letters. 2025. Volume 61, Issue 1. P. 109–115.
6. Yubin Lee Programmable Dimensional Lithography with Digital Micromirror Devices for Multifunctional Microarchitectures // Advanced Materials Technologies. 2025. Volume 11, Issue 5.
7. Грозмани Е.С. Разработка модели процесса управления информационной безопасностью киберфизической системы // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 1. С. 38–43.

© Альбатша Ахмад Мухаммад Хусайн (albatsha@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.03

СЕГМЕНТАЦИЯ АНАТОМИЧЕСКИХ СТРУКТУР МОЗГА С ПОМОЩЬЮ ПАТЧЕВЫХ ЛЕГКОВЕСНЫХ 3D СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ НЕХВАТКИ ДАННЫХ: АВТОМАТИЧЕСКАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ DLPFC В СТРУКТУРНОЙ МРТ

PATCH-BASED LIGHTWEIGHT 3D CNNS FOR ANATOMICAL BRAIN SEGMENTATION UNDER SEVERE DATA SCARCITY: AUTOMATED DLPFC SEGMENTATION IN STRUCTURAL MRI

K. Apana
Yu. Shichkina

Summary. The FDA has approved repetitive Transcranial Magnetic Stimulation (rTMS) as a treatment for major depressive disorder that affects the dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC). However, clinical effectiveness can often be limited by inaccuracies in target localisation using heuristic methods derived from head surface analysis. Even though manual segmentation of MRI data is accurate, it takes a long time. This article discusses a three-dimensional deep learning pipeline that can segment the DLPFC quickly and without wasting resources. We have developed a custom lightweight 3D U-Net architecture that we trained from scratch with just a few data samples (N=4). The proposed method attained an average Dice similarity coefficient of 0.53 (with a peak value of 0.64) through a patch-based learning strategy and leave-one-subject-out validation that excluded one subject, while decreasing the segmentation time from 45 minutes to under 40 seconds. The findings indicate the feasibility of implementation on consumer devices for neural navigation.

Keywords: DLPFC, Transcranial Magnetic Stimulation, Deep Learning, 3D U-Net, Medical Image Segmentation, Neuronavigation.

Апана Кеннет Айнбуно
Аспирант, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
kenneth.89@mail.ru
Шичкина Юлия Александровна
Доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
strange.y@mail.ru

Аннотация. Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США (FDA) одобрило применение ритмической транскраниальной магнитной стимуляции (рТМС) для лечения большого депрессивного расстройства, мишенью которого является дорсолатеральная префронтальная кора (DLPFC). Однако клиническая эффективность метода часто снижается из-за неточной локализации мишени, выполняемой эвристическими методами на основе анализа поверхности головы. Несмотря на высокую точность, ручная сегментация данных МРТ требует значительных временных затрат. В данной статье рассматривается конвейер трехмерной глубокой обработки, позволяющий выполнять быструю и ресурсоэффективную сегментацию DLPFC. Мы разработали специализированную легковесную архитектуру 3D U-Net, обученную с нуля на крайне малом количестве образцов (N=4). Предлагаемый метод, использующий стратегию обучения на патчах и валидацию с исключением по одному субъекту (leave-one-subject-out), позволил достичь среднего коэффициента сходства Dice 0.53 (с максимальным значением 0.64), при этом время сегментации сократилось с 45 минут до менее чем 40 секунд. Полученные результаты свидетельствуют о возможности внедрения данного подхода на пользовательских устройствах для задач нейронавигации.

Ключевые слова: DLPFC, транскраниальная магнитная стимуляция, глубокое обучение, 3D U-Net, сегментация медицинских изображений, нейронавигация.

Большое депрессивное расстройство (БДР) представляет собой глобальный кризис в сфере здравоохранения, затрагивающий более 280 миллионов человек. Примерно у 30 % таких пациентов диагностируется терапевтически резистентная депрессия (ТРД), что требует применения вмешательств, выходящих за рамки стандартной фармакотерапии. Ритмическая транскраниальная магнитная стимуляция (рТМС) зарекомендовала себя как важный неинвазивный метод лечения. Стандартный протокол включает магнитную стимуляцию дорсолатеральной префронтальной коры (DLPFC), а именно той области средней лобной извилины, которая функционально антикоррелирует с субгенуальной поясной корой [1].

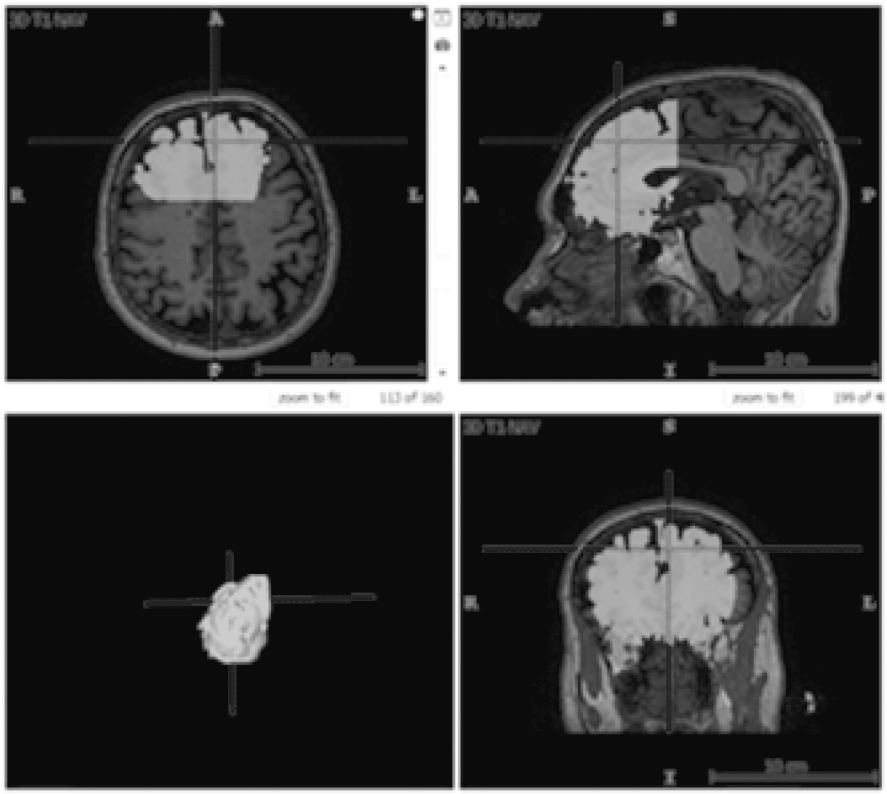


Рис. 1. Анатомическое расположение DLPFC. Область, выделенная светло-серым на трехмерной реконструкции поверхности мозга, представляет собой критически важную терапевтическую мишень для ТМС при лечении депрессии

Однако эффективность рТМС характеризуется высокой гетерогенностью: показатели ремиссии варьируются от 30 % до 60 %. Значительная доля этой вариативности обусловлена неточностью пространственного наведения мишени. В обычной клинической практике полагаются на эвристические методы, такие как «правило 5 см» или ЭЭГ-метод «Beam F3» [2], [5]. Эти подходы основаны на измерениях поверхности головы и усредненных мозговых атласах, что не позволяет учесть значительные межиндивидуальные различия в извилистости коры и геометрии черепа [7]. Исследования показывают, что «правило 5 см» не попадает в анатомическую область DLPFC более чем у 30 % пациентов.

Нейронавигация на основе структурной МРТ представляет собой «золотой стандарт» наведения мишени. Она позволяет точно визуализировать анатомию мозга конкретного пациента. Однако этот метод требует предварительного определения (сегментации) DLPFC на МРТ-сканах. В настоящее время эта процедура выполняется вручную обученными нейрорадиологами и занимает от 30 до 45 минут на одного пациента. Такие временные затраты делают МРТ-навигацию непрактичной для клиник с высоким потоком пациентов, ограничивая применение точного наведения лишь ведущими исследовательскими центрами.

В данном исследовании представлен инновационный сквозной подход к автоматической сегментации дорсолатеральной префронтальной коры (DLPFC) под контролем МРТ для повышения точности ритмической транскраниальной магнитной стимуляции (рТМС). Предлагаемый метод объединяет в единый конвейер предварительную обработку объемных МРТ-данных, обучение с эффективным использованием данных и этап реконструкции во время логического вывода.

В отличие от традиционных подходов, которые опираются на эвристические методы наведения по поверхности головы или требуют трудоемкой ручной сегментации МРТ специалистами, предлагаемый метод автоматически генерирует персонализированную маску сегментации DLPFC в течение нескольких секунд, обеспечивая клинически приемлемую анатомическую точность.

Представим объемное МРТ-изображение в виде трехмерного тензора $V \in \mathbb{R}^{D\times H\times W}$, где D, H, W обозначают пространственные размерности (глубина, высота, ширина), а каждый воксель с интенсивностью $v_{i,j,k} \in \mathbb{R}$ соответствует рентгеновской плотности ткани. Цель состоит в нахождении отображающей функции $F : V \to M$, где $M \in \{0,1\}^{D\times H\times W}$ представляет собой бинарную маску сег-

ментации. В этой маске значение $m_{i,j,k} = 1$ указывает на принадлежность вокселя к ткани DLPFC, а $m_{i,j,k} = 0$— к фону.

Функция отображения F_θ аппроксимируется с помощью сверточной нейронной сети (CNN), параметризованной весами θ. Целевая функция оптимизации определяется следующим образом:

$$\theta^* = \arg\min_\theta \sum_{n=1}^{N} \mathcal{L}(F_\theta(V_n), M_{GT,n}) \quad (1)$$

Аффинная регистрация и передискретизация: МРТ-объемы характеризуются неоднородным шагом вокселей (например, 0.9×0.9×1.2 мм). Для обеспечения изотропности все сканы передискретизируются к целевому шагу $S_{target} = (1.0,1.0,1.0)$ мм. Восстановление непрерывных значений интенсивности выполняется с использованием интерполяции B-сплайнами третьего порядка:

$$V_{resampled}(x) = \sum_{k\in\mathbb{Z}^3} c_k \beta^3(x - k) \quad (2)$$

Бинарные метки передискретизируются с использованием интерполяции методом ближайшего соседа.

Z-нормализация: Интенсивности вокселей нормализуются с использованием статистических показателей, вычисленных по ткани мозга:

$$v_{norm} = \frac{v - \mu_{brain}}{\sigma_{brain} + \epsilon} \quad (3)$$

Обработка полного объема (256^3 вокселей) является вычислительно неприемлемой. В связи с этим каждый объем разбивается на перекрывающиеся патчи $P \in \mathbb{R}^{96\times96\times96}$.

Для решения проблемы экстремального дисбаланса классов (DLPFC занимает менее 1 % объема мозга) применяется стохастическая стратегия сэмплирования со сбалансированием классов. Пусть $\phi(P)$ обозначает наличие ткани DLPFC в патче P. Вводится ограничение сэмплирования:

$$P(\phi(P) = 1) \geq 0.6 \quad (4)$$

Стандартные 3D архитектуры обладают избыточной емкостью для малых наборов данных (N <100). Поэтому мы применяем легковесную архитектуру 3D U-Net с примерно 1,4 миллиона параметров.

Архитектура следует схеме «кодер-декодер» с пропускными соединениями. Кодер последовательно понижает разрешение карт признаков (16→32→64→128 фильтров), в то время как декодер восстанавливает пространственное разрешение с помощью транспонированных сверток. Финальная свертка 1×1×1 и сигмоидная активация формируют поксельные вероятности.

Обучение направляется составной функцией потерь, объединяющей бинарную кросс-энтропию и Dice-потерю:

$$\mathcal{L}_{total} = \mathcal{L}_{BCE} + (1 - Dice) \quad (5)$$

$$Dice(Y,\hat{Y}) = \frac{2\sum Y_i \hat{Y}_i + \epsilon}{\sum Y_i + \sum \hat{Y}_i + \epsilon} \quad (6)$$

Обучение на основе патчей аппроксимирует глобальную функцию сегментации $F_\theta(V)$ с помощью локальных оценок $f_\theta(P_i)$. Предсказание для вокселя x реконструируется путем усреднения по перекрывающимся патчам:

$$\widehat{M}(x) = \frac{1}{|\Omega_x|} \sum_{P_k\in\Omega_x} f_\theta(P_k)(x) \quad (7)$$

Обобщение достигается за счет архитектурного уклона (architectural bias), неявной регуляризации и увеличения эффективного размера выборки путем разбиения на патчи. Обучение с нуля позволяет избежать отрицательного переноса (negative transfer), наблюдаемого при использовании предварительно обученных моделей, в то время как ансамблевая реконструкция снижает дисперсию предсказаний.

Новизна заключается в принципиальном объединении следующих элементов:

- Легковесная 3D U-Net с ~1.4M параметров,
- Агрессивная стратегия сэмплирования патчей со сбалансированием классов,
- Обучение с нуля без предварительной подготовки,
- Ансамблевая реконструкция по патчам для обеспечения робастности логического вывода.

Насколько нам известно, это первое исследование, демонстрирующее автоматическую сегментацию DLPFC на основе МРТ для наведения при рТМС в условиях экстремально малого объема данных.

Все эксперименты проводились с использованием Python 3.10 в среде Google Colab Pro, оснащенной графическим процессором NVIDIA T4 Tensor Core с 16 ГБ видеопамяти. Данная конфигурация обеспечила достаточные вычислительные ресурсы для обучения и логического вывода трехмерных сверточных нейронных сетей, сохраняя при этом доступность и воспроизводимость.

Для обеспечения детерминированного поведения между экспериментальными запусками генераторы случайных чисел контролировались явным образом. Фиксированные случайные семена были применены к NumPy, TensorFlow и встроенному модулю random Python. Там,

где это поддерживалось, недетерминированные операции GPU были минимизированы для снижения изменчивости между запусками, что особенно важно для валидации в конвейерах анализа медицинских изображений.

Реализация опиралась на следующие программные библиотеки:

- TensorFlow/Keras (v2.x) для определения модели, оптимизации и автоматического дифференцирования;
- SimpleITK для ввода/вывода медицинских изображений, передискретизации и пространственных преобразований;
- Patchify для эффективного извлечения и реконструкции объемных патчей;
- Nibabel для обработки данных NIfTI, аффинных преобразований и сохранения метаданных.

Специализированный конвейер предварительной обработки был создан для преобразования разнородных исходных МРТ-объемов в стандартизированные тензоры, пригодные для входа в сеть. Конвейер состоит из следующих этапов.

С использованием SimpleITK исходные МРТ-сканы, сохраненные в формате NIfTI, загружались в память и передискретизировались к фиксированному изотропному разрешению $1.0 \times 1.0 \times 1.0$ мм с помощью ResampleImageFilter.

Для сохранения анатомической согласованности к объемным данным интенсивности применялась B-сплайн интерполяция, в то время как для бинарных объемов меток использовалась интерполяция методом ближайшего соседа во избежание смешивания классов. Этот шаг обеспечивает единый физический шаг вокселей для всех субъектов, способствуя согласованности пространственного представления.

После передискретизации все объемы преобразовывались в массивы NumPy и подвергались центральному кадрированию или дополнению нулями до фиксированного пространственного размера $128 \times 128 \times 128$ вокселей. Эта нормализация размерностей обеспечивает эффективную пакетную обработку во время обучения, сохраняя при этом центральные анатомические области интереса.

Для снижения межиндивидуальной вариабельности интенсивности к каждому объему применялась Z-нормализация. Важно отметить, что статистические показатели для нормализации вычислялись исключительно по области переднего плана, имеющей ненулевые значения, чтобы предотвратить влияние фонового заполнения на распределение интенсивности. Такой подход повышает численную стабильность, сохраняя при этом контраст в анатомически значимых областях.

Обучение модели было реализовано с использованием специально разработанного генератора данных на Python, который напрямую передает 4D-тензоры формы (B, Z, Y, X, C) в память GPU. Такая конструкция позволяет выполнять извлечение и аугментацию фрагментов данных в реальном времени без промежуточного сохранения на диск, снижая требования к памяти и повышая масштабируемость.

На каждой итерации обучения случайным образом выбирался субъект, и его объем анализировался с использованием стратегии извлечения патчей со сбалансированным соотношением классов. Извлекались кубические фрагменты с длиной ребра 96 вокселей, при этом заданная доля фрагментов содержала воксели переднего плана. Такой подход помогает уменьшить значительный дисбаланс классов, обычно наблюдаемый в объемных данных нейровизуализации.

Для улучшения обобщения при ограниченном объеме данных к извлеченным тензорам применялась онлайн-аугментация данных. Операции аугментации включали случайные пространственные отражения относительно аксиальной, сагиттальной и корональной осей, а также вращения, кратные 90°. Эти преобразования облегчают изучение признаков, инвариантных к ориентации, избегая при этом артефактов интерполяции.

Сеть оптимизировалась с использованием оптимизатора Adam с начальной скоростью обучения 1×10^{-4}. В процессе обучения минимизировалась составная функция потерь, объединяющая бинарную кросс-энтропию и Dice-потерю, что позволило улучшить как точность классификации на уровне вокселей, так и геометрическое перекрытие.

Для мониторинга процесса обучения использовался механизм обратных вызовов Keras. Сохранялись веса сети с наилучшим коэффициентом Dice на валидационной выборке, и применялся планировщик скорости обучения, который уменьшал ее, если потери на валидационной выборке не улучшались в течение 8 последовательных эпох. Такая настройка обеспечивает стабильную сходимость без необходимости значительных усилий по оптимизации гиперпараметров.

Во время логического вывода стохастическое сэмплирование патчей заменялось детерминированной стратегией скользящего окна для обеспечения полного покрытия объема. Каждый тестовый объем разделялся на перекрывающиеся патчи с шагом 48 вокселей, что соответствует 50 % перекрытию по каждому пространственному измерению.

Для каждого патча предсказывались карты вероятностей на уровне вокселей, которые затем реконстру-

ировались в полнообъемную сегментацию с использованием стратегии ансамбля по патчам. Предсказания в перекрывающихся областях усреднялись для уменьшения артефактов на границах блоков. Итоговая карта вероятностей пороговым значением 0.5 преобразовывалась в бинарную маску сегментации, которая сохранялась в формате NIfTI с наследованием аффинного преобразования исходного скана для сохранения анатомического соответствия.

Для оценки как алгоритмической производительности, так и клинической значимости были использованы следующие метрики.

Коэффициент сходства Dice (DSC): Коэффициент сходства Dice количественно определяет объемное перекрытие между предсказанной сегментацией $\hat{Y}$ и эталонной ручной разметкой Y, выполненной экспертом:

$$DSC = \frac{2 \mid Y \cap \hat{Y} \mid}{\mid Y \mid + \mid \hat{Y} \mid} \quad (8)$$

Хотя DSC является стандартной метрикой для сегментации медицинских изображений, его интерпретация требует учета контекста для малых анатомических структур, таких как DLPFC, где незначительные расхождения на границах могут непропорционально сильно снижать показатель по сравнению с сегментацией крупных органов.

Время логического вывода: Время логического вывода определяется как общее астрономическое время, необходимое для генерации полной 3D маски сегментации из исходного МРТ-объема. Эта метрика служит показателем совместимости с клиническим рабочим процессом и эксплуатационной осуществимости.

Из-за малого размера выборки (N=4 субъекта) обычное разделение на обучающий и тестовый наборы данных привело бы к значительным искажениям и высокому риску утечки данных, в частности, из-за сильной пространственной корреляции между соседними слоями. Для обеспечения методологической строгости была применена стратегия кросс-валидации с исключением по одному субъекту, Leave-One-Subject-Out (LOSO).

Было проведено четыре независимых эксперимента. На каждой итерации один субъект использовался исключительно для тестирования, в то время как остальные три служили для обучения. Эта процедура гарантирует, что все представленные результаты отражают производительность на новой, ранее не виденной анатомии мозга и, таким образом, максимально приближены к реальным клиническим условиям.

Предложенная легковесная сеть 3D-U-Net успешно сошлась во всех четырех тестах кросс-валидации. Это демонстрирует возможность обучения объемных моделей сегментации с нуля даже в условиях крайне малого объема данных.

Количественные результаты обобщены в Таблице 1. Модель достигла среднего DSC 0.53±0.11, при этом пиковая производительность достигла 0.64.

Таблица 1.

Коэффициенты сходства Dice (DSC) для валидации с исключением по одному субъекту (LOSO)

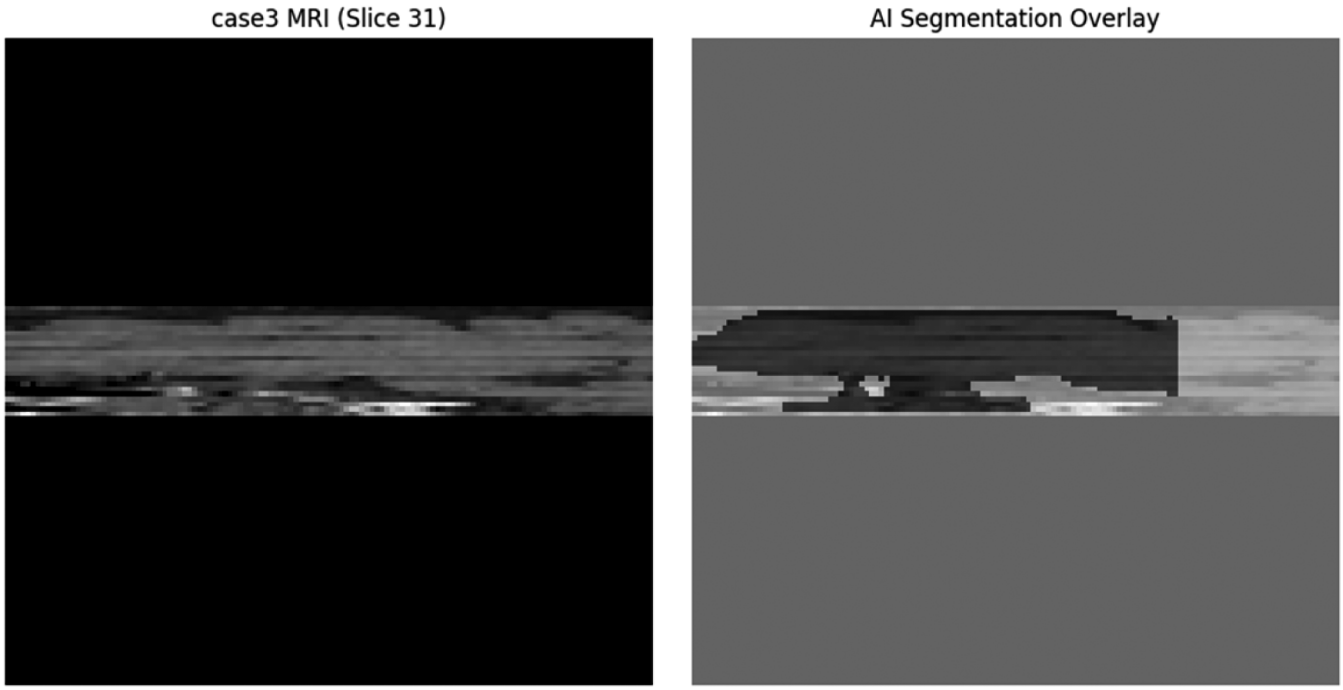
Фолд валидации	Метод	Показатель Dice	Интерпретация
Фолд 1 (Случай 1)	Легковесная U-Net	0.49	Умеренное согласие
Фолд 2 (Случай 2)	Легковесная U-Net	0.38	Плохое согласие (атипичная анатомия)
Фолд 3 (Случай 3)	Легковесная U-Net	**0.64**	**Сильное согласие**
Фолд 4 (Случай 4)	Легковесная U-Net	**0.62**	**Сильное согласие**
Среднее	–	**0.53±0.11**	–

Анализ результатов: В 50 % когорты (Случаи 3 и 4) модель достигла значений DSC, превышающих 0.60. Для небольших кортикальных подобластей, лишенных резкого интенсивностного контраста, такие показатели широко рассматриваются как свидетельство высокого анатомического соответствия и приближаются к сообщаемым уровням согласия между экспертами. Заметное снижение производительности наблюдалось в Случае 2 (DSC = 0.38), что указывает на ограниченную способность к обобщению на атипичные анатомические конфигурации.

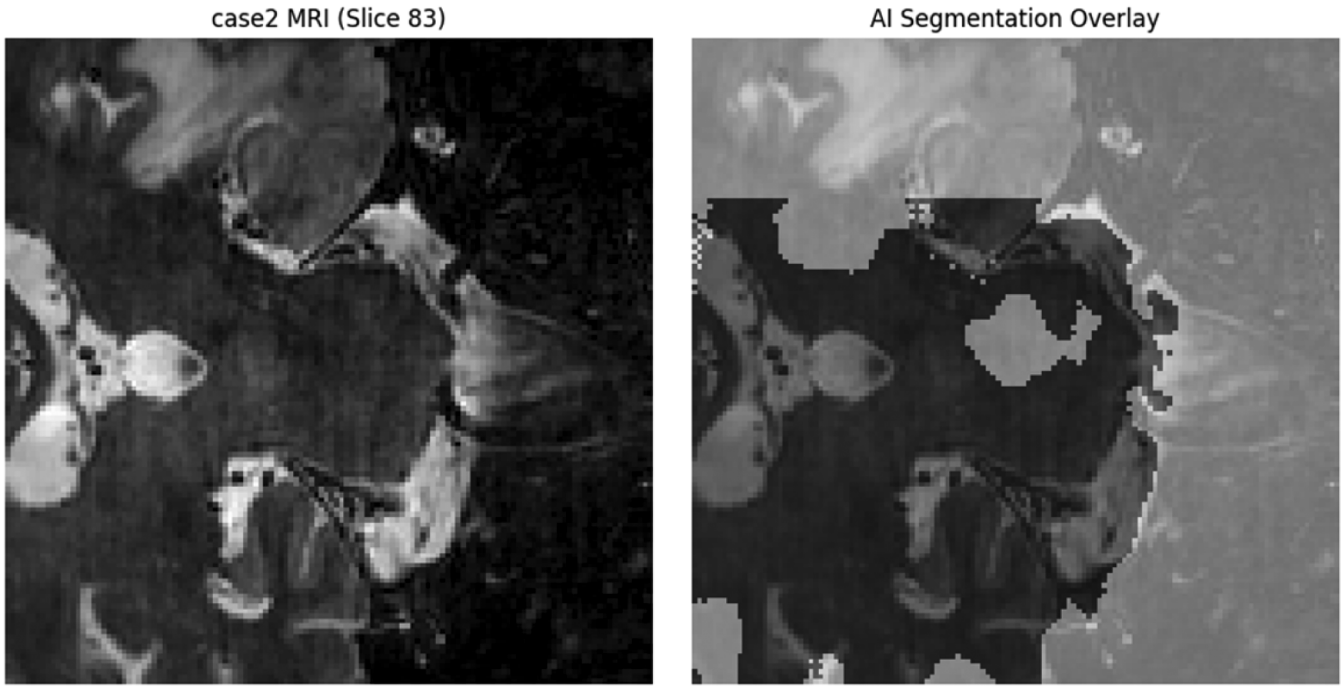
Одних количественных метрик недостаточно для полного понимания клинической пригодности. Визуальный осмотр трехмерных реконструкций дает дополнительное представление об анатомической правдоподобности и точности локализации, как показано на Рисунке 2–3.

Во всех случаях, включая те, где значения DSC были ниже, модель правильно локализовала центроид средней лобной извилины, демонстрируя робастное пространственное наведение. Предсказанные сегментации придерживались границ борозд без просачивания в соседние извилины, что указывает на то, что сеть изучила значимые топологические ограничения, а не полагалась исключительно на локальные текстурные признаки.

Слева: Точная локализация в Случае 2. Справа: Недостаточная сегментация в Случае 1, вызванная прерыви-



Случай 1. Точная локализация MFG



Случай 2. Недостаточная сегментация из-за атипичной извилистости

Рис. 2. Качественные результаты сегментации

стыми паттернами борозд, отсутствующими в обучающих данных.

Несмотря на общий успех, был выявлен ряд систематических сценариев отказов.

- Недостаточная сегментация при атипичной извилистости: Доминирующая ошибка в Случае 1 возникла из-за недостаточной сегментации, связанной с атипичной, прерывистой средней лобной извилиной. Поскольку ограниченный обучающий набор содержал только непрерывные паттерны извилин, модель консервативно сегментировала только области с высокой уверенностью. С клинической точки зрения, такая недостаточная сегментация предпочтительнее избыточной, так как снижает риск наведения на функционально нерелевантную кору.

- Неоднозначность границ: Вторичные ошибки возникали на передней границе между DLPFC и лобным полюсом, где T1-взвешенная МРТ обеспечивает минимальный интенсивностный контраст.
- «Эффект 1-патча»: В процессе логического вывода был выявлен технический артефакт. Из-за фиксированного шага патча (48^3) и размера входного объема (128^3) логика скользящего окна оценивала только пространственный диапазон [0,96], оставляя дистальные края необработанными. Это привело к покрытию приблизительно 75 % объема. Ожидается, что будущие реализации с использованием динамического дополнения (dynamic padding) улучшат чувствительность и средний DSC.

Учитывая пилотный характер исследования (N=4), был проведен концептуальный абляционный анализ для валидации критических архитектурных решений.

- Легковесная **vs**. Стандартная архитектура: Предварительные эксперименты со стандартными конфигурациями 3D U-Net (>20M параметров) привели к немедленному переобучению с почти нулевой точностью на валидации. Ограничение модели до 1.4M параметров послужило существенным регуляризатором.
- Сбалансированная по классам выборка: Модели, обученные без сбалансированной по классам выборки, сходились к тривиальным предсказаниям только фона (DSC = 0.0). Принудительное обеспечение минимальной вероятности патча с передним планом в 60 % было необходимо для стабильного обучения.
- Составная функция потерь: Использование только бинарной кросс-энтропии давало четкие границы, но плохое объемное перекрытие, в то время как использование только Dice-потери приводило к нестабильности на ранних этапах обучения. Их комбинация обеспечила стабильную оптимизацию и точную сегментацию.

Основной целью этого исследования было установление осуществимости на пользовательском оборудовании. В Таблице 2 сравнивается вычислительная эффективность предлагаемого автоматизированного конвейера с ручной разметкой экспертом.

Примерно 77-кратное сокращение времени обработки превращает сегментацию DLPFC из медленной и ресурсоемкой задачи в операцию, близкую к реальному времени, что обеспечивает ее интеграцию в клинические рабочие процессы нейронавигации.

Предлагаемый метод представляет собой существенный отход от обычной клинической практики. Широко используемые эвристики, основанные на поверхности

Таблица 2.

Сравнение вычислительной эффективности

Метод	Время обработки (среднее)	Оборудование
Ручная разметка экспертом	45 ± 10 мин	Человек-оператор
Логический вывод ИИ (Наш)	35 ± 5 с	NVIDIA T4 GPU
Коэффициент улучшения	**~77× быстрее**	–

головы, такие как «правило 5 см» [2] и метод Beam F3 [5], предполагают каноническую модель мозга для всех пациентов. Хотя эти подходы являются вычислительно мгновенными, они демонстрируют ограниченную анатомическую точность наведения из-за значительной межиндивидуальной вариабельности геометрии черепа и извилистости коры.

Напротив, предлагаемый фреймворк глубокого обучения явным образом моделирует нейроанатомию конкретного субъекта, учитывая различия в паттернах складчатости коры и структурной атрофии. В то время как эвристические методы требуют незначительных вычислительных затрат, время логического вывода предлагаемой системы, составляющее примерно 40 секунд, представляет собой минимальную уступку в обмен на существенный выигрыш в персонализированной анатомической точности.

В области автоматической медицинской сегментации современные подходы (SOTA) обычно используют тяжелые 3D архитектуры, такие как V-Net [6] или расширенные варианты 3D U-Net, производные от тяжелых базовых архитектур (например, ResNet, VGG). Эти существующие методы часто достигают несколько более высоких показателей Dice (в диапазоне 0.70–0.80), но требуют наборов данных из 50–100+ размеченных объемов и кластеров высокопроизводительных вычислений (HPC) из-за количества параметров, превышающего 20 миллионов.

Напротив, наш предлагаемый легковесный подход:

- Ограничивает сложность: использует только 1.4 миллиона параметров (<10 % от стандартных моделей).
- Требует минимум данных: демонстрирует сходимость всего на 4 субъектах, в то время как SOTA-модели без массивной аугментации данных терпят неудачу или переобучаются.
- Обеспечивает доступность: развертывается на пользовательском оборудовании (стандартные клинические рабочие станции), а не на специализированных GPU-серверах.

Хотя наша текущая количественная точность ниже, чем у эталонных SOTA-моделей, обученных на массив-

ных наборах данных, наш метод предлагает критическое преимущество в возможности развертывания и ресурсоэффективности, необходимых для децентрализованных клинических условий.

Количественные метрики сегментации обеспечивают объективную меру производительности алгоритма; однако их клиническая значимость должна интерпретироваться в контексте терапевтического применения. При ритмической транскраниальной магнитной стимуляции (рТМС) клинически значимым результатом является не просто попиксельное перекрытие, а скорее ошибка локализации мишени стимуляции относительно целевой корковой области.

Для небольших корковых мишеней, таких как дорсолатеральная префронтальная кора (DLPFC), коэффициент сходства Dice в диапазоне 0.55–0.65 соответствует среднему отклонению по поверхности примерно 3–6 мм. Этот уровень погрешности вполне укладывается в эксплуатационную точность современных систем нейронавигации, которые обычно имеют собственные ошибки отслеживания в 2–3 мм. Следовательно, результаты сегментации, которые могут показаться умеренными при оценке исключительно по статистическим метрикам, тем не менее могут быть клинически достаточными для точного позиционирования катушки.

Кроме того, стандартные ТМС-катушки в форме восьмерки генерируют эффективное поле стимуляции с пространственной протяженностью примерно 10–15 мм. Незначительные расхождения сегментации вдоль корковой границы, следовательно, оказывают незначительное влияние на индуцированное электрическое поле в эпицентре мишени. В результате консервативная недостаточная сегментация, наблюдавшаяся в нескольких случаях валидации, не ставит под угрозу клиническую применимость и может даже снизить вероятность стимуляции нецелевых областей.

С практической точки зрения, предлагаемый конвейер бесшовно интегрируется в существующие рабочие процессы нейронавигации. После получения МРТ автоматизированная система генерирует маску сегментации DLPFC примерно в течение одной минуты. Эта маска служит анатомическим априорным знанием с высокой степенью достоверности, которое может быть напрямую импортировано в коммерческие платформы нейронавигации, заменяя 45-минутный процесс ручного контурирования.

Системы нейровизуализации на основе искусственного интеллекта должны развертываться прозрачно и с обязательным участием человека (human-in-the-loop). Предлагаемый фреймворк явно разработан как инструмент поддержки принятия клинических решений (CDS), а не как автономная диагностическая система. Его роль заключается в расширении клинического опыта путем предоставления надежной и персонализированной анатомической справки для нейронавигации при сохранении полного контроля со стороны клинициста и возможности изменять результаты при необходимости.

Это различие соответствует текущим нормативным рекомендациям для медицинского программного обеспечения с поддержкой ИИ и облегчает трансляционную осуществимость, обеспечивая при этом безопасность пациентов. Будущая работа будет сосредоточена на включении проверяемых механизмов обнаружения отказов для автоматической маркировки анатомически атипичных случаев, связанных с пониженной уверенностью модели, что способствует более безопасному клиническому развертыванию.

В этой работе были представлены дизайн, теоретическое обоснование и программная реализация полностью автоматизированного конвейера глубокого обучения для трехмерной сегментации дорсолатеральной префронтальной коры (DLPFC). Результаты демонстрируют, что легковесная, специализированная архитектура 3D U-Net, обученная с нуля, может успешно локализовать клинически значимые мишени стимуляции в объемах структурной МРТ, используя минимальный набор данных.

Хотя режим малого объема данных ограничивает обобщение на сильно атипичные анатомии, предложенный метод достиг удовлетворительной производительности (коэффициент сходства Dice >0.6) в половине фолдов валидации. Наиболее важно то, что была достигнута основная операционная цель — устранение узкого места в виде ручной сегментации, что сократило время обработки примерно с 45 минут до менее чем одной минуты и обеспечило 77-кратное повышение вычислительной эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. M.D. Fox, R.L. Buckner, M.P. White, M.D. Greicius, and A. Pascual-Leone, "Efficacy of TMS targets for depression is related to intrinsic functional connectivity with the subgenual cingulate," Biological Psychiatry, vol. 72, no. 7, pp. 595–603, 2012.
2. U. Herwig, P. Satrapi, and C. Schönfeldt-Lecuona, "Transcranial magnetic stimulation: Five-centimeter rule vs. neuronavigation," Psychiatry Research: Neuroimaging, vol. 108, no. 1, pp. 87–96, 2001.
3. O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox, "U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation," in International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI), Springer, 2015, pp. 234–241.
4. Ö. Çiçek, A. Abdulkadir, S.S. Lienkamp, T. Brox, and O. Ronneberger, "3D U-Net: learning dense volumetric segmentation from sparse annotation," in MICCAI, Springer, 2016, pp. 424–432.
5. W. Beam, J.J. Borckardt, S.T. Reeves, and M.S. George, "An efficient method for positioning the coil for transcranial magnetic stimulation of the dorsolateral prefrontal cortex," Brain Stimulation, vol. 2, no. 1, pp. 50–54, 2009.
6. F. Milletari, N. Navab, and S.A. Ahmadi, "V-Net: Fully convolutional neural networks for volumetric medical image segmentation," in 2016 Fourth International Conference on 3D Vision (3DV), IEEE, 2016, pp. 565–571.
7. V. Mylius et al., "Transcranial magnetic stimulation of the dorsolateral prefrontal cortex: variability in site selection and effects on pain perception," Brain Stimulation, vol. 6, no. 5, pp. 740–747, 2013.
8. Z. Yaniv, B.C. Lowekamp, H.J. Johnson, and R. Beare, "SimpleITK: a simplified layer over the Insight Segmentation and Registration Toolkit," Journal of Digital Imaging, vol. 31, no. 2, pp. 172–185, 2018.
9. N.J. Tustison et al., "N4ITK: Nick's N3 ITK implementation for MRI bias field correction," IEEE Transactions on Medical Imaging, vol. 29, no. 6, pp. 1310–1320, 2010.
10. L.R. Dice, "Measures of the amount of ecologic association between species," Ecology, vol. 26, no. 3, pp. 297–302, 1945.

© Апана Кеннет Айнбуно (kenneth.89@mail.ru); Шичкина Юлия Александровна (strange.y@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.06

ПУБЛИКАЦИОННАЯ АКТИВНОСТЬ МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНОГО СООБЩЕСТВА ПО ПРОБЛЕМЕ РАЗРАБОТКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ИНДУСТРИАЛЬНОМ ИНТЕРНЕТЕ ВЕЩЕЙ

PUBLICATION ACTIVITY OF THE INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMUNITY ON THE DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED SYSTEM BASED ON NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES IN THE INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS

R. Bagdanov

Summary. The article examines the publication activity of researchers worldwide on the use of neural network technologies in the context of the Industrial Internet of Things. The period of the highest publication activity is identified, and its dynamics are analyzed. Using analytical tools of information systems for scientific publications, including Lens.org and VOSviewer, a bibliometric analysis of publications was carried out. The analysis included keyword analysis, the construction of terminological maps, diagrams of authors' publication activity distribution, and a heat map of countries' publication activity. The methodology of the study is based on methods of analysis and synthesis, as well as on the application of a systems approach for conducting a structural analysis of publication activity related to the use of neural network technologies in the Industrial Internet of Things. The results of the study indicate that the considered research area is gradually gaining attention in the global scientific community, however it remains insufficiently developed. The problem of applying neural network technologies in the Industrial Internet of Things remains insufficiently systematized in the context of equipment failure prediction tasks. The results of the research may be of practical interest for the educational system, particularly for university faculty members.

Keywords: Industrial Internet of Things, neural network technologies, neural networks, Industry 4.0.

Багданов Руслан Батырханович
Аспирант,
Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского, г. Москва
tg.bogdanov9@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается публикационная активность исследователей мира по теме использования нейросетевых технологий в контексте индустриального интернета вещей. Определен период максимальной публикационной активности, выявлена ее динамика. С использованием инструментария в информационных системах для работы с научными публикациями: Lens.org, VOSviewer проведен анализ публикаций: по ключевым словам, построены терминологические карты, диаграммы распределения публикационной активности авторов, тепловая карта публикационной активности стран. Методология представленного в статье исследования основана на методах анализа и синтеза, а также на применении системного подхода для проведения структурного анализа публикационной активности в отношении применения нейросетевых технологий в контексте индустриального интернета вещей. Рассмотренное в статье отношение к нейросетевым технологиям позволяет обосновать, что рассматриваемая область исследования начинает обсуждаться в мире, однако всё еще остается недостаточно развитой. Проблема применения нейросетевых технологий в индустриальном интернете вещей остаётся недостаточно систематизированной в контексте задач прогнозирования отказов оборудования. Результаты исследования могут представлять практический интерес для системы образования, в частности, для преподавателей высших учебных заведений.

Ключевые слова: индустриальный интернет вещей, нейросетевые технологии, нейронные сети, индустрия 4.0.

Введение

В условиях стремительного развития Индустриального интернета вещей (IIoT) и повсеместного внедрения нейросетевых технологий в промышленности, вопросы обеспечения надежности и эффективности оборудования становятся все более актуальными. Разработка автоматизированных систем прогнозирования отказов оборудования на основе нейросетевых моделей представляет собой важный этап в обеспечении бесперебойной работы производственных процессов [1,10].

Использование нейросетевых технологий и ИИ в промышленности обещает не только оптимизацию рабочих процессов, но и улучшение ключевых показателей деятельности предприятий. Автоматизация процессов прогнозирования отказов оборудования с помощью нейросетевых моделей позволяет сократить вероятность

простоев и повысить надежность работы оборудования [2]. Оптимизация производственных процессов с использованием алгоритмов искусственного интеллекта способствует эффективному распределению ресурсов и минимизации издержек. Контроль качества продукции с применением ИИ позволяет предотвращать возникновение дефектов и снижать процент брака, что важно для обеспечения конкурентоспособности на рынке [3].

Однако, использование нейросетевых технологий и ИИ в промышленности требует не только технической готовности, но и культурных изменений внутри предприятий. Необходимо развивать новые навыки и компетенции сотрудников, адаптировать рабочие процессы под новые технологические решения и обеспечить надежную защиту данных и информации.

В данной статье мы сосредоточим наше внимание на анализе публикационной активности, по ключевым словам, связанным с нейросетевыми технологиями в контексте индустриального интернета вещей. Целью нашего исследования является выявление тенденции развития в этом направлении и выявление мировых лидеров, исследующих эту область.

Проведённый предварительный анализ публикаций позволяет выделить два ключевых тренда: во-первых, устойчивый рост общего числа исследований в области индустриального интернета вещей; во-вторых, постепенную интеграцию нейросетевых технологий в задачи промышленной аналитики и прогнозирования отказов оборудования.

Методология

Для анализа публикационной активности выбраны следующие ключевые слова: «industrial internet of things» (индустриальный интернет вещей) и «analysis internet of things using a neural network» (анализ интернета вещей с помощью нейронных сетей) [4]. Анализ по приведенным сочетаниям ключевых слов позволит проанализировать заинтересованность научного сообщества, связанную с применением нейросетевых технологий для разработки системы прогнозирования отказов оборудования в индустриальном интернете вещей (ИИВ), а также уровень развития близких к данной теме в мировом научном сообществе. Для проведения исследования был использован функционал, предлагаемый системой Lens.org [5], которая содержит инструменты поиска и анализа, способные обеспечить доступ к глобальным данным научной литературы с индексацией цитирования: названия статей, имена авторов, ключевые слова, страны, годы публикаций, другие категории данных, необходимых для анализа научных публикаций и исследований по проблеме. Использование данной системы позволило собрать статистику по количеству опубликованных научных статей по выделенным ключевым словам для оценки заинтересованности научного сообщества в области использования нейросетевых технологий для индустриального интернета вещей. Анализ тепловой карты по сферам написания научных работ показывает области, в которых анализ данной проблемы рассматривается наиболее широко, а также практически не затронутые области. Статистика по количеству научных публикаций (относительно времени) позволяет определить период возникновения интереса в данной области, когда произошел пик по количеству научных работ и на каком уровне интереса и развития находится на данный момент. Диаграмма распределения публикационной активности авторов позволяет выявить наиболее заинтересованных из них в данной проблеме, более подробно рассмотреть направления их исследования, а также изучить результаты этих исследований.

Второй инструмент, используемый для построения и анализа библиометрических данных — VOSviewer [6]. Система использовалась для анализа созданной и загруженной базы данных из Lens.org, полученной на основе анализа ключевых слов «industrial internet of things» (индустриальный интернет вещей) и «analysis internet of things using a neural network» (анализ интернета вещей с помощью нейронных сетей). Результаты, полученные с помощью системы VOSviewer, позволили визуализировать основные направления исследования на основе предоставляемых системе ключевых слов, а также визуализировать опубликованные статьи по наличию взаимосвязей между авторами, публикациями и терминами [7].

Данные инструменты позволяют определить уровень актуальности выбранной тематики исследования.

Результаты

Основной проблемой в данном исследовании является анализ публикационной активности авторов по проблеме использования нейросетевых технологий для создания прогнозирования отказа оборудования, поэтому необходимо проанализировать насколько актуально использование такого рода технологий в Индустриальном интернете вещей.

Проанализированы статьи из базы данных Lens.org по набору ключевых слов — «Industrial internet of things». По результатам поиска в данной системе было найдено более 140 000 публикаций, в которых встречается данное сочетание ключевых слов.

Первые активные упоминания о понимании развития умных вещей для автоматизации, появились ещё в 2000 годах. Сама концепция «Интернет вещи» была сформулирована в 1999 году как осмысление расширения работы радиочастотных волн и идентификации физических объ-

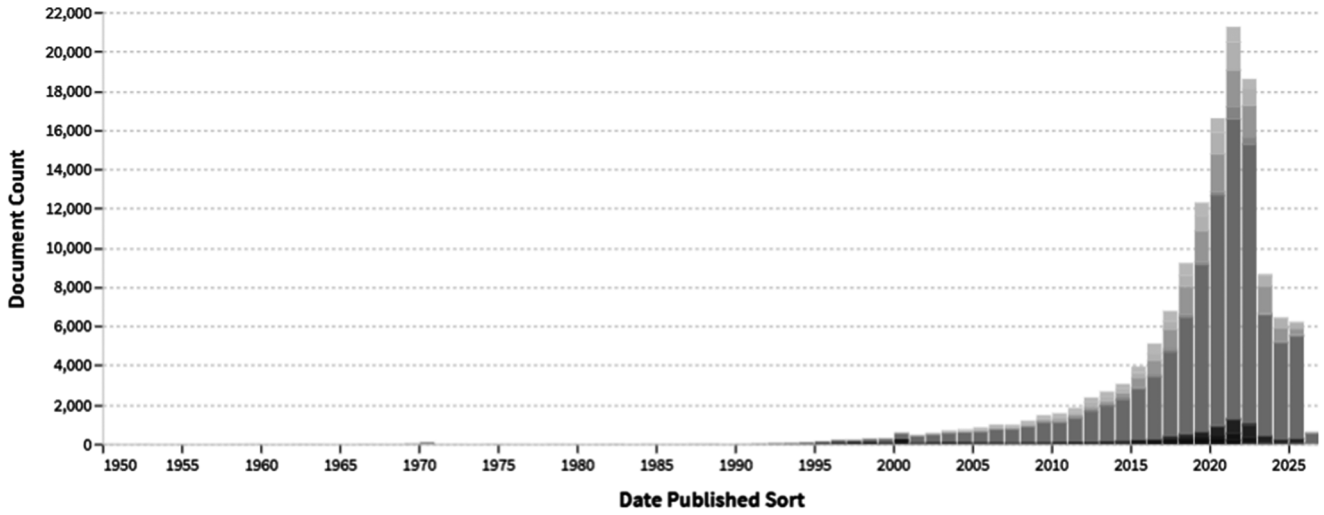


Рис. 1. Результат распределения количества публикаций по годам на гистограмме, по ключевым словам, «Industrial internet of things» в системе Lens.org

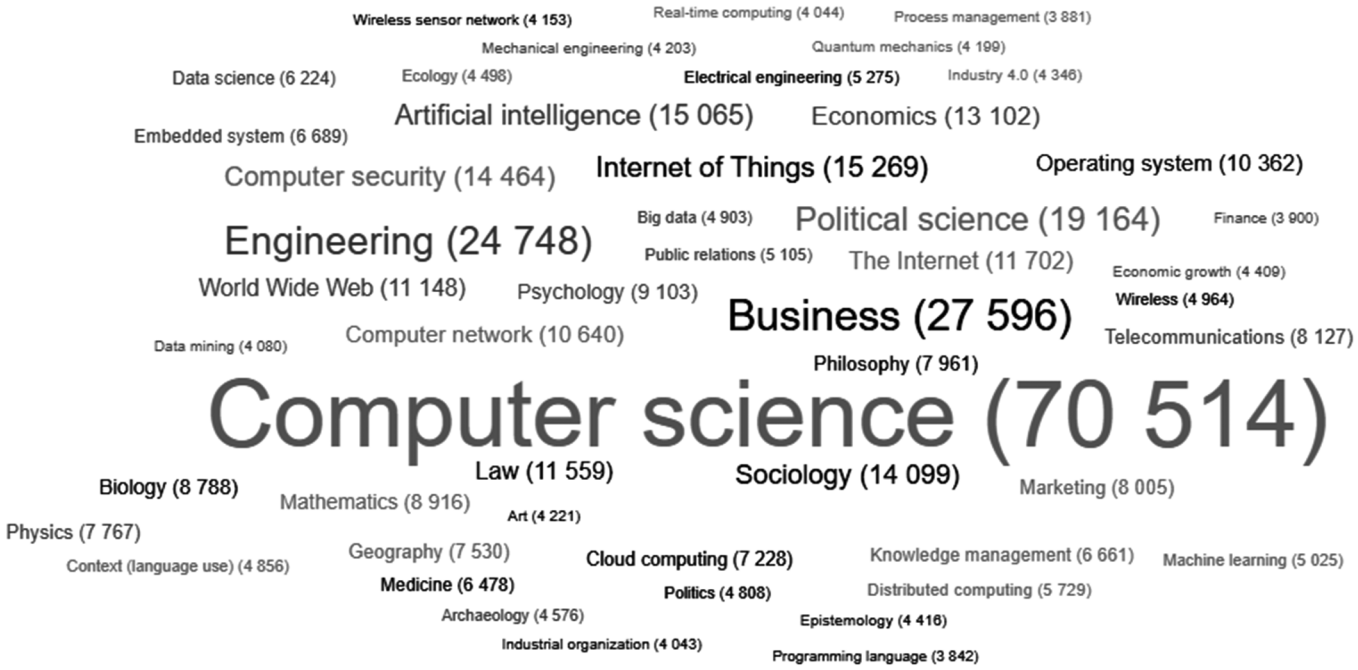


Рис. 2. Результат распределения публикаций, по ключевым словам, «industrial internet of things» по научным направлениям системы Lens.org

ектов между собой и внешним окружением, без участия в этом человека. Развитие электроприборов и умных вещей наблюдается в период 1995–2015 гг. Пик активности по публикациям происходит с 2020 по 2022 гг. (рис. 1).

Принимая во внимание тот факт, что библиографическая база данных Lens.org содержит информацию по публикациям мирового уровня, мы не можем построить четкую взаимосвязь такой активности по публикациям с правовыми законами, связанными с политикой в области цифровой трансформации, и можно предположить корреляцию с ускорением цифровизации в период пандемии по всему миру во всех социальных областях функционирования общества.

На основе результатов базы данных Lens.org, можно также определить основные направления публикаций, которые имеют взаимосвязь с компьютерной инженерией и, интернетом вещей и искусственным интеллектом. Основные направления, которые можно выделить на карте распределения публикаций (рис. 2), затрагивают такие направления исследования, как компьютерная наука (70 514 публикации за весь период), инженерия (24 748 публикаций), интернет вещи (15 269 публикаций).

Также присутствуют публикации на тему искусственного интеллекта (15 065 публикаций).

Для визуализации наиболее часто повторяющихся ключевых слов в публикациях и отображения связей между ними была использована система построения визуальных карт VOSviewer. Обработав массив данных посредством программного обеспечения VOSviewer, были установлены взаимосвязи между такими кластерами, интернет вещией и искусственный интеллект, что говорит о тенденции роста исследований в области искусственного интеллекта (рис. 3).

Анализ структуры сети демонстрирует центральное положение узла «industrial internet», который выступает системообразующим элементом исследуемого научного поля. От него отходят многочисленные связи к терминам «internet», «thing», «technology», «industry», «iot», а также к более специализированным понятиям, связанным с архитектурой и внедрением («architecture», «integration», «implementation», «device», «cloud»). Визуально можно выделить несколько кластеров: технологический кластер (architecture, cloud, solution, efficiency), промышленно-прикладной кластер (industry, manufacturing, industrial automation, cyber physical system, big data) и методологический кластер, включающий термины «model», «algorithm», «analysis», «framework», «real time». Наличие плотных связей между указанными кластерами свидетельствует о междисциплинарном характере исследований и высокой степени интеграции концепции индустриального интернета с направлениями цифровой трансформации промышленности. При этом распределение узлов показывает, что исследования в области IIoT охватывают как техническую инфраструктуру, так и прикладные аспекты промышленного внедрения, формируя комплексное и структурированное научное пространство.

Для определения актуальности поставленной проблемы исследования необходимо было провести анализ непосредственно по применению нейросетевых технологий при прогнозировании отказа оборудования в индустриальном интернете вещей и определить, была ли затронута подобная проблема другими авторами в мире. В связи с этим была подобрана такая совокупность ключевых слов, которая удовлетворяет тематике данного исследования. Такой совокупностью является сочетание следующих терминов — «analysis internet of things using a neural network».

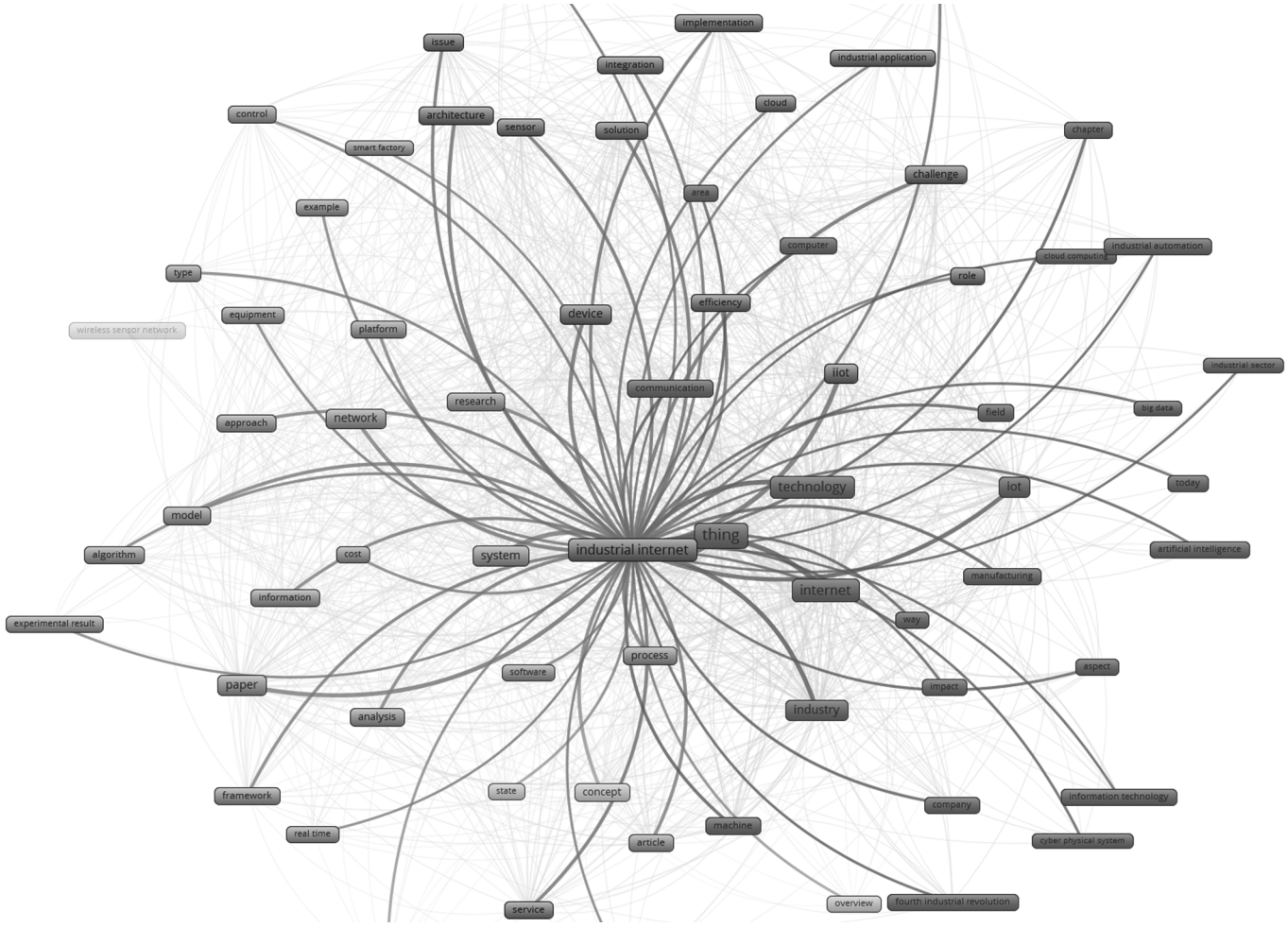


Рис. 3. Результат построения терминологической карты, по ключевым словам, «industrial internet of things»

Для подтверждения выявленных тенденций дополнительно проведён уточняющий анализ по более специализированному поисковому запросу, позволяющему оценить степень интеграции нейросетевых моделей именно в контексте прикладных задач IIoT.

Используя ту же систему анализа посредством программного обеспечения VOSviewer во взаимодействии с базой данных научной литературы Lens.Org и основываясь на поиске научных публикаций по таким ключевым словам — «analysis internet of things using a neural network», в результате чего было выявлено 40 068 публикаций, содержащих данную совокупность ключевых слов. На основе полученной базы данных, содержащей данные результаты, была построена визуальная карта взаимосвязей и совпадений.

Результаты построения терминологической карты, по ключевым словам, «analysis internet of things using a neural network» представлены на рисунке 4. В отличие от предыдущей карты, где доминирующим элементом выступал «industrial internet», в данном случае центральным узлом сети является термин «neural network», что свидетельствует о фокусировке исследовательского интереса непосредственно на нейросетевых методах обработки данных. От узла «neural network» отходят многочисленные связи к таким терминам, как «analysis», «prediction», «algorithm», «system», «internet», «data» и «time», что указывает на активное применение нейросетевых моделей для задач анализа данных, прогнозирования и обработки информации в среде интернета вещей.

Визуально можно выделить несколько тематических кластеров: кластер алгоритмической реализации (algorithm, model, data, prediction), кластер прикладной интеграции (internet, thing, iot, device, network), а также кластер технологических решений (framework, architecture, deep learning, security, solution). Плотность связей вокруг узла «neural network» подтверждает его системообразующую роль в рассматриваемом направлении исследований.

Таким образом, карта демонстрирует формирование самостоятельного исследовательского направления, в котором нейросетевые технологии выступают ключевым аналитическим инструментом в задачах обработки и прогнозирования данных в среде IIoT.

Было проанализировано содержание двух статей, которые напрямую отражают направление исследования. Первая статья (Luo T. 2018) представляет собой новатор-

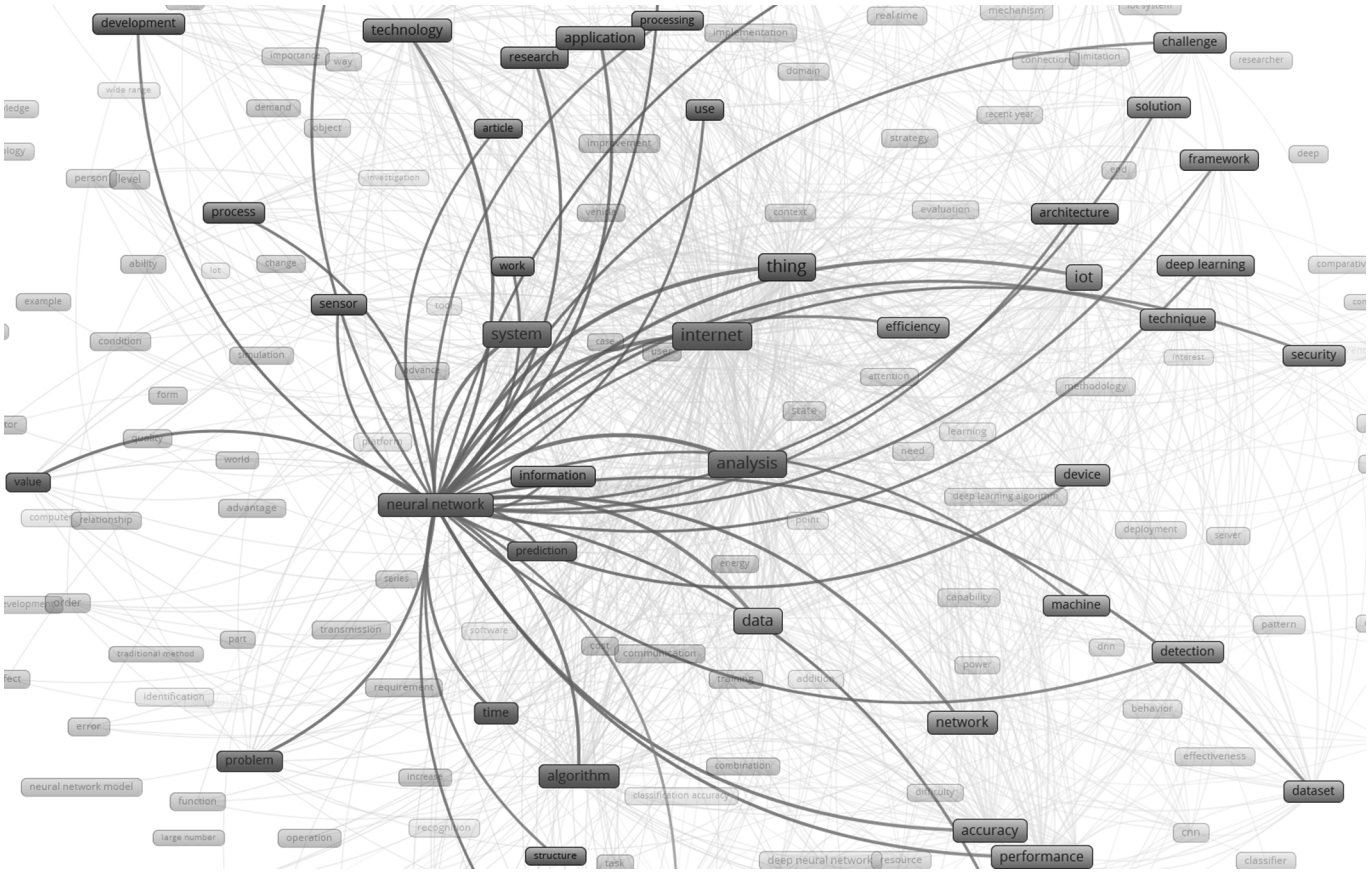


Рис. 4. Результат построения терминологической карты, по ключевым словам, «analysis internet of things using a neural network»

ское исследование в области беспроводных сенсорных сетей (WSN) для интернета вещей (IoT). Автором работы является Tie Luo, исследователь с богатым опытом в области машинного обучения и нейронных сетей. В центре внимания статьи лежит проблема обнаружения аномалий в данных, собранных с различных устройств IoT, развернутых в различных средах. Стремительное развитие IoT приводит к возросшей потребности в эффективных методах обнаружения нештатных ситуаций, которые могут повлиять на работу устройств или даже на безопасность системы в целом [8].

Во второй статье (López A.J.M. 2019) авторы предпринимают попытку оценить применимость классических алгоритмов нейронных сетей в контексте встраиваемых систем. Их работа включает в себя исполнение и анализ алгоритмов, таких как многослойный персептрон (MLP), сверточные нейронные сети (CNN) и рекуррентные нейронные сети (RNN), когда они реализуются на встроенных устройствах. можно сделать вывод, что хотя классические алгоритмы нейронных сетей могут быть реализованы на встраиваемых системах, их производительность и точность могут существенно зависеть от характеристик конкретной системы и специфики задачи. При этом необходимо учитывать компромисс между вычислительной сложностью алгоритма и его эффективностью в контексте решаемой задачи. Статья представляет ценную информацию о возможностях и ограничениях использования классических алгоритмов нейронных сетей во встроенных системах, что может быть полезным для разработки нейросетевой технологии для прогнозирования отказов оборудования в Интернете вещей. Однако для полного понимания и применения результатов исследования требуется дальнейшее изучение и анализ [9].

Исследование публикационной активности по странам показало интерес ученых к теме внедрения нейросетевых технологий в индустриальный интернет вещей в более чем 100 странах. Наиболее активно данная тема развивается в Китае (5 297 публикаций), США (4 152 публикаций), Великобритания (2 228 публикаций) и Индия (1 298 публикаций). Россия сильно отстает от лидеров, имея 280 публикаций с 2006 по 2026 год (рис. 5).

Заключение

Проведённый анализ публикационной активности в области применения нейросетевых технологий в контексте индустриального интернета вещей позволяет сделать вывод о поступательном развитии данного направления. Наблюдается устойчивый рост общего количества публикаций по тематике IIoT, что свидетельствует о высокой актуальности цифровой трансформации промышленности и интеграции интеллектуальных методов обработки данных.

В то же время сравнительный анализ показал, что при значительном объёме исследований, посвящённых искусственному интеллекту и интернету вещей, направление применения нейросетевых технологий для задач прогнозирования отказов оборудования остаётся структурно фрагментированным. Терминологические карты демонстрируют периферийное положение соответствующих кластеров по отношению к основным направлени-

Рис. 5. Результат публикационной активности стран, по ключевым словам, «analysis internet of things using a neural network»

ям IIoT-исследований, что указывает на недостаточную систематизацию и интеграцию данной проблематики в единое научное поле.

Дополнительный временной анализ ключевых терминов подтверждает, что активное включение нейросетевых моделей в исследования IIoT является сравнительно новым этапом развития научной мысли, сформировавшимся в последние годы на фоне ускорения процессов цифровизации промышленного сектора.

Таким образом, выявленный исследовательский разрыв обосновывает необходимость дальнейших комплексных исследований, направленных на разработку автоматизированных систем прогнозирования отказов оборудования на основе нейросетевых технологий. Формирование системного подхода в данной области способно обеспечить повышение надёжности промышленной инфраструктуры и расширить практическое применение интеллектуальных методов анализа данных и сформировать научную основу для разработки автоматизированных систем прогнозирования отказов оборудования в среде индустриального интернета вещей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Li W., Zhang Y., Chen X.Comparison of deep learning models for predictive maintenance in industrial manufacturing systems using sensor data // Scientific Reports. — 2025. — Vol. 15. — P. 3–4.
2. Рыжова Е.Л. Применение информационных технологий в системах диагностирования оборудования электроподвижного состава — методы, примеры их реализации, перспективы развития //Интеллектуальная электротехника/НГТУ им. РЕ Алексеева — Нижний. — С. 38. 2025.
3. Javaid M. et al. Artificial intelligence applications for industry 4.0: A literature-based study //Journal of Industrial Integration and Management. — 2022. — Т. 7. — №. 01. — С. 83–111.
4. Бабкин А.В., Алексеева Н.С. Исследование тенденций развития цифровой экономики на основе анализа публикационной активности //Цифровая экономика и Индустрия 4.0: тенденции 2025. — 2019. — С. 63–68.
5. VOSviewer [Электронный ресурс], URL: https://www.vosviewer.com/ (дата обращения: 15.02.2026)
6. Lens [Электронный ресурс], URL: https://www.lens.org/lens/ (дата обращения: 15.02.2026).
7. Chvanova M.S., Mitrofanova I.P., Molchanov A.A., Shlenov Y.V., Podlesny D.V. (2021). Terminological Maps of Publications on the Transformation of Students' Professional Orientations in the Context of their Internet Socialization. Proceedings of the 2021 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies», IT and QM and IS 2021 (pp. 605–611). Yaroslavl: Pastukhov State Academy of Industrial Management. DOI:10.1109/ITQMIS53292.2021.9642758.
8. Luo T., Nagarajan S.G. Distributed anomaly detection using autoencoder neural networks in WSN for IoT //2018 IEEE international conference on communications (icc). — IEEE, 2018. — С. 1–6.
9. López A.J.M., Suarez J.R.P., Varela D.T. Execution and analysis of classic neural network algorithms when they are implemented in embedded systems //MATEC Web of Conferences. — EDP Sciences, 2019. — Т. 292. — С. 01012. P. 4–5.
10. Zonta T., da Costa C.A., da Rosa Righi R., de Lima M.J., da Trindade E.S., Li G.Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review // Computers & Industrial Engineering. — 2020. — Vol. 150. — P. 106889, P. 2–3.

© Багданов Руслан Батырханович (tg.bogdanov9@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.11

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ОБРАБОТКЕ БОЛЬШИХ JSON-ФАЙЛОВ В СРЕДЕ PYTHON

COMPARATIVE ANALYSIS OF APPROACHES TO PROCESSING LARGE JSON FILES IN PYTHON

G. Elkin

Summary. This study examines challenges in processing JSON documents in Python that arise from the large size of source files and the need to perform data deserialisation, that is, conversion from a textual format into in-memory objects. It systematises practical approaches to handling large JSON files, including full materialisation of the document in RAM, selective deserialisation according to a defined data schema, and streaming JSON parsing. An alternative to conventional JSON, namely JSON Lines, is also considered, as it enables efficient line-by-line data processing. The experimental component compares execution time and peak memory usage when processing files with various tools available within the Python ecosystem. Based on the results obtained, recommendations are formulated for selecting an appropriate approach depending on memory constraints, performance requirements, and the nature of the task.

Keywords: json parsing, json, jsonl, big data, python.

Ёлкин Григорий Валерьевич
Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, г. Санкт-Петербург
gyolkin380@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматриваются проблемы обработки JSON-документов в среде Python, обусловленные большим размером исходных файлов и необходимостью выполнения десериализации данных, то есть преобразования из текстового формата в объекты в памяти компьютера. Выполнена систематизация практических подходов к обработке больших JSON-файлов, включая полную материализацию документа в оперативной памяти, выборочную десериализацию в соответствии с определенной схемой данных, потоковый разбор JSON. Рассмотрено альтернативное классическому JSON представление JSON Lines, позволяющее эффективную построчную обработку данных. Экспериментальная часть включает сравнение времени выполнения и пикового потребления оперативной памяти при обработке файлов с использованием различных инструментов, доступных в экосистеме языка программирования Python. На основе полученных результатов сформулированы рекомендации по выбору подхода в зависимости от ограничений по памяти, требований к производительности и характера задачи.

Ключевые слова: парсинг json, json, jsonl, большие данные, python.

Введение

JSON (JavaScript Object Notation) представляет собой легкий текстовый, языконезависимый формат представления структурированных данных, исторически восходящий к литералам объектов JavaScript и закрепленный в стандартах IETF и Ecma International [1, 2]. Благодаря простоте синтаксиса и широкой поддержке в различных программных платформах JSON стал одним из наиболее распространенных форматов обмена данными в сетевых API, системах журналирования и мониторинга, пакетных выгрузках.

В прикладных задачах встречаются JSON-документы, объем которых составляет десятки и сотни мегабайт, тогда как на практике в среде Python широко распространен подход полной десериализации документа. Получаемая в результате структура объектов размещается в оперативной памяти и содержит данные, представленные встроенными типами Python со сложным внутренним устройством: списками, словарями, строками и числами. Так, размер пустого словаря при использовании интерпретатора CPython 3.12 в 64-разрядной системе составляет 64 байта. Создание миллионов таких объектов в процессе десериализации приводит как к многократно большему потреблению памяти по сравнению с фактическим размером исходного JSON-файла, так и к дополнительным временным затратам на их обработку. В результате при работе с большими файлами критичными становятся два показателя: время выполнения и пиковое потребление оперативной памяти, особенно при наличии строгих ограничений на объемы ОЗУ.

В данной работе выполнен сравнительный анализ подходов к обработке больших JSON-файлов в среде Python по времени выполнения и пиковому потреблению оперативной памяти, продемонстрированы преимущества и недостатки отдельных инструментов и способов представления JSON, сформулированы практические рекомендации по выбору наилучшего подхода в зависимости от ограничений по ресурсам и типу задачи.

Подходы к обработке JSON

Классическим способом обработки JSON в среде Python является полная десериализация данных с материализацией всей структуры в памяти, — DOM представление, — которое поддерживается встроенным в стан-

дартную библиотеку модулем json. Этого достаточно при работе с небольшими файлами, размер которых заранее известен и существенно уступает доступному объему ОЗУ. Поскольку в памяти хранится полная иерархия объектов, в любой момент можно обратиться к любому из них, что является плюсом такого подхода. Однако при работе с большими JSON-файлами возникают проблемы с временными затратами на обработку и потреблением памяти, на пике в несколько раз, превышающее исходный размер файла, что может привести к аварийному завершению программы или значительной деградации процесса. И если время разбора можно ускорить с помощью специальных техник, как SIMD-оптимизации на низком уровне реализации отдельных парсеров, то проблемы, возникающие из-за материализации результата в памяти, это не решает [3].

Потенциально бесконечное масштабирование ОЗУ пропорционально размерам обрабатываемых JSON-файлов не может рассматриваться в качестве решения обозначенных проблем, поэтому активное развитие получили альтернативные подходы к обработке и представлению JSON. Частичная десериализация на основе определенной схемы является одним из таких подходов. Когда нет необходимости работать со всем набором данных, часть из них можно пропустить в процессе десериализации, получив на выходе более компактную структуру. Данный подход может сократить потребление памяти в несколько раз, особенно если отбрасываются большие объекты с одним или несколькими уровнями вложенности. Технически этот подход реализуется разными способами: требуется либо сразу определить контракт, в соответствии с которым парсер проходит весь входной JSON, но десериализует только нужные поля, либо частичный разбор происходит лениво, в зависимости от фактических обращений к данным в программе [4].

Однако и полная, и частичная десериализация JSON, как правило, демонстрируют линейный рост потребления памяти по мере увеличения размера входного файла. Устранить этот тренд позволяет потоковый парсинг, SAX-подобный разбор, при котором входные элементы обрабатываются последовательно без хранения всего документа целиком. Если данные представлены в виде массива объектов и задача допускает потоковую обработку, то в памяти удерживается лишь текущий элемент, что обеспечивает малое и слабо зависящее от размера файла пиковое потребление памяти. Такой подход эффективен при агрегировании, фильтрации, преобразовании и массовой записи результатов. Компромиссом в данном случае часто является рост времени разбора и усложнение логики, если требуется реализация сложной логики доступа к данным.

Отдельный подход, возникший в начале 2010-х годов, связан с изменением представления данных: вместо монолитного JSON-документа используется формат JSON Lines (JSONL), предусматривающий построчное размещение записей, разделителем служит символ перевода строки. Формат получил широкое распространение в системах, связанных с анализом и конвейерной обработкой больших данных. Например, в Apache Spark “набор данных в формате JSON” по умолчанию интерпретируется как набор строк, каждая из которых содержит самостоятельный JSON-объект [5]. Это позволяет построчно обрабатывать данные с относительно высокой эффективностью по памяти и времени.

Сравнение подходов в Python

Python обладает развитой экосистемой инструментов для работы с JSON. Сегодня существуют решения, позволяющие работать с каждым из вышеперечисленных подходов, а также дополнительный класс решений, связанный с оптимизацией особенностей Python. В стандартной библиотеке по умолчанию представлен модуль json, который имеет простой API и работает по принципу полной материализации JSON-документов в памяти. Существуют альтернативные устанавливаемые решения, работающие по такому же принципу. Одним из них является набирающий популярность парсер orjson, написанный на языке Rust и содержащий встроенные оптимизации, что позволяет ему работать значительно быстрее стандартного json в ряде сценариев. Другое решение, одно из самых быстрых из реализующих этот подход за счет использования SIMD-оптимизаций, — pysimdjson (simdjson). Библиотека для парсинга и сериализации данных msgspec представляет подход частичной десериализации с приведением типов данных. Потоковый разбор можно реализовать, используя библиотеку ijson (итеративный JSON), которая является одним из самых популярных и стабильных решений в области конвейерной обработки JSON на языке Python. Наконец, для работы с JSONL применяется библиотека jsonlines, специально оптимизированная под этот формат и позволяющая устанавливать пользовательский парсер JSON-структур.

Представленные измерения выполнены на изолированной виртуальной машине под управлением Ubuntu 24.04.3 LTS с характеристиками 2 vCPU на платформе Intel Ice Lake, 4 ГБ оперативной памяти, что соответствует типовым ресурсным ограничениям, при которых различия в пиковом потреблении памяти становятся принципиально важными. Используется интерпретатор CPython 3.12.3, как каноническая реализация Python, совместимая со всеми рассматриваемыми библиотеками для обработки JSON. Значимым свойством формата является допустимость незначащих пробельных символов между лексемами [1], что позволяет форматировать визуальное представление документа с помощью пробелов, табуляций и переносов строк. Таким образом, два JSON-файла одинакового размера с идентичными по структуре дан-

```
{
  "event_id": "bd0558b4-9828-4a61-883e-dd4112cc16df",
  "event_type": "add_to_cart",
  "session_id": "4e93127a-5fd4-4654-9eaa-87fd8b41e63b",
  "user_id": "b2ec7273-580f-4876-afaf-2ceafd4c656d",
  "device": "tablet",
  "items": [
    {
      "sku": "SKU-9253-yj",
      "qty": 3,
      "price": 698.52
    },
    {
      "sku": "SKU-0370-Ce",
      "qty": 3,
      "price": 307.32
    }
  ]
}
```


Рис. 1. Пример структуры синтетических данных, используемых для экспериментов

ными могут содержать разное количество элементов в зависимости от форматирования, что важно учитывать при генерации набора тестовых файлов.

Для эксперимента используются синтетические данные с фиксированной структурой, генерируемые с заданным значением зерна псевдослучайного генератора и записываемые в файлы с объемами 10, 50 и 100 МБ. Для каждого объема формируются файлы в двух широко используемых при работе с большими данными представлениях: компактный (без форматирования) JSON и JSON Lines. Файлы одинакового размера в данном случае содержат сопоставимое количество элементов. Для измерений используется библиотека pyperf, запуски для измерения времени выполнения и пикового потребления оперативной памяти происходят отдельно. Перед проведением измерений выполняется предварительная настройка системы посредством pyperf system tune. На время проведения эксперимента процесс привязывается к одному логическому ядру процессора.

На рисунке 2 представлены результаты сравнения различных подходов к разбору JSON. Анализ временных характеристик демонстрирует близкий к линейному рост времени обработки по мере увеличения размера входного файла для всех рассмотренных библиотек. Для классической полной десериализации (стандартный json) наблюдается устойчивый рост времени от долей секунды на 10 МБ до более одной секунды на 100 МБ, что соответствует ожидаемой линейной зависимости сложности от объема входных данных. Библиотека orjson показывает несколько лучшие результаты по времени, однако сохраняет аналогичный характер масштабирования. Представлено два решения на основе SIMD-оптимизаций: с полной и ленивой загрузкой данных при разборе. При полной загрузке данных (simdjson) результаты сопоставимы со стандартным решением. Ленивая загрузка (lazy simdjson) обеспечивает более низкое время выполнения относительно полной материализации структуры, что подтверждает эффективность частичного доступа к данным при отсутствии необходимости в постоянном доступе к полной иерархии объектов. Наилучшие показатели по времени разбора во всех экспериментах демонстрирует msgspec, что согласуется с предположением о снижении накладных расходов за счет выборочной десериализации по заранее заданной схеме, большая часть данных просто не была представлена в памяти. В данном случае сохранялись только идентификатор пользователя (user_id) и информация об устройстве (device). Это подтверждает возможности существенной оптимизации работы с JSON, если предполагается использование лишь некоторой части информации. Потоковый парсер ijson характеризуется наибольшим временем обработки, особенно при увеличении объема входных данных, что объясняется накладными расходами на итеративный разбор и отсутствием продвинутых оптимизаций, характерных для некоторых DOM-подходов. Таким образом, существенный выигрыш по памяти при работе с большими файлами достигается ценой увеличения временных затрат.

Анализ потребления оперативной памяти подтверждает различия между архитектурными подходами. Для реализаций полной десериализации (json, orjson, simdjson) наблюдается выраженный линейный рост RSS, причем пиковое потребление памяти в ряде случаев в несколько раз превышает размер исходного файла. Ленивая и частичная десериализация позволяют снизить пиковое потребление памяти, однако сохраняют тенденцию к его росту с увеличением объема данных. В противоположность этому потоковый разбор (ijson) демонстрирует независимость от размера файла, потому что в памяти удерживается лишь текущий обрабатываемый элемент и служебные структуры.

В целом результаты эксперимента подтверждают фундаментальный компромисс между временем выполнения и объемом используемой памяти. Подходы, основанные на полной материализации JSON-документа, обеспечивают удобство произвольного доступа к дан-

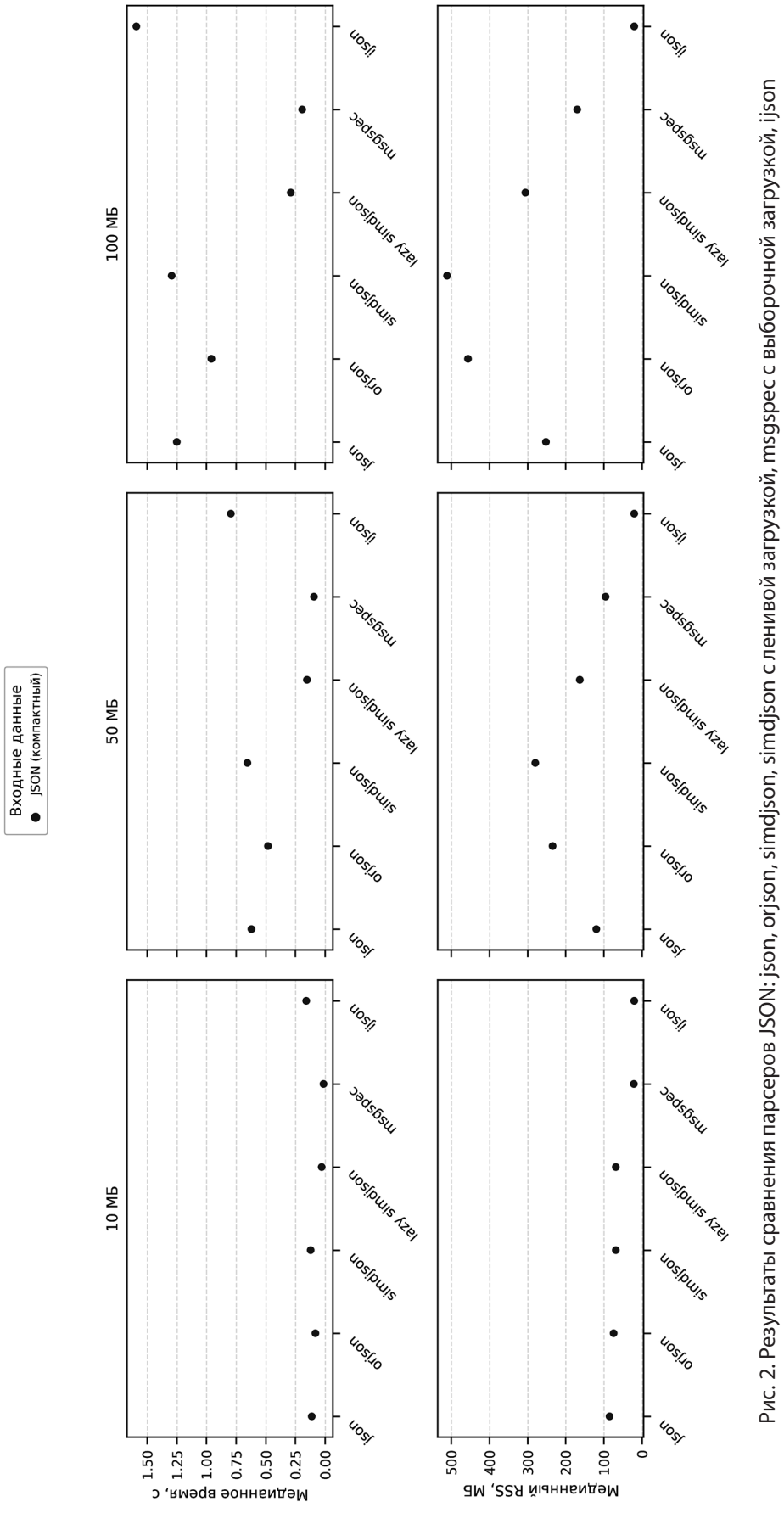


Рис. 2. Результаты сравнения парсеров JSON: json, orjson, simdjson, simdjson с ленивой загрузкой, msgspec с выборочной загрузкой, ijson

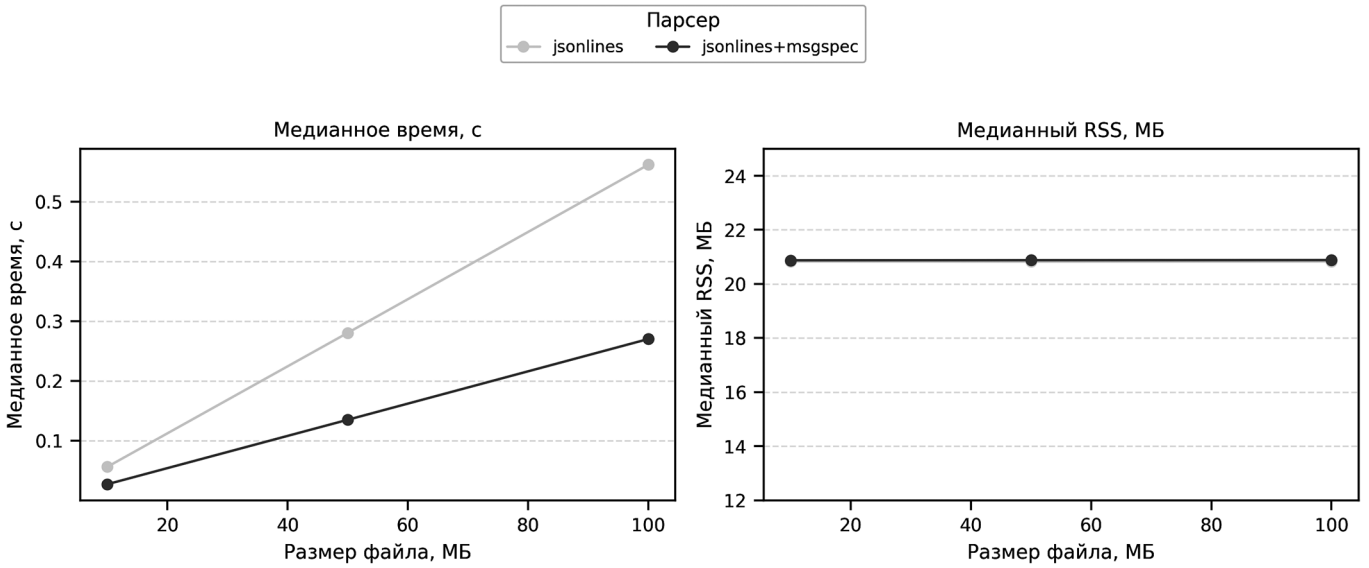


Рис. 3. Результаты сравнения парсеров JSONL: jsonlines, jsonlines с декодером msgspec для выборочной загрузки

ным и, как правило, более высокую скорость обработки, однако демонстрируют линейный рост потребления памяти. Потоковый разбор минимизирует использование ОЗУ, но сопровождается увеличенным временем выполнения и усложнением логики обработки, необходимостью работать с данными «на лету». Выборочная и ленивая десериализация занимают промежуточное положение, обеспечивая баланс между производительностью и эффективностью по ресурсам.

Из рисунка 3 видно, что использование альтернативного формата JSON Lines в определенных случаях позволяет компенсировать недостаток потокового разбора стандартного JSON, связанный с повышенными временными затратами на разбор. Поддерживая потребление памяти на одном и том же уровне, jsonlines позволяет сравнительно быстро обрабатывать большие JSONL-файлы, а результаты сопоставимы со скоростью лучших решений для JSON. Кроме того, jsonlines позволяет устанавливать пользовательский парсер вместо стандартного, совмещая удобство формата JSONL с ускоренным разбором msgspec.

Заключение

Рисунок 4 наглядно иллюстрирует компромисс между производительностью и потреблением памяти для различных подходов к обработке JSON. В таблице 1 приведены рекомендации по выбору подхода в зависимости от характеристик входных данных. Если размер входных данных большой и существует возможность обрабатывать их «на лету», а скорость работы приложения не является критическим фактором, то для исключения рисков, связанных с потреблением памяти, целесообразно использовать ijson или jsonlines (для данных в формате JSONL). Стоит отметить, что JSONL предпочтителен для

Таблица 1.

Сравнительный анализ и рекомендации по выбору подхода в зависимости от характеристик входных данных

Подход	Инструменты	Потребление памяти	Применение
DOM	json, orjson, simdjson	Может быть высоким; линейно зависит от входных данных	Небольшие файлы, необходимость произвольного доступа ко всей структуре
DOM с оптимизациями (ленивая загрузка, выборочная загрузка)	msgspec, simdjson (lazy)	Оптимизировано, но сохраняет линейный рост	Выборочный доступ к данным, известная схема данных
SAX	ijson	Константное	Большие файлы, фильтрация, агрегирование, ETL-процессы, аналитика
JSON Lines	jsonlines		

потоковой обработки, поскольку этот формат изначально задумывался с этой целью. Компромиссным решением являются парсеры, основанные на DOM-подходе с дополнительными оптимизациями: ленивой или выборочной загрузкой данных. Это лишает возможности произвольного доступа к данным из входного файла, однако может существенно ускорить разбор, сократив при этом объем потребляемой памяти. Наконец, классический подход с полной десериализацией при работе с JSON-файлами быстрее потокового разбора, но связан с рисками по памяти. Такой подход нежелателен при работе с входными данными, максимальный размер которых не определен заранее или с очень большими дан-

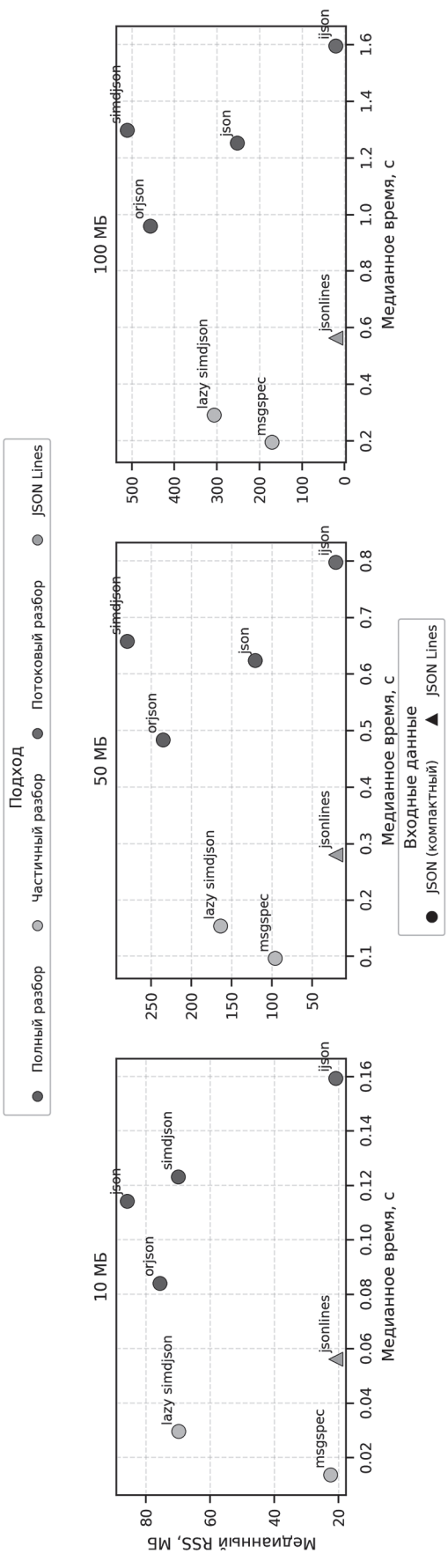


Рис. 4. Сопоставление по времени и потреблению памяти всех подходов с применением конкретных инструментов экосистемы языка программирования Python

ными, поскольку это практически неизбежно приведет к деградации или аварийному завершению процесса. Наиболее быстрым решением из этой группы остается orjson, однако он потребляет даже больше памяти, чем json из стандартной библиотеки, что требует дополнительной осторожности при работе с этим инструментом.

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

Версии библиотек

pyperf	2.9.0
orjson	3.11.5
pysimdjson	7.0.2
msgspec	0.20.0
ijson	3.4.0. post0
jsonlines	4.0.0
json	2.0.9 (Python 3.12.3)

ЛИТЕРАТУРА

1. Bray T. The JavaScript Object Notation (JSON) Data Interchange Format: Request for Comments 8259 (RFC 8259). — 2017. — DOI 10.17487/RFC8259. — URL: https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8259.html (дата обращения: 09.02.2026).
2. Ecma International. ECMA-404: The JSON Data Interchange Syntax: стандарт. — 2nd edition. — December 2017. — URL: https://ecma-international.org/publications-and-standards/standards/ecma-404 (дата обращения: 10.02.2026).
3. Langdale G., Lemire D. Parsing gigabytes of JSON per second // The VLDB Journal. — 2019. — Т. 28. №. 6. — С. 941–960.
4. Keiser J., Lemire D. On-demand JSON: A better way to parse documents? // Software: Practice and Experience. — 2024. — Т. 54, №. 6. — С. 1074–1086.
5. Apache Spark. JSON Files // Spark 4.1.0 Documentation. — URL: https://spark.apache.org/docs/latest/sql-data-sources-json.html (дата обращения: 10.02.2026).

© Ёлкин Григорий Валерьевич (gyolkin380@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.12

ОСОБЕННОСТИ БЕЗОПАСНОСТИ И ДОВЕРИЯ В ОТНОШЕНИИ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

SECURITY AND TRUST ISSUES RELATED TO DIGITAL TWIN TECHNOLOGY

M. Zhelenkova
Ya. Goldovsky

Summary. Among the cutting-edge technologies of Industry 4.0, one of the most notable is the digital twin, which has revolutionised industrial operations, shifting from direct physical control of assets to an increasingly automated, data-driven remote operating mode. This article examines issues related to protecting digital twins from cyber risks. The technical aspects of security and trust in digital twin systems are highlighted separately. A matrix of attack vectors on the digital twin infrastructure has also been compiled, and methods for neutralising threats are proposed. The author's classification of digital twins and their inherent levels of risk and threat are presented.

Keywords: digital twin, reliability, security, information, nodes.

Желенкова Маргарита Борисовна
Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва
vfhujirf5@mail.ru
Голдовский Яков Михайлович
Кандидат технических наук, доцент,
Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва
goldovsky_ym@mail.ru

Аннотация. Среди передовых технологий Индустрии 4.0 одной из наиболее заметных является цифровой двойник, который произвел революцию в работе промышленности, переведя от непосредственного физического управления активами ко все более автоматизированному удаленному режиму работы, основанному на данных. В статье рассмотрены вопросы защиты цифровых двойников от киберрисков. Отдельно выделены технические аспекты безопасности и доверия в системах цифровых двойников. Также составлена матрица векторов атак на инфраструктуру цифровых двойников и предложены методы нейтрализации угроз. Представлена авторская классификация цифровых двойников и присущие им уровни рисков и угроз.

Ключевые слова: цифровой двойник, надежность, безопасность, информация, узлы.

С недавней волной цифровизации последней тенденцией во многих отраслях промышленности является разработка систем и подходов, которые полезны не только на этапах концептуализации, прототипирования, тестирования и оптимизации дизайна, но и на этапе эксплуатации, с целью их использования на протяжении всего жизненного цикла продукта и, возможно, далеко за его пределами. Первоначально созданные для улучшения производственных процессов, цифровые двойники в настоящее время понимаются в качестве цифровых копий как живых, так и неживых объектов [1].

Эти высокоточные трёхмерные представления не ограничиваются только функцией визуализации, а представляют собой операционные модели, интегрированные с системами реального времени и предназначенные для поддержки процессов принятия решений и управления. Вместе с тем расширение функциональных возможностей цифровых двойников сопровождается возрастанием уязвимостей и требований к обеспечению их безопасности. Основные риски связаны не столько с самим цифровым двойником, сколько с массивами данных, необходимых для его разработки и актуализации.

Рост числа компонентов и высокая степень связности приводят к существенному увеличению поверхности атаки. Это объясняется с тем, что до 60–70 % цифровых двойников используют данные от IoT-устройств с ограниченными механизмами защиты [2]. Кроме того, существенную проблему представляет отсутствие формализованных метрик доверия: менее 20 % существующих решений обеспечивают верифицируемую оценку достоверности данных и корректности поведения цифрового двойника, что напрямую влияет на безопасность принимаемых на его основе решений [6]. Более детально технические аспекты безопасности и доверия в системах цифровых двойников представлены в таблице 1.

Принимая во внимание вышеизложенное, разработка подхода к безопасности и надежности цифровых двойников, который будет учитывать их уникальные характеристики и особенности эксплуатации, представляет собой актуальную научно-практическую задачу, которая и обусловила выбор темы данной статьи.

Над разработкой концепций, необходимых конечным пользователям и системным интеграторам для правильной оценки, внедрения и эксплуатации технологий и продуктов цифровых двойников с учетом управления киберугрозами и необходимости соблюдения нормативных требований, трудятся С.В. Кузнецова, А.С. Семенов, Р.М. Хамитов, Н.А. Натальсон, Rathee G., Saini H.,

Таблица 1.

Технические аспекты безопасности и доверия в системах цифровых двойников (составлено автором)

Технический аспект	Наблюдаемая проблема	Количественные оценки (по результатам исследований)	Интерпретация для цифровых двойников
Интеграция с сенсорными устройствами и киберфизическими системами	Рост поверхности атаки	До 60–70 % цифровых двойников используют данные с небезопасных IoT-узлов	Компрометация сенсоров приводит к искажению модели двойника
Передача данных в реальном времени	Уязвимости каналов связи	До 45 % промышленных протоколов не используют шифрование по умолчанию	Возможна подмена или инъекция данных в модель
Синхронизация физической и цифровой систем	Потеря целостности данных	До 30 % инцидентов связаны с нарушением временной согласованности данных	Снижается доверие к прогнозам цифрового двойника
Использование машинного обучения	Атаки на модели	До 25 % выявленных атак связано с преднамеренным искажением обучающих данных и извлечением информации о параметрах и внутреннем состоянии вычислительных моделей	Искажение обучающих данных приводит к неверным управленческим решениям
Многоуровневая архитектура	Недостаточная изоляция компонентов	Более 40 % архитектур не реализуют zero-trust подход	Компрометация одного уровня распространяется на весь двойник
Отсутствие формализованных метрик доверия	Неверифицируемость результатов	Менее 20 % систем имеют формальные показатели доверия	Результаты моделирования не могут быть доказательно подтверждены

Вопросы доверия, которые могут помешать цифровому двойнику обеспечить желаемую операционную функциональность с приемлемым уровнем качества, с учетом действующих рекомендаций к соблюдению кибербезопасности, прорабатываются Д.А. Сосфеновым, М.С. Шаховой, В.Ю. Малкиным, А.Т. Павленко, Chenyu Ge, Shengfeng Qin, Suveg V. Iyer.

Разработке анализаторов доверия и безопасности, предназначенных для оценки качества функционирования цифровых двойников с учётом таких критериев, как информационная безопасность, надежность, устойчивость к сбоям и достоверность результатов моделирования, посвятили свои публикации Н.Н. Сергеев, Д.В. Лазарев, Ю.В. Казанцев, А.Г. Русина, Marc van Dyck, Dirk Lüttgens, Frank T. Piller.

Несмотря на значительное количество публикаций и активный интерес ученых к рассматриваемой проблеме, еще не все вопросы получили свое должное освещение. В частности, отсутствуют единые количественные показатели, позволяющие объективно оценивать безопасность, целостность данных и корректность функционирования цифровых двойников в условиях динамически изменяющейся среды. Кроме того, недостаточно проработаны методы комплексного анализа угроз и устойчивости цифровых двойников, учитывающие взаимосвязь физических объектов, вычислительных моделей и потоков данных в реальном времени.

Таким образом, цель статьи заключается в изучении особенностей обеспечения безопасности и доверия в отношении технологии цифровых двойников.

Итак, как уже отмечалось ранее, цифровые двойники приносят существенные преимущества, такие как улучшение процесса принятия решений и сокращение времени простоя. Но они также сопряжены с новыми рисками для кибербезопасности. Чем больше подключений имеет система, тем больше вероятность того, что что-то пойдет не так. Одно единственное слабое место в цифровом двойнике может сделать уязвимой всю сеть.

В связи с этим актуализируется критическая необходимость внедрить механизмы, способные оценивать как надежность данных, так и надежность узлов, участвующих в коммуникации. В этом смысле надежность становится ключевой парадигмой для обеспечения устойчивости и защищенности в децентрализованных средах [4]. Доверие также считается необходимым условием для сотрудничества, и поэтому оно признано критическим фактором защиты цифровых двойников. Важно отметить, что доверие отличается от безопасности. Система может быть безопасной, но при этом сталкиваться с проблемами доверия. В то время как безопасность в первую очередь сосредоточена на таких аспектах, как регистрация цифрового двойника в архитектуре и обеспечение его защиты от взлома, доверие касается надежности услуг, обмениваемых между субъектами, и их поведения [5]. В контексте, где взаимодействия происходят автономно, понимание того, как может обрабатываться

информация, предоставляемая цифровым двойником, имеет фундаментальное значение. Это особенно важно в сценариях, где субъекты часто выступают не только в качестве потребителей, но и в качестве производителей данных, создавая таким образом новую роль «производитель-потребитель данных» [3]. В таких сценариях каждый узел может либо запрашивать услуги, либо предоставлять информацию другим, что делает оценку надежности более важной.

Интеграция информационных и операционных технологий в архитектуре цифровых двойников формирует качественно новый ландшафт угроз, выходящий за рамки традиционной информационной безопасности. Критическим фактором становится возможность перехода кибератаки в физическую плоскость, что влечет за собой риски повреждения технологического оборудования [7]. Обозначим некоторые из ключевых моментов, определяющих безопасность и надёжность цифровых двойников.

1. Целостность данных является одной из основных проблем. Точность цифрового двойника зависит от качества обрабатываемой им информации. Например, если цифровой двойник в сфере здравоохранения подвергнется взлому и будет предоставлять неверные данные о здоровье, это может привести к неправильному лечению или пропуску диагнозов. Обеспечение целостности данных посредством строгой проверки и безопасной передачи имеет жизненно важное значение.
2. Контроль доступа. Управление тем, кто может получить доступ к цифровому двойнику и изменять его, представляет собой критический момент. Слабый контроль доступа может привести к несанкционированным изменениям. Например, если цифровой двойник контролирует энергосеть и не защищён должным образом, несанкционированный доступ способен нарушить работу или создать угрозу безопасности. В данном случае целесообразным является внедрение надежных методов аутентификации, таких как многофакторная аутентификация и контроль доступа на основе ролей [9].
3. Уязвимости интеграции. Цифровые двойники часто взаимодействуют с другими системами, включая устройства IoT и облачные сервисы, что способно повлечь за собой бреши в системах защиты. Каждая точка подключения может стать потенциальным входом для злоумышленников. Например, если устройство IoT, подключенное к цифровому двойнику, скомпрометировано, оно с большой долей вероятности будет выступать в качестве шлюза для киберпреступников. Для обеспечения безопасности таких подключений требуется надежная сетевая безопасность и постоянный мониторинг [8].

Указанные выше факторы уязвимости требуют детализации на уровне конкретных технических сценариев реализации угроз. Для достижения этой цели была проведена систематизация специфических векторов атак, эксплуатирующих уязвимости каналов синхронизации и алгоритмов машинного обучения. Результаты анализа, сопоставляющие характер деструктивного воздействия на цифрового двойника с методами их технической нейтрализации, представлены в таблице 2.

Анализ данных, представленных в таблице 2, позволяет выявить ключевую закономерность: традиционные средства защиты периметра оказываются неэффективными против атак, направленных на физическую логику процесса. Предложенные методы нейтрализации базируются на необходимости перехода от сигнатурного анализа к поведенческой верификации. Учитывая отмеченное, сформулируем необходимое и достаточное условие доверенности цифрового двойника на основе предложенных технических решений.

Итак, система считается доверенной тогда и только тогда, когда расхождение между вектором состояния цифровой модели ($S_{digital}$) и вектором состояния физического объекта ($S_{physical}$) не превышает заданного порога допустимой погрешности (Δ_{max}) при любых внешних воздействиях:

$$\left| S_{digital}(t) - S_{physical}(t) \right| \leq \Delta_{max}$$

Для обеспечения выполнения этого условия предлагается внедрение модуля «Физический арбитр», который блокирует команды управления, нарушающие законы физики процесса, реализуя принцип «безопасность через физику». Однако практическая реализация описанного условия доверенности не является унифицированной и существенно зависит от архитектурной сложности объекта моделирования. С ростом иерархического уровня цифрового двойника — от локального компонента до распределенной сетевой структуры — возможность жесткой верификации физических параметров снижается, а поверхность атаки экспоненциально расширяется [10]. Следовательно, для построения адекватной стратегии защиты необходима стратификация рисков в зависимости от класса системы.

В рамках исследования выполнена классификация типов цифровых двойников по пяти иерархическим уровням. Результаты анализа (см. табл. 3) подтверждают наличие прямой корреляции между типом цифрового двойника и критичностью рисков информационной безопасности.

Анализ представленной в таблице 3 классификации позволяет выявить фундаментальную зависимость между уровнем архитектурной сложности цифрового

Таблица 2.

Матрица векторов атак на инфраструктуру цифровых двойников и предлагаемые методы нейтрализации угроз

Вектор реализации угрозы	Уязвимый компонент архитектуры ЦД	Характер деструктивного воздействия на физический объект управления	Предлагаемый метод нейтрализации угрозы
Нарушение временной синхронизации потоков данных	Канал двусторонней связи «физический актив — цифровая модель»	Дестабилизация контура управления: выдача команд на основе неактуального состояния системы, приводящая к возникновению резонансных явлений или механическому износу исполнительных механизмов	Внедрение механизма валидации временных меток с жестким отсечением пакетов, превышающих допустимый порог задержки на уровне граничных вычислений
Целенаправленное искажение обучающей выборки	Модуль машинного обучения / хранилище исторических данных	Скрытая деградация функциональности: формирование ложных паттернов нормального поведения, при которых система игнорирует предаварийные признаки (вибрацию, перегрев)	Применение методов федеративного обучения с криптографической проверкой обновлений градиентов модели для исключения влияния скомпрометированных узлов
Инверсия модели через программный интерфейс	Внешний интерфейс взаимодействия с цифровым двойником	Компрометация интеллектуальной собственности: восстановление параметров технологического процесса и алгоритмов управления третьими лицами путем анализа откликов системы	Использование алгоритмов дифференциальной приватности (добавление контролируемого шума) при формировании ответов на внешние запросы без снижения общей точности
Внедрение ложных данных в сенсорную сеть	IoT-датчики / Агрегаторы телеметрии	Маскировка критических состояний: отображение номинальных показателей функционирования в интерфейсе оператора при фактическом выходе оборудования за пределы эксплуатационных режимов	Внедрение перекрестной верификации входящих данных на основе физико-математических ограничений модели (проверка на соответствие законам сохранения энергии/массы)

Таблица 3.

Классификация типов цифровых двойников и оценка уровней риска их информационной безопасности (составлено автором)

Тип цифрового двойника (ЦД)	Объект реализации	Характерная угроза для данного типа ЦД	Влияние на доверенность к системе
Компонентный ЦД	Отдельные датчики, исполнительные механизмы	Генерация ложных данных: передача скомпрометированным сенсором недостоверной информации в систему	Снижение точности: искажение первичных входных параметров, приводящее к локальным ошибкам
ЦД актива	Технологическое оборудование, станки, агрегаты	Нарушение целостности прошивки: внедрение вредоносного кода в контроллеры оборудования	Снижение физической адекватности: расхождение в поведении реального актива и его цифровой модели
Системный ЦД	Производственные линии, цеха, сложные комплексы	Отказ в обслуживании: нарушение взаимодействия и синхронизации между элементами системы	Потеря доступности: невозможность оперативного управления комплексом в реальном времени
Процессный ЦД	Технологические и бизнес-процессы	Искажение логики процесса: манипуляция параметрами для снижения операционной эффективности	Компрометация интерпретируемости: принятие ошибочных решений на основе неверной аналитики процесса
Сетевой ЦД	Объединенные экосистемы и инфраструктуры	Атака на цепочку связей: компрометация через уязвимости смежных систем и шлюзов	Глобальная потеря устойчивости: критические сбои на уровне всей инфраструктуры

двойника и характером актуальных угроз информационной безопасности. Прослеживается четкая тенденция трансформации вектора атак по мере масштабирования системы: если на уровне компонентов и активов доминируют риски нарушения целостности первичных данных и физической адекватности модели, то при переходе к процессным и сетевым уровням угрозы смещаются в плоскость логической дестабилизации и нарушения устойчивости межсистемных связей.

Подводя итоги проведенному исследованию, можно отметить следующее — цифровые двойники преобразуют отрасли и открывают огромный потенциал для оптимизации и повышения эффективности. Поэтому по мере

развития цифровых двойников стратегии кибербезопасности должны идти в ногу со временем.

В статье выделены технические аспекты безопасности и доверия в системах цифровых двойников. Также на основании сопоставления характера деструктивного воздействия на цифровые копии с методами их технической нейтрализации, составлена матрица векторов атак на инфраструктуру цифровых двойников и предлагаемые методы нейтрализации угроз. Отдельно предложена классификация типов цифровых двойников и оценка уровней риска их информационной безопасности.

Будущие направления исследований включают в себя анализ возможностей использования технологии блокчейн и передовых методов шифрования для повышения общей безопасности систем цифровых двойников. Масштабируемость остается важным фактором, побуждающим исследователей разрабатывать решения, адаптируемые к сложностям крупномасштабных внедрений. Механизмы адаптации и отказоустойчивости в режиме реального времени также требуют внимания, чтобы обеспечить динамическое реагирование мер безопасности на развивающиеся угрозы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов Е.В. Цифровые двойники в управлении техническими системами: современные тенденции и перспективы развития // Научный Лидер. 2025. № 30 (231). С. 17–21.
2. Ванюрихин Ф.Г. Инструменты оценки рисков цифровых двойников промышленных предприятий // Горизонты экономики. 2022. № 6 (72). С. 119–122.
3. Гринева Н.В. Анализ основных структурных компонентов интеллектуального промышленного производства // Проблемы экономики и юридической практики. 2025. Т. 21. № 4. С. 142–153.
4. Лазорин Д.С., Правиков Д.И. Защищенность киберфизической системы на основе цифрового двойника через оценку качества управления // Автоматизация и информатизация ТЭК. 2024. № 2 (607). С. 43–47.
5. Лукашенко Д.В. Цифровые двойники в автоматизации технологических процессов: современные тенденции и перспективы // Естественные и технические науки. 2025. № 8 (207). С. 92–94.
6. Krishnaveni S., Sivamohan S. TwinSec-IDS: An Enhanced Intrusion Detection System in SDN-Digital-Twin-Based Industrial Cyber-Physical Systems // Concurrency and Computation: Practice and Experience. 2024. Volume 37, Issue 3. P. 76–82.
7. Sibona F., Harrison N., Wallace N. A Framework to Enable Eco-Cyber-Physical Systems for Robotics-Focused Digital Twins in Smart Farming // Journal of Field Robotics. 2025. Vol. 42. No. 6. P. 54–59.
8. Somers R., Walkinshaw N., Mark R. Hierons Configuration Testing of an Artificial Pancreas System Using a Digital Twin: An Evaluative Case Study // Software Testing, Verification and Reliability. 2025. Volume 35, Issue 2. P. 29–34.
9. Wärff Ch., Lindblom E. Automated data transfer for digital twin applications: Two case studies // Water Environment Research. 2024. Vol. 96. No. 7. P. 10–17.
10. Qin Zh., Liang Sh., Liu Q. Quantitative Assessment Model of IT Operation and Maintenance Operation Risk Based on the Digital Twin Model // Scientific Programming. 2022. No. 20. P. 23–29.

© Желенкова Маргарита Борисовна (vfhujirf5@mail.ru); Голдовский Яков Михайлович (goldovsky_ym@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.13

ГИБРИДНЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В УПРАВЛЕНИИ ЗПИФ: ИНТЕГРАЦИЯ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И СИСТЕМЫ ПРАВИЛ В КОНТУРЕ КОМПЛАЕНСА

HYBRID INTELLIGENCE IN CLOSED-END MUTUAL FUND MANAGEMENT: INTEGRATING MACHINE LEARNING AND A RULES SYSTEM IN THE COMPLIANCE FRAMEWORK

M. Zakaryukin

Summary. Managing a closed-end mutual fund (CIIF) is a task involving managing an organizational system in which investment decisions must simultaneously ensure economic feasibility, compliance with regulatory and contractual restrictions, reproducibility of the approval process, and the possibility of subsequent audit. The purpose of this article is to develop and substantiate a methodological approach to constructing a hybrid decision support system (DSS) for a CIIF management company, combining a machine learning module for evaluation, and forecasting with a compliance rules framework, expert adjustments, and explainability. This paper utilizes methods of system analysis, management process modeling, and regulatory framework analysis for management companies and specialized depositories, as well as research findings on hybrid intelligence, explainable artificial intelligence (XAI), model risk management, and systems with human participation in the decision-making loop. The scientific novelty lies in the formalization of a hybrid decision-making system for closed-end mutual funds by separating constraints into hard compliance constraints and soft expert rules, introducing an operator for generating a final decision within the permissible range, and describing a degradation regime when confidence in the model decreases or drift is detected. The practical significance lies in the fact that the proposed approach defines a reproducible decision-making system design framework compatible with internal control requirements, control by the specialized depository, and regulator expectations for the responsible use of AI in the financial market.

Keywords: closed-end mutual funds, asset management, decision-making system, hybrid intelligence, rule-based control, compliance, specialized depository, explainable artificial intelligence, model risk management, human participation in the decision-making loop.

Закарюкин Максим Алексеевич
Аспирант,
Московский финансово-юридический университет
29249113@s.mfua.ru

Аннотация. Управление закрытым паевым инвестиционным фондом (ЗПИФ) представляет собой задачу управления организационной системой, в которой инвестиционное решение должно одновременно обеспечивать экономическую целесообразность, соблюдение нормативных и договорных ограничений, воспроизводимость процедуры согласования и возможность последующего аудита. Цель статьи состоит в разработке и обосновании методического подхода к построению гибридной системы поддержки принятия решений (СППР) для управляющей компании ЗПИФ, объединяющей модуль машинного обучения для оценивания и прогнозирования с контуром, правил комплаенса, экспертной корректировки и объяснимости. В работе использованы методы системного анализа, моделирования управленческих процессов, анализа нормативной базы деятельности управляющих компаний и специализированных депозитариев, а также результаты исследований по гибридному интеллекту, объяснимому искусственному интеллекту (XAI), управлению модельным риском и системам с участием человека в контуре принятия решения. Научная новизна заключается в формализации гибридной СППР для ЗПИФ через разделение ограничений на жесткие ограничения комплаенса и мягкие экспертные правила, введение оператора формирования итогового решения в допустимой области и описание режима деградации при снижении доверия к модели или выявлении дрейфа. Практическая значимость состоит в том, что предложенный подход задает воспроизводимую схему проектирования СППР, совместимую с требованиями внутреннего контроля, контроля со стороны специализированного депозитария и ожиданиями регулятора к ответственному применению ИИ на финансовом рынке.

Ключевые слова: ЗПИФ, управление активами, СППР, гибридный интеллект, контроль на основе правил, комплаенс, специализированный депозитарий, объяснимый искусственный интеллект, управление модельным риском, человек в контуре принятия решения.

Введение

Управление ЗПИФ целесообразно рассматривать как управление организационной системой, где решение является не прямым «выходом модели», а результатом взаимодействия управляющей компании, инвестиционного комитета, комплаенс-функции, специализированного депозитария, оценщиков, аудиторов и иных участников контрольно-процедурного контура. [1] В такой постановке качество решения определяется не только прогнозной силой аналитики, но и способностью системы обеспечить допустимость действия, прослеживаемость процедуры и ответственность конкретных ролей.

Одновременно развитие ИИ и машинного обучения уже влияет на финансовый рынок. Банк России фиксирует рост интереса организаций к использованию интеллектуальных систем, но подчеркивает необходимость доверия, управляемости и контроля рисков. Практические кейсы применения алгоритмической аналитики в инвестиционной деятельности на российском рынке также уже появляются, хотя чаще всего речь идет не об автономном управлении, а о поддержке отбора и структурирования решений. [14, 15]

Для ЗПИФ проблема особенно остра. С одной стороны, фонды недвижимости, комбинированные фонды и иные альтернативные стратегии нуждаются в адаптивной аналитике, способной работать с неоднородными и частично неполными данными. С другой стороны, именно в этих сегментах высока роль инвестиционной декларации, ограничений по структуре имущества, процедур согласования и контроля распоряжения активами со стороны специализированного депозитария. Это делает «чистый ML» недостаточным как с регуляторной, так и с организационной точки зрения.

Не менее ограниченным оказывается и подход, основанный только на правилах. Он обеспечивает интерпретируемость и дисциплину ограничений, однако плохо масштабируется в среде с меняющимися рыночными режимами, сложными нелинейными связями и необходимостью работать с разнородной информацией. Поэтому для задач управления ЗПИФ исследовательски и методологически оправдан переход к гибридному интеллекту, в котором человек, модель и формализованные правила выполняют разные, но взаимодополняющие функции. [2–4]

Объект исследования — процессы поддержки принятия решений в управлении паевыми инвестиционными фондами на примере ЗПИФ как организационно регламентированной управленческой деятельности.

Предмет исследования — методы построения гибридной СППР, объединяющей модуль машинного обучения для оценивания и прогнозирования, контур правил контроля допустимости и блок объяснимости решения, применительно к управляющей компании ЗПИФ.

Цель исследования — разработать и обосновать методический подход к построению гибридной СППР для управляющей компании ЗПИФ, обеспечивающей адаптивную аналитику при гарантированном соблюдении жестких ограничений, воспроизводимости и объяснимости решений.

Гипотеза исследования состоит в том, что для управления ЗПИФ наилучший баланс между адаптивностью аналитики и управляемостью достигается не «чистыми» подходами, а гибридной СППР, где модуль машинного обучения генерирует оценку и ранжирование альтернатив, а контур правил обеспечивает соблюдение ограничений, экспертную корректировку, утверждение человеком в контуре принятия решения и формирование аудиторского следа.

Научная новизна работы заключается в следующем: во-первых, предложена формальная модель гибридной СППР для УК ЗПИФ с явным разделением ограничений на жесткие и мягкие; во-вторых, введен оператор формирования итогового решения в допустимой области; в-третьих, обоснован резервный режим как обязательный элемент управляемости при деградации или дрейфе модуля машинного обучения; в-четвертых, предложен набор метрик эффективности, ориентированных не только на точность прогнозов, но и на комплаенс, практику ручного отклонения рекомендаций и аудируемость.

Практическая значимость работы состоит в том, что предложенный подход задает воспроизводимую схему проектирования СППР для УК ЗПИФ, совместимую с требованиями внутреннего контроля, контроля специализированного депозитария и общими принципами ответственного применения ИИ на финансовом рынке.

Материалы и методы

Исследование выполнено методами системного анализа и моделирования управленческих процессов, дополненными анализом нормативной базы деятельности инвестиционных фондов, управляющих компаний и специализированных депозитариев, а также сравнительным анализом работ по гибридному интеллекту, объяснимому искусственному интеллекту (XAI), системам с участием человека в контуре принятия решения и управлению модельным риском. [2–13]

Методически статья опирается на представление ЗПИФ как организационной системы, в которой результативность решения определяется совокупностью трех контуров: аналитического, нормативно-процедурного и контура ответственности. В этой логике задача СППР состоит не в замене человека, а в согласовании указанных контуров в единой процедуре подготовки и утверждения решения. [1-4]

Нормативно-процедурный контур управления ЗПИФ как система ограничений

Ключевая особенность управления ЗПИФ заключается в том, что управляющая компания действует в поле множественных ограничений. Базовый слой образуют требования Федерального закона «Об инвестиционных фондах», правила доверительного управления, инве-

стиционная декларация фонда и сопутствующие нормативные акты Банка России. Дополнительно решения проверяются через процедуры внутреннего контроля и контроль распоряжения имуществом фонда со стороны специализированного депозитария.

С управленческой точки зрения решения УК ЗПИФ должны одновременно быть:

- допустимыми — не нарушать жесткие ограничения;
- экономически обоснованными — соответствовать целям доходности, риска и ликвидности;
- воспроизводимыми — иметь понятную процедуру формирования и утверждения;
- объяснимыми — оставлять след причин, правил и факторов, повлиявших на итог;
- устойчивыми — не зависеть критически от сбоя или деградации отдельной модели.

Для целей построения СППР ограничения целесообразно разделить на три класса. Первый класс — нормативные и договорные ограничения: лимиты инвестиционной декларации, требования к составу и структуре имущества, правила определения стоимости чистых активов, правила совершения и контроля сделок. Второй класс — ограничения внутреннего контроля и управления конфликтом интересов, закрепляющие процедурные роли, эскалации, запреты и согласования. Третий класс — управленческие предпочтения и экспертные политики, не являющиеся безусловными запретами, но задающие политику поведения фонда внутри допустимой области.

Именно такое расслоение ограничений позволяет уйти от ложной альтернативы «модель против регуляторики». В гибридной СППР нормативно-процедурный контур не ослабляется, а, напротив, становится формализованной внешней рамкой, внутри которой модуль машинного обучения может повышать качество оценки альтернатив.

Формальная модель гибридной СППР для управляющей компании ЗПИФ

Рассмотрим дискретные моменты принятия управленческого решения $t \in T$, например, еженедельные или ежемесячные окна рассмотрения сделок, переоценок либо портфельных изменений. Пусть I_t — множество объектов, позиций или сделок, рассматриваемых фондом в момент t. Для каждого объекта $i \in I_t$ задан вектор признаков $x_i(t)$, а совокупность входных данных обозначим как $X_t = \{x_i(t) | i \in I_t\}$. Состояние фонда обозначим через s_t; оно включает структуру имущества, величину и динамику СЧА, обязательства, действующие лимиты, календарь платежей и результаты оценки.

Управляющее воздействие обозначим как a_t, где $a_t \in \mathbb{A}$, а $\mathbb{A}$ — множество допустимых действий в бизнес-процессе УК: одобрение сделки, отклонение, изменение лимита в разрешенном диапазоне, инициирование переоценки, вынесение на комитет, запуск процедуры проверки и т.д.

Модуль машинного обучения формирует оценку объекта или альтернативы, выявляя нелинейные зависимости в данных. В общем виде его выход можно представить следующим образом:

$$\hat{y}_i(t) = f_\theta(x_i(t), s_t)$$

Здесь $\hat{y}_i(t)$ — скоринговая или прогнозная величина, например, ожидаемая доходность, вероятность нежелательного события, рейтинг привлекательности или риск-профиль объекта. Параметр θ обозначает вектор обученных параметров модели. Формат модели не фиксируется: это может быть ансамбль деревьев, нейросеть, нейро-нечеткая модель типа ANFIS и др. [8] Для управляемости дополнительно вводится оценка доверия $q_i(t)$, отражающая калиброванную вероятность, интервал неопределенности либо согласованность ансамбля.

Множество жестких ограничений зададим как $C_h = \{c_j\}, j = 1,\ldots,m_h$. Каждое ограничение c_j проверяет допустимость действия a в контексте текущих данных X_t и состояния фонда s_t. Тогда допустимая область решений имеет вид:

$$\mathbb{D}_t = \{a \in \mathbb{A} c_j | (a, X_t, s_t) = 1, j = 1,\ldots,m_h\}$$

Жесткие ограничения отражают требования закона, нормативных актов, правил фонда, инвестиционной декларации, порядка определения СЧА, а также процедур контроля специализированного депозитария. Выход за пределы $\mathbb{D}_t$ в проектируемой СППР недопустим.

Мягкие экспертные правила обозначим как $R_s = \{r_k\}, k = 1,\ldots,m_s$. Они выражают управленческие предпочтения, риск-политику и эвристики инвестиционного комитета, которые могут корректировать решение внутри допустимой области. Каждому правилу соответствует штраф или функция корректировки $\pi_k(a, X_t, s_t)$.

Тогда базовая рекомендация модуля машинного обучения записывается как:

$$a_t^{(0)} = \operatorname{argmax}_{a \in \mathbb{A}} \Phi(a; \hat{y}_t)$$

где $\Phi(a; \hat{y}_t)$ — целевая функция, построенная на основе оценок модуля машинного обучения.

Итоговое решение в гибридной СППР формируется уже не на всем множестве $\mathbb{A}$, а только внутри допустимой области $\mathbb{D}_t$:

$$a_t^* = \arg\max_{a \in \mathbb{D}_t} \left[\Phi\left(a; \hat{y}_t\right) - \sum_{k=1}^{m_s} w_k \cdot \pi_k\left(a, X_t, s_t\right) \right]$$

Веса w_k отражают приоритеты риск-функции и инвестиционной политики. Смысл гибридизации при этом не сводится к «усреднению» модели и правил. Напротив, жесткие ограничения задают границы управления, мягкие правила задают политику поведения внутри этих границ, а модуль машинного обучения повышает адаптивность аналитики.

Если доверие к модели недостаточно высок или фиксируется статистический дрейф данных и качества, СППР должна переходить в режим деградации:

$$\text{if } q_t < \tau \text{ или } \text{drift}_t > \delta, \text{ then } a_t^* = \text{RuleOnly}\left(X_t, s_t\right)$$

Такой резервный режим означает, что модуль машинного обучения перестает быть основой решения и используется только как справочная аналитика либо временно выводится из контура до повторной валидации. [9, 10] С точки зрения управления организационной системой это принципиально: модель не должна быть единственной точкой отказа.

Для целей комплаенса и последующего аудита каждому решению сопоставляется пакет объяснений E_t, включающий версию данных и модели, рассчитанные $\hat{y}_t$ и q_t, перечень сработавших ограничений C_{act}, перечень примененных экспертных правил R_{act}, локальное объяснение части, основанной на машинном обучении и реквизиты лица или органа, утвердившего решение. [5-7]

$$E_t = \left\{ X_t, v_m, \hat{y}_t, q_t, C_{\{act\}}, R_{\{act\}}, Expl_{\{loc\}}, a_t, \tau_t \right\}$$

Практическая реализация гибридной СППР должна быть встроена в реальный управленческий контур УК и поддерживать роли управляющего, риск-менеджера, комплаенс-офицера, инвестиционного комитета и сотрудников, отвечающих за взаимодействие со специализированным депозитарием. Такой подход соответствует логике гибридного интеллекта: система не заменяет ответственного субъекта решения, а перераспределяет функции между аналитикой, правилами и человеком. [2–4]

Алгоритм функционирования гибридной СППР:

1. Сбор и подготовка данных. Формируются X_t и s_t из внутренних учетных систем, моделей оценки и внешних источников; одновременно проводится контроль полноты, актуальности и согласованности данных, фиксируется версия набора данных.
2. Оценивание модулем машинного обучения. Для рассматриваемых объектов или сценариев рассчитываются $\hat{y}_t$ и q_t; в журнал вносятся версия модели, параметры вывода модели и признаки, использованные в расчете.
3. Генерация кандидатов решения. На основе оценок, полученных модулем машинного обучения, строится множество кандидатных действий $a_t^{(0)}$: ранжирование объектов, предложение сделки, рекомендация по корректировке доли, выявление аномалии или триггер для переоценки.
4. Проверка жестких ограничений. Для каждого кандидата вычисляются c_j; решения, выходящие за пределы $\mathbb{D}_t$, блокируются либо корректируются. На этом шаге недопустимо выдавать «финальную» рекомендацию, если она нарушает инвестиционную декларацию, правила фонда или процедурные запреты.
5. Применение мягких правил. Внутри $\mathbb{D}_t$ учитываются требования диверсификации, ограничения по концентрации риска, предпочтения по горизонту, стадии проекта и иные управленческие политики.
6. Формирование итогового решения и объяснения. Рассчитывается a_t^* и собирается пакет E_t с указанием причин блокировок, корректировок и ключевых факторов оценки, полученной модулем машинного обучения.
7. Человек в контуре утверждения. Итоговое решение выносится на ответственное лицо или комитет с возможностью принять, отклонить или принять как исключение. Исключение требует расширенного обоснования и отдельного протоколирования. [3, 10]
8. Журналирование и обратная связь. Сохраняются входные данные, выходы модели, активированные правила, итоговое решение, результат исполнения и последующая обратная связь для постанализа, переобучения и коррекции правил.
9. Мониторинг качества и деградация. Отслеживаются качество модели, дрейф данных, число ручных отклонений рекомендаций системы и число исключений; при превышении порогов система переводится в резервный режим до повторной проверки. [9, 10]

Критерии эффективности и протокол валидации гибридной СППР

Для гибридной СППР в управлении ЗПИФ недостаточно оценивать только точность прогноза. Управленческая система должна быть надежной, контролируемой и проверяемой, поэтому набор метрик должен отражать сразу несколько классов эффектов.

Первый класс — метрики качества оценивания модулем машинного обучения: MAE, RMSE и MAPE для прогнозных задач; AUC-ROC, precision/recall и Brier score для классификации рисковых событий; NDCG и hit-rate@k для задач ранжирования.

Второй класс — метрики комплаенса и допустимости: доля исходных рекомендаций модуля машинного обучения, конфликтующих с жесткими ограничениями; доля случаев, в которых комплаенс-фильтр существенно корректирует предложение модели; доля фактических нарушений ограничений после внедрения. Последняя метрика должна быть нулевой по проектному требованию.

Третий класс — метрики управляемости организационного контура: время подготовки решения до вынесения на комитет; доля ручных отклонений рекомендаций по отношению к числу рекомендаций; доля решений, принятых как исключение; распределение причин исключений по категориям «комплаенс», «качество данных», «рыночное событие», «неуверенность модели».

Четвертый класс — метрики объяснимости и аудируемости: доля решений, для которых сохранены версия данных и модели, активированные ограничения, активированные правила и реквизиты утверждения; стабильность локальных объяснений при повторном прогоне на идентичной версии модели; полнота пакета E_t. [5-7]

Сравнительный профиль трех вариантов организации СППР представлен в табл. 1. Для ЗПИФ важно не столько максимизировать автономность, сколько обеспечить дисциплину допуска решений и воспроизводимость контрольно-процедурного контура.

Таблица 1 показывает, что гибридный подход следует рассматривать как организационно-технологический компромисс: аналитическая эффективность модели в нем подчинена требованиям допустимости, воспроизводимости и распределенной ответственности. [2–5]

При отсутствии готовой эмпирики корректным исследовательским решением является не фабрикация результатов, а описание воспроизводимого протокола апробации.

Первый компонент такого протокола — ретроспективное тестирование по пошаговой схеме. На каждом шаге модель обучается на данных до момента t, генерирует $\hat{y}_t$ и $a_t^{(0)}$, после чего применяется комплаенс-контур и мягкие правила, формируется a_t^*, а затем фиксируются метрики всех четырех групп. Сравнение проводится для трех конфигураций: только на основе правил, только на основе машинного обучения и гибридная СППР.

Таблица 1.

Сравнение подходов к СППР в управлении ЗПИФ

Критерий	Только машинное обучение	Только правила	Гибридная СППР
Адаптивность к новым данным и режимам рынка	Высокая	Низкая	Высокая при контролируемом внедрении
Гарантированное соблюдение жестких ограничений	Не гарантируется без внешнего фильтра	Гарантируется	Гарантируется
Объяснимость итогового решения	Ограниченная без средств XAI	Высокая	Высокая за счет правил и средств XAI
Устойчивость к дрейфу и сбоям модели	Низкая без контура управления моделью	Высокая, но с потерей адаптивности	Высокая при мониторинге и резервном режиме
Стоимость сопровождения	Средняя/высокая	Высокая при росте числа правил	Высокая, но оправданная для сложного контура
Пригодность для управления ЗПИФ	Ограниченная	Ограниченная	Наиболее пригодная

Второй компонент — сценарная валидация на типовых управленческих случаях: предложение сделки, нарушающей лимит инвестиционной декларации; снижение оценочной стоимости или выявление значимого рискового события; неуверенность модели или статистический дрейф; принятие решения как исключения по итогам заседания комитета. В каждом сценарии проверяется корректность блокировки, перенаправления, объяснения и протоколирования.

Обсуждение практической применимости, ограничений и рисков внедрения

Гибридная СППР имеет практический смысл только при соблюдении принципа контролируемого внедрения: модуль машинного обучения не отменяет юридическую ответственность, не подменяет инвестиционный комитет и не исключает контур специализированного депозитария, а встраивается в него как аналитический модуль. [11-13]

Первый риск внедрения связан с дефицитом и неоднородностью данных. Для многих ЗПИФ характерны редкие наблюдения по сделкам, зависимость от отчетов оценщиков, частичная неструктурированность описаний объектов и высокий уровень предметной специфики. В этих условиях значение слоя правил возраста-

ет: именно он обеспечивает нижнюю границу качества и допустимости решения, когда статистическая база для машинного обучения ограничена.

Второй риск — дрейф и деградация модели. Изменение макроусловий, юридического режима активов, структуры спроса и ликвидности может быстро ухудшать качество модели. Поэтому мониторинг дрейфа данных и переход в резервный режим должны считаться обязательными функциями, а не факультативным улучшением. [9, 10]

Третий риск — модельный риск в широком смысле. Для финансовых приложений недостаточно просто обучить модель; требуются процедуры независимой проверки, контроля версий, ограничений использования, переобучения и вывода модели из эксплуатации. Логика SR 11–7, хотя и разработана для банковского надзора, остается полезным методологическим ориентиром для построения контура управления жизненным циклом модели. [10]

Четвертый риск связан с объяснимостью. Локальные объяснения, формируемые средствами XAI, должны дополнять, а не подменять нормативные причины решения. [5-7] Формулировка «сделка отклонена из-за нарушения лимита» и формулировка «скоринг снижен из-за факторов A, B и C» относятся к разным уровням объяснения и должны присутствовать в пакете одновременно.

Заключение

1. Управление ЗПИФ представляет собой задачу управления организационной системой с жесткой нормативной и процедурной надстройкой, в которой допустимость решения и воспроизводимость его обоснования столь же важны, как и аналитическая сила модели. [2-10]
2. «Чистые» подходы обладают принципиальными ограничениями: машинное обучение повышает адаптивность, но без внешнего контура создает риски непрозрачности, дрейфа и модельного риска; системы, основанные на правилах, обеспечивают интерпретируемость и комплаенс, но ограничены в способности выявлять новые закономерности на сложных данных.
3. Предложенная гибридная СППР для УК ЗПИФ формализована через оценивание модулем машинного обучения, множество жестких ограничений комплаенса, множество мягких экспертных правил, оператор формирования итогового решения в допустимой области и резервный режим при снижении доверия к модели.
4. Для оценки эффективности гибридной СППР предложен набор метрик, ориентированный на управляемость: конфликтность рекомендаций, доля ручных отклонений и исключений, полнота трассировки, воспроизводимость объяснений и устойчивость к дрейфу. Такой набор лучше соответствует задаче управления ЗПИФ, чем оценка одной лишь прогнозной точности. [9-13].

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами / Д.А. Новиков. — Москва: Физматлит, 2007. — 584 с.
2. Dellermann D. Hybrid Intelligence / D. Dellermann, P. Ebel, M. Söllner, J.M. Leimeister // Business & Information Systems Engineering. — 2019. — Vol. 61, No. 5. — P. 637–643.
3. Kamar E. Directions in Hybrid Intelligence: Complementing AI Systems with Human Intelligence / E. Kamar // Proceedings of the Twenty-Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-16). — 2016. — P. 4070–4073.
4. Wu X. A survey of human-in-the-loop for machine learning / X. Wu, L. Xiao, Y. Sun [et al.] // Future Generation Computer Systems. — 2022. — Vol. 135. — P. 364–381.
5. Barredo Arrieta A. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities, and challenges toward Responsible AI / A. Barredo Arrieta, N. Díaz-Rodríguez, J. Del Ser [et al.] // Information Fusion. — 2020. — Vol. 58. — P. 82–115.
6. Ribeiro M.T. «Why Should I Trust You?»: Explaining the Predictions of Any Classifier / M.T. Ribeiro, S. Singh, C. Guestrin // Proceedings of the 2016 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Demonstrations (NAACL-HLT). — 2016. — P. 1135–1144.
7. Lundberg S.M. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions / S. M. Lundberg, S.-I. Lee // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2017. — Vol. 30. — P. 4765–4774.
8. Jang J.-S.R. ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System / J.-S. R. Jang // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. — 1993. — Vol. 23, No. 3. — P. 665–685.
9. Gama J. A Survey on Concept Drift Adaptation / J. Gama, I. Žliobaitė, A. Bifet [et al.] // ACM Computing Surveys. — 2014. — Vol. 46, No. 4. — P. 1–37.
10. Board of Governors of the Federal Reserve System. SR 11-7: Guidance on Model Risk Management. — Washington, D.C., 2011. — 24 p.
11. Financial Stability Board. The Financial Stability Implications of Artificial Intelligence: report. — 14.11.2024. — URL: https://www.fsb.org/2024/11/the-financial-stability-implications-of-artificial-intelligence (дата обращения: 10.03.2026).
12. OECD. Generative Artificial Intelligence in Finance / OECD. — Paris: OECD Publishing, 2023. — 78 p.
13. Leitner G. The rise of artificial intelligence: benefits and risks for financial stability / G. Leitner, C. Bakos, D. Ianiro [et al.] // ECB Financial Stability Review. — May 2024. — URL: https://www.ecb.europa.eu/press/financial-stability-publications/fsr/special/html/ecb.fsrart202405_02~58c3ce5246.en.html (дата обращения: 10.03.2026).
14. ИИ подберет объект недвижимости для инвестиций // ComNews. — 25.12.2023. — URL: https://www.comnews.ru/digital-economy/content/230887/2023-12-25/2023-w52/1012/ii-podberet-obekt-nedvizhimosti-dlya-investiciy (дата обращения: 10.03.2026).
15. УК «Альфа-Капитал» запустила стратегию с использованием искусственного интеллекта // ТАСС. — 02.08.2023. — URL: https://tass.ru/ekonomika/18426423 (дата обращения: 10.03.2026).

© Закарюкин Максим Алексеевич (29249113@s.mfua.ru)

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.16

СИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫМИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМИ ТРАЕКТОРИЯМИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО СЛЕДА И ОГРАНИЧЕНИЙ КАЧЕСТВА ДАННЫХ

SYSTEMIC MODEL FOR MANAGING INDIVIDUAL LEARNING PATHWAYS BASED ON DIGITAL FOOTPRINTS AND DATA QUALITY CONSTRAINTS

E. Ignatova
I. Kulikova

Summary. The paper proposes a systemic model for managing individual learning pathways in which digital footprint data is used only after checking completeness, timeliness, validity, consistency, and lawful use. The model integrates a data-source registry, a quality-control block, learner-state estimation, a pathway generation mechanism, pedagogical validation, and a feedback loop. The novelty lies in the principle of conditional personalisation: strong interventions are allowed only when data quality exceeds a threshold; otherwise, the system switches to soft or manual decision modes.

Keywords: individual learning pathway, digital footprint, data quality, learning analytics, educational management, higher education.

Игнатова Елена Ивановна
Кандидат технических наук, доцент, Санкт-петербургский государственный морской технический университет, г. Санкт-Петербург
ignatova384756@gmail.com
Куликова Ирина Викторовна
Кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования МИРЭА — Российский технологический университет
irina-vikt@yandex.ru

Аннотация. Предложена системная модель управления индивидуальными образовательными траекториями, в которой данные цифрового следа рассматриваются не как автономная основа рекомендаций, а как ресурс, допускаемый к использованию только после оценки полноты, своевременности, достоверности, согласованности и правомерности. Модель объединяет реестр источников, блок контроля качества, оценку состояния обучающегося, механизм генерации вариантов траектории, педагогическую валидацию и контур обратной связи. Новизна состоит в формализации принципа условной персонализации: сильные управленческие воздействия разрешаются лишь при достижении порога качества данных, иначе система переводит решение в мягкий или ручной режим. Практическая значимость показана на сценариях высшей школы.

Ключевые слова: индивидуальная образовательная траектория, цифровой след, качество данных, учебная аналитика, управление образовательным процессом, высшее образование.

Введение

Цифровизация высшей школы изменила структуру управленческой информации о ходе обучения. Помимо итоговых оценок университет получает журналы LMS, результаты поэтапного контроля, данные электронного портфолио, события обращения к материалам и коммуникационные следы. Это делает индивидуальную образовательную траекторию управляемой на основе данных, но одновременно повышает зависимость решений от качества собираемой информации [2–4; 8].

По данным НИУ ВШЭ, в 2023 г. на программах высшего образования, содержащих ИИ-компонент, обучались сотни тысяч студентов, что отражает быстрый рост цифровой насыщенности образовательной среды [2]. В этих условиях цифровой след становится не вспомогательным, а системообразующим источником сведений для мониторинга риска, выбора элективов и настройки темпа обучения. Однако международные обзоры показывают, что расширение практик data-driven-управления опережает созревание режимов защиты и интерпретации данных [1; 8].

Цель статьи состоит в разработке системной модели управления ИОТ, в которой аналитика цифрового следа встроена в контур принятия решений через пороги качества данных и режимы безопасного отклонения. Такой подход согласуется с логикой проектирования интеллектуальных информационных систем, где обработка данных и управленческое действие рассматриваются как единая архитектура [7; 9].

Обзор литературы и постановка проблемы

Российские исследования последних лет можно разделить на три группы. Первая группа посвящена циф-

ровому профилю и цифровому следу как основе персонализации. В этих работах показано, что траектория обучающегося может настраиваться на основе интеграции событий из разных контуров, но качество результата зависит от согласованности источников и правил агрегации [3; 4].

Вторая группа описывает создание инфраструктуры «умного университета», университетских систем оценки компетенций и средств интеллектуальной поддержки управления образовательным процессом [5-7]. Здесь особенно важно, что рекомендации должны быть связаны не только с прогнозом успешности, но и с объяснимостью выбора. Международные обзоры learning analytics подтверждают тот же вывод: эффективность аналитики определяется не объемом данных, а тем, насколько качественно они встроены в цикл педагогического решения [8].

Третья группа акцентирует ограничения исходных массивов. Для образовательных систем типичны неполнота, временная рассинхронизация, дублирование записей, ложная активность и разрыв между наблюдаемым поведением и реальным состоянием обучающегося [1; 5; 10]. Следовательно, цифровой след нельзя использовать как прямой эквивалент учебной успешности: он нуждается в предварительной верификации и педагогической интерпретации.

Проблема, однако, состоит не только в дефектах исходных данных, но и в том, что в образовательной практике нередко смешиваются разные уровни наблюдения: поведенческие события, результаты контроля, экспертные заключения преподавателя и административные записи. Если такие сведения агрегируются без различения их происхождения и силы доказательства, система начинает приписывать одинаковый вес сигналам разной природы. Например, редкие входы в LMS могут быть следствием индивидуального стиля работы, а не низкой мотивации; высокие промежуточные баллы могут отражать успешность выполнения типовых заданий, но не гарантировать устойчивого понимания сложного материала. Отсюда возникает ключевая для данной статьи постановка проблемы: управление ИОТ должно опираться не на любой доступный цифровой след, а на структурированный профиль, в котором каждому классу данных приписан режим доверия, интерпретации и допустимого использования. Такое смещение от простой аккумуляции сведений к управлению качеством и доказательной силой данных позволяет перевести дискуссию о персонализации из плоскости технологической моды в плоскость системного проектирования образовательного процесса [3; 4; 7; 8].

Системная модель

Предлагаемая модель описывается кортежем

$$M = <O, S, D, Q, A, U, C, G>, \quad (1)$$

где O — цели программы; S — пространство состояний обучающегося; D — реестр источников цифрового следа; Q — показатели качества данных; A — аналитические процедуры; U — множество допустимых управленческих действий; C — организационные и правовые ограничения; G — контур обратной связи. В отличие от упрощенных рекомендательных схем блок Q расположен между сбором данных и выбором воздействия, поэтому решение допускается только после проверки качества входного профиля [7; 10].

Состояние обучающегося задается вектором

$$x_i(t) = <k_i, e_i, p_i, r_i, q_i>, \quad (2)$$

где k_i — академическое продвижение, e_i — вовлеченность, p_i — темп освоения, r_i — риск затруднений, q_i— интегральный показатель качества данных. Последняя переменная принципиальна: если q_i ниже порога, система не должна выдавать сильную рекомендацию. Интегральная оценка формируется как взвешенная сумма полноты, своевременности, достоверности, согласованности и правомерности использования данных [1; 5; 6].

Управленческое правило имеет вид: при $q_i >= \tau$ система формирует один из вариантов траектории; при $q_i < \tau$ решение переводится в безопасный режим — дополнительную диагностику, мягкую рекомендацию либо ручную педагогическую валидацию. Тем самым модель реализует принцип условной персонализации: персонализация допустима не всегда, а только при доказанной надежности данных [7; 9].

С практической точки зрения блок Q целесообразно реализовывать как отдельный слой правил и метрик, а не как скрытый внутренний параметр аналитической модели. В его состав могут входить коэффициент покрытия профиля по обязательным источникам, индекс временной актуальности записей, показатель межсистемной согласованности, доля событий, подтвержденных альтернативными контурами, а также маркер правомерности использования конкретного набора данных (таблица 1). Тогда даже при высокой прогностической силе алгоритма система не сможет рекомендовать жесткое траекторное действие, если, например, данные получены с критической задержкой, не прошли дедупликацию или не обеспечивают репрезентативного охвата учебной активности. Для управления это принципиально: в образовательной среде ошибка вмешательства обычно дороже, чем отказ от автоматической рекомендации.

Поэтому модель должна поддерживать не только выбор лучшего маршрута, но и выбор степени уверенности в самом решении. Тем самым в систему вводится двухконтурная логика: первый контур отвечает за оценку состояния обучающегося, второй — за проверку допустимости управленческого воздействия на основании качества данных и характера потенциальных последствий [5; 7; 9; 10].

Таблица 1.

Управленческие реакции системы в зависимости от дефекта качества данных

Измерение	Типичный дефект	Риск для ИОТ	Реакция системы
Полнота	не учитываются офлайн-работы	ложный академический риск	дообогащение профиля
Своевременность	задержка оценок и логов	решение по устаревшим данным	отсрочка рекомендации
Достоверность	фоновые клики, автообновление	искаженная вовлеченность	фильтрация аномалий
Согласованность	разные идентификаторы	разрыв профиля студента	ручная валидация

Практическое применение

В смешанном обучении система может обнаружить низкую активность в LMS и интерпретировать ее как риск неуспеваемости. Если блок качества фиксирует, что в профиль не включены очные лабораторные работы и устные микроконтроли, рекомендация о переводе на компенсирующий маршрут блокируется. После дообогащения профиля риск может оказаться ложным. Для университета ценность модели состоит именно в предотвращении ошибочного вмешательства, а не только в повышении точности прогноза [6; 7].

Аналогично при рекомендации элективов система должна различать содержательный интерес студента и технический шум. Если публикационная активность привязана к старому аккаунту или временные метки обновлены с задержкой, решение переводится в мягкий режим до нормализации профиля. Такой режим особенно важен для магистратуры и проектных дисциплин, где цена ошибочной рекомендации высока.

Еще один значимый сценарий связан с ранним выявлением риска академической дезадаптации первокурсников. На первых неделях обучения цифровой след обычно крайне фрагментарен: часть студентов еще не включилась в электронные сервисы, часть работает через мобильные каналы, часть демонстрирует активность только в аудиторном взаимодействии. Если в этот период система начнет автоматически относить обучающихся к группе риска исключительно на основе журналов LMS, она создаст большой массив ложноположительных срабатываний. Предлагаемая модель требует сначала оценить, какие компоненты профиля уже накоплены, какие типы событий отсутствуют и какие выводы вообще допустимы на данном горизонте наблюдения. В результате система может выдать не директивное решение, а запрос на дополнительную диагностику: короткое интервью куратора, внеплановый входной тест, анализ посещаемости очных занятий или верификацию источников идентификации. Такой режим снижает управленческий шум и делает цифровой след не самодовлеющим инструментом контроля, а элементом более широкой процедуры сопровождения обучающегося [4; 6; 7].

Обсуждение

Предлагаемая модель обладает тремя достоинствами. Во-первых, она связывает учебную аналитику с реальными механизмами управления, а не только с визуализацией показателей. Во-вторых, она снимает ложную альтернативу «алгоритм или преподаватель»: педагогическая валидация включается в систему как обязательный уровень для решений с высоким риском. В-третьих, модель совместима как с подходами, основанными на правилах, так и с ML-подходами, поскольку вводит общий слой допустимости данных и решения [7; 9; 10].

Ограничения модели связаны с необходимостью институциональной инфраструктуры: сквозной идентификации обучающихся, регламентов качества данных, нормализованных справочников и ответственных владельцев источников. Поэтому внедрение целесообразно начинать с пилота на нескольких дисциплинах, где легко сопоставить цифровой след с экспертной оценкой преподавателя и уточнить пороговые значения q_i.

С организационной позиции внедрение модели требует распределения ответственности между несколькими группами участников. Администраторы цифровой среды обеспечивают интеграцию источников и ведение справочников; аналитический блок отвечает за расчёт показателей состояния и качества данных; преподаватель или академический наставник выполняет педагогическую интерпретацию рекомендаций; руководитель образовательной программы определяет перечень допустимых управленческих воздействий и случаи, когда автоматизация должна быть ограничена. Без такого разделения ролей даже технологически зрелая система рискует превратиться в набор несвязанных дашбордов, не встроенных в реальные процедуры управления. Именно поэтому при пилотировании важно фиксировать не только точность прогноза, но и показатели организационного эффекта: долю решений, принятых с учетом валидации преподавателя, частоту блокировки сильных рекомендаций из-за низкого качества данных,

время обновления профиля и процент случаев, когда после дообогащения данных траекторное решение изменилось. Такие метрики позволяют оценивать зрелость системы не по количеству собранных событий, а по способности переводить данные в управленчески обоснованные действия [5; 6; 7].

Для оценки результативности модели в университете может использоваться комбинированная система показателей. К академическим индикаторам относятся снижение доли ошибочно назначенных компенсирующих маршрутов, уменьшение числа поздно выявленных рисков и повышение согласованности между рекомендациями системы и экспертными решениями преподавателей. К информационным индикаторам относятся рост полноты цифрового профиля, снижение числа дублей, сокращение запаздывания обновления событий и повышение доли объяснимых рекомендаций. Наконец, к управленческим индикаторам можно отнести время реакции на сигналы риска, долю решений, переведенных в мягкий режим, и устойчивость траекторных назначений после повторной проверки данных. В совокупности такие показатели позволяют судить не только об эффективности конкретной модели, но и о степени готовности образовательной организации к data-driven-управлению, в котором цифровой след используется как доверенный, но не безусловный ресурс. Тем самым предложенный подход развивает идеи интеллектуальной поддержки образовательного процесса и гуманитарно-цифрового проектирования информационных систем, ориентированных на согласование алгоритмической логики и педагогической ответственности [7; 9].

Заключение

Разработанная системная модель показывает, что управление индивидуальной образовательной траекторией должно строиться не на максимизации объема данных, а на формализации доверия к ним. Введение показателя качества в состав состояния обучающегося позволяет отделить ситуации, где допустимо сильное алгоритмическое вмешательство, от ситуаций, где требуется мягкая рекомендация или ручное решение. Практический эффект подхода связан со снижением числа ошибочных траекторных воздействий и с повышением прозрачности управленческих процедур в цифровой образовательной среде.

ЛИТЕРАТУРА

1. UNESCO. Global Education Monitoring Report 2023: Technology in Education: A Tool on Whose Terms? — Paris: UNESCO, 2023. — 429 p. — URL: https://www.unesco.org/gem-report/en/technology (дата обращения: 08.03.2026).
2. Индикаторы цифровой экономики: 2025: статистический сборник. — Москва: НИУ ВШЭ, 2025. — URL: https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/1043582630.pdf (дата обращения: 08.03.2026).
3. Живетьев А.В. Проблемы управления индивидуальной образовательной траекторией студента на основе цифрового профиля и цифрового следа / А.В. Живетьев, М.А. Белов // Системный анализ в науке и образовании. — 2024. — № 4. — С. 37–44.
4. Бояринов Д.А. Учебная аналитика на современном этапе цифровизации образования / Д.А. Бояринов // Проблемы современного образования. — 2025. — № 5. — С. 68–77. — DOI: 10.31862/2218–8711-2025-5-68-77.
5. Бадаква А.С. Создание наборов данных для искусственного интеллекта: ключевые вызовы и стратегии их преодоления / А.С. Бадаква, Б.В. Мартынов // Интеллектуальные ресурсы — региональному развитию. — 2024. — № 3. — С. 19–28.
6. Forsström S. Key Findings and Integration Strategies on the Impact of Digital Technologies on Students' Learning: Results from a Literature Review / S. Forsström, M. Bond, M. Njå [et al.] // OECD Education Working Papers. — 2025. — No. 336. — DOI 10.1787/ab309c32-en.
7. Прокопенко Е.С. Моделирование системы интеллектуальной поддержки управления образовательным процессом / Е.С. Прокопенко, Б.В. Мартынов // Первый экономический журнал. — 2024. — № 9(351). — С. 159–167. — DOI: 10.58551/20728115_2024_9_159. — EDN: PDPZLV.
8. Khor E.T. A Systematic Review of the Role of Learning Analytics in Supporting Personalized Learning / E.T. Khor, K. Mutthulakshmi // Education Sciences. — 2024. — Vol. 14, no. 1. — Art. 51. — DOI: 10.3390/educsci14010051.
9. Мартынов Б.В. Гуманитарно-цифровые технологии проектирования интеллектуальных информационных систем управления бизнесом / Б.В. Мартынов, Е.С. Прокопенко, И.Г. Акперов // Первый экономический журнал. — 2023. — № 1(331). — С. 19–25. — DOI: 10.58551/20728115_2023_1_19. — EDN: UWKDQQ.
10. Prokopenko E. Intelligent control based on ergatic systems in conditions of incomplete and fuzzy information / E. Prokopenko, B.V. Martynov, I.M. Magerramov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 1889. — Art. 022101.

© Игнатова Елена Ивановна (ignatova384756@gmail.com); Куликова Ирина Викторовна (irina-vikt@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.20

АППРОКСИМАЦИЯ ДРЕВЕСНОЙ СТРУКТУРЫ ДЕРЕВА ПО ЕГО ПЛОТНОМУ ОБЛАКУ

APPROXIMATION OF THE WOOD STRUCTURE OF A TREE BASED ON ITS DENSE CLOUD

A. Kovalev
A. Kanev

Summary. The work is devoted to the algorithm of approximation of the wood structure of a single tree (trunk and branches), a detailed description of which can improve the quality of automated forest valuation. The method is based on the construction of a graph structure from a dense cloud of points, whose nodes are horizontal ellipses approximating the cross-sections of the trunk and branches at various heights. Unlike the approaches widely used today, the proposed algorithm allows for the reconstruction of a detailed picture of the tree structure along its entire length. This opens opportunities for transforming the procedures of forest valuation, making the analysis of forest areas more accurate and informative.

Keywords: digital shadow, dense point cloud, single tree, LiDAR, trunk, branches, wood.

Ковалев Андрей Вахтангович
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
andrewkovalev2023@gmail.com
Канев Антон Игоревич
Старший преподаватель, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
tony.longpoint@gmail.com

Аннотация. Работа посвящена алгоритму аппроксимации древесной структуры одиночного дерева (ствола и ветвей), детальное описание которой способно повысить качество автоматизированной лесной таксации. В основе метода лежит построение по плотному облаку точек графовой структуры, узлами которой являются горизонтальные эллипсы, аппроксимирующие сечения ствола и ветвей на различных высотах. В отличие от широко используемых сегодня подходов, предложенный алгоритм позволяет восстановить детальную картину строения дерева на всем его протяжении. Это открывает перспективы для трансформации процедур таксации, делая анализ лесных массивов более точным и информативным.

Ключевые слова: цифровая тень, плотное облако точек, одиночное дерево, LiDAR, ствол, ветви, древесина.

Введение

На данный момент стандартными таксационными параметрам оценки древесной структуры являются DBH, HCB, высота и длина дерева. Под древесной структурой одиночного дерева авторы данной статьи имеют в виду совокупность его ветвей и ствола. Пример алгоритма оценки приведенных параметров по результатам лидарного сканирования представлен Гришиным И. в источнике [1]. Предполагается, что следующим этапом продвижения в данном направлении может стать переход к работе с более детальным описанием.

Детализированное описание ветвей и ствола дерева может быть полезно для решения ряда прикладных задач: определения видовой принадлежности, оценки жизнеспособности, прогнозирования потенциальных повреждений и установления возраста. Кроме того, на его основе можно вычислить объем древесины. Также описание структуры ветвей, входящих в крону, может быть востребовано при моделировании затенения, создаваемого деревом.

Целью данного исследования является создание программного решения, позволяющего получить графовую модель, описывающую древесную структуру дерева по его предварительно классифицированному облаку Lidar-данных.

Помимо описанного стандартного подхода, существуют и более продвинутые варианты. К примеру, Trochta J. в источнике [2] предлагает усложненный способ описания части ствола от корня до нижних ветвей с помощью набора горизонтальных цилиндров. Стоит отметить, что данные цилиндры располагаются со значительным интервалом и не имеют непосредственного соприкосновения друг с другом. В свою очередь, Tarsha Kurdi F. в работе [3] построил трехмерную модель древесной структуры из вертикальных цилиндрических примитивов, аппроксимированных по предварительно кластеризованным слоям точек. Однако данный подход не учитывает связи между цилиндрами, что не позволяет разделить полученную модель на ствол и отдельные ветви. Кроме того, подобное решение может давать некорректные результаты при наличии ветвей с углом наклона в интервале [0°; 45°].

Альтернативный метод представлен Lau A. в работе [4], где цифровая тень строится из цилиндрических примитивов, имеющих произвольный угол наклона в трехмерном пространстве. Развивая этот подход,

Raumonen P., являющийся соавтором [4], в материале [5] предлагает механизм восстановления утерянных звеньев в аналогичной структуре цилиндров. Полученные подобным образом модели были использованы Schindler Z. и Bohn Reckziegel R. в источниках [6] и [7] для моделирования затенения от деревьев.

Кроме того, цифровая тень древесной структуры может быть полезна для решения задачи видовой классификации деревьев, значимость которой обосновала в работе [8] Sakharova E.

Материалы и методы

На вход алгоритма поступает предварительно классифицированное плотное облако точек одиничного дерева (рис. 1а), полученное в результате процедуры предобработки результатов лидарного сканирования, описанной в пункте 2.1. В дальнейшем используются точки, принадлежащее стволу и ветвям дерева.

В ходе процесса аппроксимации система строит несколько вариантов модели, отличающихся количеством горизонтальных слоев в разбиении. Элементы полученного набора оцениваются. Модель, признанная лучшей из полученных, проходит дальнейшую обработку, после которой система выдает результат. Для понимания механизма функционирования представленного программного решения стоит рассмотреть подробнее этапы его работы. Иллюстрации к основным стадиям построения и обработки моделей представлены на Рис. 1.

1. Предобработка данных

Предобработка включает две основные ступени:

1) Сегментацию результата лидарного сканирования участка лесного массива на облака отдельных деревьев, что в процессе подготовки данных для проведения исследования производилось с помощью решения, разработанного Гришиным И. и описанного в материале [9]. Некоторая альтернатива использованному подходу представлена в работе [10].
2) Классификацию точек облака единичного дерева на точки листвы и древесины, которая в рамках данной работы производилась вручную. Пример классифицированного облака изображен на Рис. 1.

2. Построение несвязанной модели

Работа алгоритма начинается с сортировки точек по предварительно заданному количеству горизонтальных слоев LN (Layers Number), результат сортировки представлен на Рис. 1б. Затем по точкам каждого слоя производится аппроксимация эллипсов.

Аппроксимации эллипсов по точкам слоя начинается с определения дисперсий точек всего облака по осям X и Y, меньшая из которых затем делится на заданное число SN (Split Number). Полученная величина становится размером квадратных ячеек, на которые разделяется слой. После построения сетки производится сортировка точек слоя по ее элементам. Не пустые ячейки кластеризуются с помощью DBSCAN. Далее точки ячеек одного кластера также объединяются в кластеры точек. Кластеризация ячеек работает значительно быстрее в сравнении с кластеризацией точек за счет многократного уменьшения количества обрабатываемых объектов. Кроме того, базовые координаты ячеек располагаются с одинаковым шагом, равным их размеру, что служит увеличению однородности кластеров.

Далее по кластерам, включающим более 5 точек, аппроксимируются эллипсы. Затем вычисляется суммарное расстояние от точек до построенных по ним эллипсов SDPE (Sum of Distances from Points to Ellipses). Стоит отметить, что точки являются родительскими для эллипса, который был по ним построен.

Аппроксимация эллипсов по точкам слоя производится для заданного набора различных SN. В качестве результата выбирается версия с наименьшим значением SDPE.

После аппроксимации эллипсов из первого слоя выбирается экземпляр с наибольшим размером меньшей полуоси b, который далее называется корневым. Остальные элементы первого слоя удаляются. Затем из всего набора эллипсов удаляются те, для которых выполняется следующее условие:

$$a > a_к c_a \wedge b > b_к c_b \quad (1)$$

где a — размер большей полуоси эллипса;

$a_к$ — размер большей полуоси корневого эллипса;

b — размер меньшей полуоси эллипса;

$b_к$ — размер меньшей полуоси корневого эллипса;

c_a, c_b — коэффициенты, задающие пороговое значение.

Результат построения несвязной модели представлен на рис. 1в.

3. Первичное связывание

Данный этап начинается с отбора одной из нескольких несвязанных моделей, которые были предварительно построены с разными LN. Выбирается вариант, в котором минимален процент точек не являющихся родительскими ни для одного из эллипсов.

Затем производится подготовка эллипсов к связыванию слоев, которая заключается в определении средней

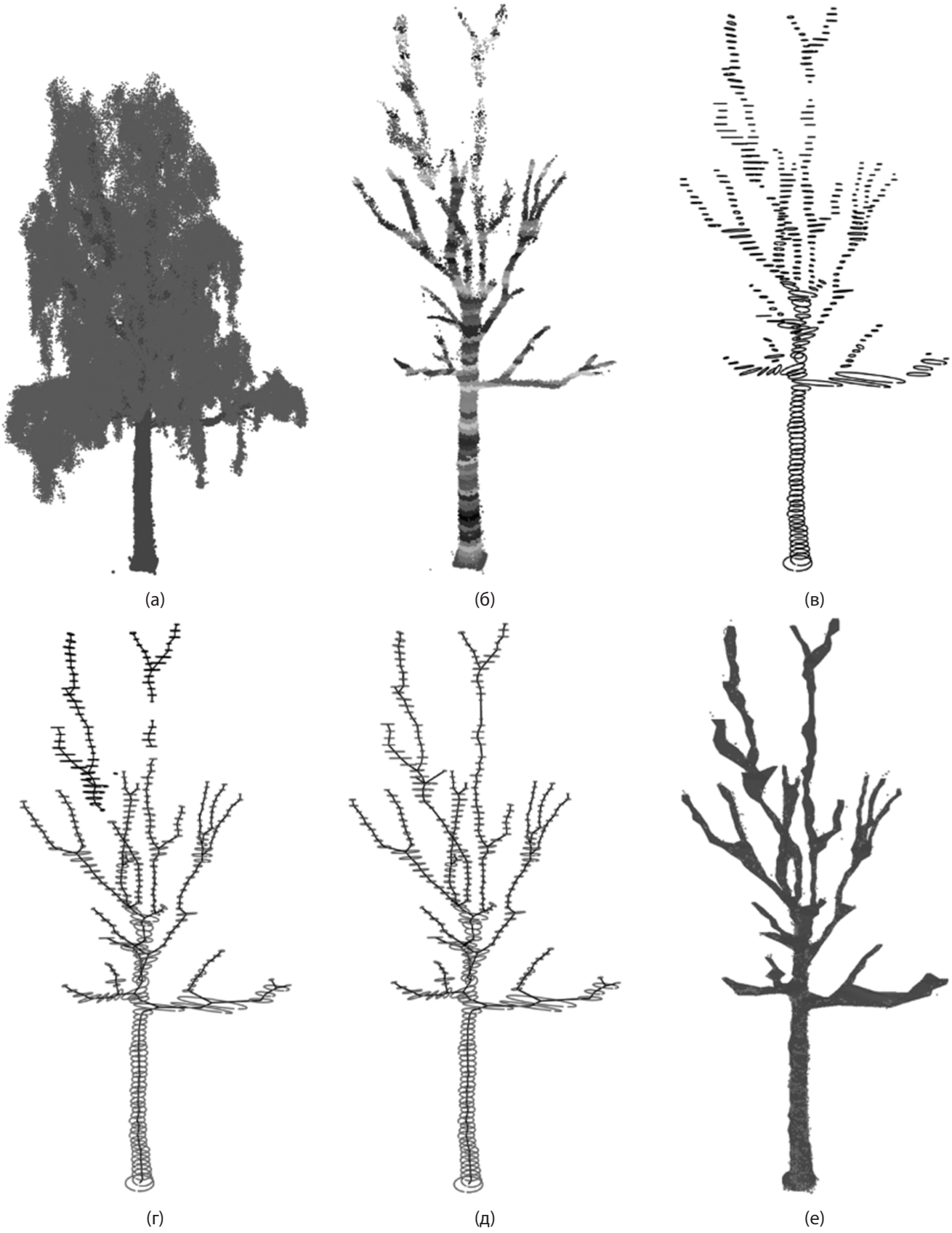


Рис. 1. Этапы построения модели древесной структуры:
а) Исходное облако единичного дерева; б) Разделенные на горизонтальные слои точки древесной структуры;
в) Несвязанная модель; г) Результат первичного связывания; д) Результат восстановления связности;
е) Полигональная трехмерная модель, построенная по графовой структуре, и точки, ею незахваченные

дистанции от каждой точки до ее ближайшего соседа внутри родительского кластера эллипса — $\overline{d_б}$.

$$\overline{d_б} = \frac{\sum_i^n d_{бi}}{n} \quad (2)$$

где $d_{бi}$ — расстояние от i-ой точки кластера до ближайшего соседа внутри него;

n — количество точек в кластере.

После этого слои обходятся от второго снизу до верхнего. Для каждого из эллипсов слоя проверяется каждый из эллипсов соседа снизу. Процедура подразумевает расчет $d_{бдр}$ для каждой родительской точки эллипса — расстояния до ближайшей родительской точки эллипса нижележащего слоя. После этого для каждого эллипса отбираются соседи снизу, для которых существует одна или несколько родительских точек с $d_{бдр} < \overline{d_б} k_б$, где $k_б$ — заданный коэффициент (в рамках работы $k_б = 2$ и подбирался эмпирически). Если таких эллипсов несколько, то из них выбирается вариант с наибольшим количеством точек с $d_{бдр} < \overline{d_б} k_б$ и он связывается с эллипсом текущего. Если же удовлетворяющие условию экземпляры отсутствуют, то связь не образуется.

Результат первичного связывания представлен на Рис. 1г.

4. Восстановление связности

После первичного связывания зачастую некоторая доля эллипсов не имеет пути к корневому. В таком случае на данном этапе структура представлена несколькими несвязными подграфами, что обычно вызвано потерей части точек или неравномерной их плотностью на различных высотах. Для коррекции данного дефекта предназначен этап восстановления связности.

В ходе работы из несвязанных с корнем эллипсов выбирается вариант с минимальным расстоянием от любой его родительской точки до любой родительской точки одного из эллипсов набора, включающего связанные с корнем экземпляры D слоев снизу и D сверху. В рамках данного исследования использовался D=4.

Описанная процедура повторяется до тех пор, пока не все эллипсы имеют путь к корню и появляются новые связи.

В завершение описанной процедуры удаляются эллипсы, для которых все-таки отсутствует путь к корню, если таковые присутствуют.

Результат восстановления связности представлен на рис. 1д.

5. Коррекция

Основной целью данного этапа является увеличение соответствия полученной структуры реальному дереву без изменения состава набора эллипсов и связей между ними.

Необходимость проведения данной процедуры можно обосновать тем фактом, что у данных собранных любым лидаром присутствует определенная погрешность, поэтому отсутствует возможность назвать графовую структуру, построенная по которой трехмерная полигональная модель, содержит внутри себя все точки облака, достоверно отражающей реальное дерево.

Ввиду отсутствия полевых измерений размеров горизонтальных срезов древесной структуры дерева, которые могли бы послужить источником данных для калибровки, основой для коррекции стало облако точек, по которому была построена модель. В качестве ключевой метрики была выбрана объемная плотность точек (ОПТ) — число точек на один кубический метр объема трехмерной модели, построенной по имеющейся графовой структуре. Важно, что речь идет о точках, находящихся внутри 3d модели — захваченных.

Процедура коррекции состоит из следующего ряда действий:

1) Сдвиг графовой структуры вверх с последующей подстановкой на предыдущую позицию корневого эллипса его копии. Все эллипсы сдвигаются вверх на величину z_i:

$$z_i = z_i + lr \quad (3)$$

где z_i — z-координата i-ого эллипса;

l — толщина слоя разбиения;

r — коэффициент сдвига.

Согласно таблице 1, отражающей зависимость среднего ПЗТ (процента захваченных внутрь трехмерной модели точек) от коэффициента сдвига (КС) на интервале [0;1] для 18 деревьев, оптимальным значением коэффициента r является 0,9.

Таблица 1.

Значения среднего ПЗТ для различных КС на интервале [0;1]

КС	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
ПЗТ	59,2	60,4	61,4	62,6	63,8	64,9	65,9	66,8	67,2	67,3	67,1

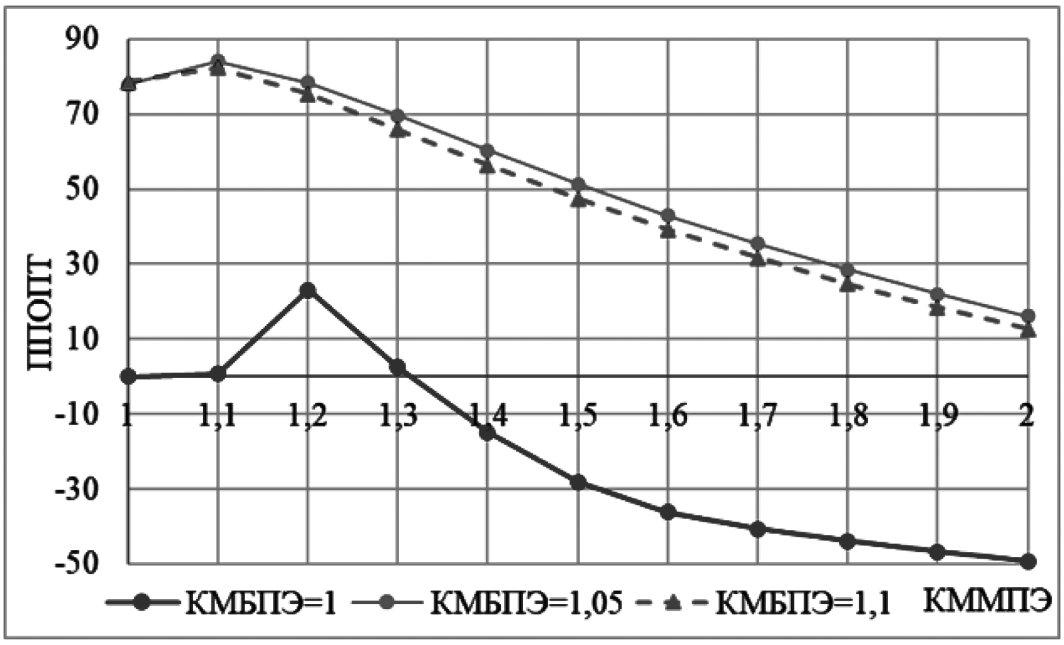


Рис. 2. График зависимости ППОПТ от КММПЭ для трех величин КМБПЭ

2) Масштабирование эллипсов структуры осуществляется в соответствии с формулой:

$$b_i = b_i * \text{КММПЭ}; a_i = a_i * \text{КМБПЭ} \quad (4)$$

где b_i, a_i — размеры полуосей i-ого эллипса;

$\text{КММПЭ}, \text{КМБПЭ}$ — коэффициенты масштабирования малой и большей полуосей эллипсов.

Выбор оптимальных коэффициентов масштабирования полуосей эллипсов КМБПЭ и КММПЭ также осуществлялся по статистике, собранной для 18 деревьев и представленной на Рис. 2 в виде графика зависимости ППОПТ. ППОПТ — прирост ОПТ в процентах относительно величины, полученной при отсутствии масштабирования.

На основе собранных данных в качестве оптимальных были выбраны КММПЭ = 1,1 и КМБПЭ = 1,05.

3) Масштабирование от корня вплоть до первого разветвления осуществляется с общим коэффициентом масштабирования КМПЭ по формуле:

$$b_i = b_i * \text{КМПЭ}; a_i = a_i * \text{КМПЭ} \quad (5)$$

где b_i, a_i — размеры полуосей i-ого эллипса;

Хотя данный факт не является очевидным, но предложенная процедура способна дать положительный ППОПТ, что подтверждается данными таблицы 2, отражающей зависимость ППОПТ от КМПЭ. Оптимальным было признано значение КМПЭ = 1,1.

6. Генерация 3d-модели

На данном этапе строится 3d-модель с двумя типами полигональных элементов:

1) Полигональное соединение между двумя эллипсами, строящееся по точкам, лежащим на границах двух связанных эллипсов.
2) Плоская горизонтальная полигональная фигура внутри границы эллипса. Генерируется для экземпляров с одной связью, такие еще считаются конечными.

Пример построенной по полученной графовой структуре 3d-модели представлен на рис 1е.

Стоит отметить, что 3d модели древесных структур, построенные в ходе данного исследования, несколько превосходят по качеству полученные в работе [11] с помощью таких стандартных методов генерации трехмерных моделей по облакам точек, как Ball-Pivoting Algorithm и Poisson Surface Reconstruction.

Таблица 2.

Значения ППОПТ для различных КМПЭ на интервале [1,1;1,9]

КМПЭ	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
ППОПТ	0,84	–2,02	–5,95	–10,27	–14,6	–18,84	–22,89	–26,72	–30,34

Таблица 3.

Распределение частот ПЗТ по интервалам

Интервал ПЗТ (%)	[61;65]	(65;69]	(69;74]	(74;78]	(78;83]	(83;87]	(87;92]	(92;96]
Частота	1	0	1	1	4	7	2	2

Результаты

Основным результатом данного исследования является разработанное в его рамках программное решение, способное построить модель древесной структуры дерева, представленную связным графом, состоящим из горизонтальных эллипсов.

Была выполнена оценка доли захваченных точек для аппроксимаций, построенных по плотным облакам 18 деревьев (отличающихся углами наклона ветвей, их количеством, длиной и высотой). На основе полученных данных построена таблица 3, отражающая распределение частот ПЗТ по интервалам. Для большей части деревьев датасета информация о видовой классификации отсутствует. Меньшая часть включает такие виды деревьев, как дуб, береза, сосна и ель. Среднее значение процента захваченных точек на тестовой выборке равно 83,4 %.

Благодаря данным о траектории элементов древесной структуры дерева в дальнейшем возможно будет перейти к модели с сечениями перпендикулярными к рассекаемым поверхностям.

Также по построенной модели можно получить данные о ветвях и стволе дерева, что может быть полезно для расчета его коммерческой стоимости, определения вида и других задач лесной инвентаризации.

Обсуждение

Разработанное программное решение имеет ряд характерных особенностей, порожденных принципами, лежащими в основе функционирования системы:

Необходимость калибровки и доработки данного решения для получения сечений максимально близких к реальному дереву. Как было сказано ранее, данные, собранные с помощью любого лидара, имеют определенную погрешность, поэтому на практике стоит подбирать КММПЭ, КМБПЭ и КМПЭ для каждого лидара отдельно согласно с результатами полевых измерений для одного или нескольких из отсканированных деревьев.

Искажение и потеря данных в случае работы с ветвями, угол наклона которых близок к горизонтальному. Поскольку данный подход подразумевает работу с горизонтальными срезами точечного облака, ветви с малым углом наклона относительно горизонта требуют значительного увеличения количества слоев разбиения. Если же смещение ветви в вертикальной плоскости близко к толщине и ее структура достаточно сложна, то это порождает эллипсы с b значительно большим реального радиуса ветви, которые удаляются системой, что ведет к потере данных. В будущем данный недостаток будет скомпенсирован путем добавления новых этапов обработки, позволяющих получить набор сечений, близких к перпендикулярным относительно характеризуемых участков поверхностей древесной структуры. Пример аппроксимации DBH в перпендикулярной к стволу дерева плоскости описан в работе [12].

Высокая степень зависимости от качества обрабатываемого облака. Некоторые дефекты компенсируются в ходе работы системы. Например, с помощью описанной выше процедуры восстановления связности, но несмотря на это качество модели напрямую зависит от качества исходного облака.

Заключение

В ходе исследования был реализован алгоритм построения графовой структуры одиночного дерева на основе классифицированного плотного облака точек. В отличие от широко используемых решений, предложенный метод обеспечивает описание размеров и траекторий ствола и ветвей на всем их протяжении. Это позволяет с относительно высокой точностью определять такие таксационные показатели, как количество ветвей, их траектории, объем ствола и т.д. Дальнейшее развитие алгоритма открывает перспективы для создания принципиально нового подхода к автоматизированной таксации лесных массивов, обеспечивающего более высокий уровень детализации и достоверности оценок.

Благодарности и финансирование. *Хочется выразить благодарность кафедре ИУ5 МГТУ им. Н.Э. Баумана за предоставленные данные.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Grishin I., Sakharova E., Ustinov S., Kanev A., Terekhov V. Tree Inventory with LiDAR Data // Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research VI. 2022. P. 3–11. DOI 10.1007/978-3-031-19032-2_1.
2. Trochta J., Krůček M., Vrška T., Král K. 3D Forest: An Application for Descriptions of Three-Dimensional Forest Structures Using Terrestrial LiDAR // PLoS ONE. 2017. Vol. 12, No. 5. e0176871. DOI 10.1371/journal.pone.0176871.
3. Tarsha Kurdi F., Gharineiat Z., Lewandowicz E., Shan J. Modeling the Geometry of Tree Trunks Using LiD Выберите правильные утверждения:
4. Lau A., Bentley L.P., Martius C., Shenkin A., Bartholomeus H., Raumonen P., Herold M. Quantifying branch architecture of tropical trees using terrestrial LiDAR and 3D modelling // Trees. 2018. Vol. 32. P. 1219–1231. DOI 10.1007/s00468-018-1704-1.
5. Raumonen P., Kaasalainen M., Åkerblom M., Kaasalainen S., Kaartinen H., Vastaranta M., Holopainen M., Disney M., Lewis P. Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data // Remote Sens. 2013. Vol. 5, No. 2. P. 491–520. DOI 10.3390/rs5020491.
6. Schindler Z., Larysch E., Frey J., Sheppard J. P., Obladen N., Kröner K., Seifert T., Morhart C. From Dawn to Dusk: High-Resolution Tree Shading Model Based on Terrestrial LiDAR Data // Remote Sens. 2024. Vol. 16, No. 12. P. 2189–2204. DOI 10.3390/rs16122189.
7. Bohn Reckziegel R., Larysch E., Sheppard J. P., Kahle H.-P., Morhart C. Modelling and Comparing Shading Effects of 3D Tree Structures with Virtual Leaves // Remote Sens. 2021. Vol. 13, No. 3. P. 532–553. DOI 10.3390/rs13030532.
8. Sakharova E.K., Nurlyeva D.D., Fedorova A.A., Yakubov A.R., Kanev A.I. Issues of tree species classification from LiDAR data using deep learning model // Stud. in Comput. Intell. 2021. Vol. 1008. P. 319–324. DOI 10.1007/978-3-030-91581-0_42.
9. Grishin I., Krutov T., Kanev A., Terekhov V. Individual Tree Segmentation Quality Evaluation using Deep Learning Models LiDAR Based // Optical Memory and Neural Networks. 2023. Vol. 32. P. 270–276. DOI 10.3103/s1060992x23060061.
10. Terekhov V., Bondarenko D., Ryzhkova I., Zelinskii D. Tree segmentation of LiDAR point clouds using a graph-based algorithm // International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). 2024. P. 1–6. DOI 10.1109/reepe60449.2024.10479750.
11. Ovchinnikov D., Milevich A., Krutov T. Creating 3D Models Using Segmented Point Clouds // 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). 2024. P. 1–6. DOI 10.1109/reepe60449.2024.10479763.
12. Wu R., Chen Y., Wang C., Li J. Estimation of forest trees diameter from terrestrial laser scanning point clouds based on a circle fitting method // IGARSS. 2018. P. 2813–2816. DOI 10.1109/igarss.2018.8517303.

© Ковалев Андрей Вахтангович (andrewkovalev2023@gmail.com); Канев Антон Игоревич (tony.longpoint@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.21

ЭФФЕКТИВНЫЕ СТРАТЕГИИ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ В РЕЛЯЦИОННЫХ БАЗАХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ДЕКЛАРАТИВНЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

EFFECTIVE STRATEGIES FOR AUTOMATICALLY SELECTING OPTIMAL VIEWS IN RELATIONAL DATABASES BASED ON DECLARATIVE MODELING METHODS

A. Conde
V. Petrov

Summary. This article proposes a declarative approach to modeling and solving the problem of selecting physical data representations in relational databases. Representations are understood as materialized views, index structures, and other physical objects that affect the cost of executing analytical and mixed workloads. The key idea of the approach is to separate the level of goal specification from the level of procedural configuration enumeration: an administrator or data engineer formulates a declaration of constraints and quality criteria, after which the computing kernel automatically builds an optimization model, solves it, and generates an executable plan for schema modification. A formalization is proposed as a mixed Boolean-linear formulation with an extension to a robust scenario case that takes into account load drift and statistical changes. It is shown that the declarative description allows for combining requirements for response time, memory budget, service windows, and regression resistance into a single system of constraints. For practical applicability, a prototype was developed, including a module for extracting candidate views from SQL workloads, a module for evaluating query plan benefits, an optimization module, and a DDL script generation module. Using synthetic and semi-real workloads, a reduction in the overall query cost was demonstrated while maintaining manageable maintenance costs. The results confirm that declarative design provides a reproducible and scalable mechanism for physical database design, convenient for integration into DevOps data management processes.

Keywords: relational databases, materialized views, declarative models, query optimization.

Конде Абдул Карим
Аспирант, ФГБОУ ВО Московский государственный технологический университет Станкин
karimconde112@gmail.com
Петров Валерий Евгеньевич
Кандидат технических наук, ФГБОУ ВО Московский государственный технологический университет Станкин
cu58@mail.ru

Аннотация. В статье предлагается декларативный подход к моделированию и решению задачи выбора физических представлений данных в реляционных базах данных. Под представлениями понимаются материализованные представления, индексные структуры и иные физические объекты, влияющие на стоимость выполнения аналитических и смешанных нагрузок. Ключевая идея подхода состоит в отделении уровня спецификации цели от уровня процедурного перебора конфигураций: администратор или инженер данных формирует декларацию ограничений и критериев качества, после чего вычислительное ядро автоматически строит оптимизационную модель, решает ее и генерирует исполнимый план изменения схемы. Предложена формализация в виде смешанной булево-линейной постановки с расширением на робастный сценарный случай, учитывающий дрейф нагрузки и изменение статистик. Показано, что декларативное описание позволяет объединить требования по времени ответа, бюджету памяти, окнам обслуживания и устойчивости к регрессиям в единую систему ограничений. Для практической применимости разработан прототип, включающий модуль извлечения кандидатных представлений из SQL-нагрузки, модуль оценки выгод по планам запросов, оптимизационный модуль и модуль генерации DDL-скриптов. На синтетической и полуреальной нагрузке показано сокращение интегральной стоимости запросов при контролируемых затратах на сопровождение. Полученные результаты подтверждают, что декларативная постановка дает воспроизводимый и масштабируемый механизм физического проектирования БД, удобный для интеграции в DevOps-процессы управления данными.

Ключевые слова: реляционные базы данных, материализованные представления, декларативные модели, оптимизация запросов.

Введение

Задача выбора представлений является центральной задачей физического проектирования БД: при фиксированной логической схеме необходимо определить такой набор материализованных представлений, индексов и производных структур, который минимизирует стоимость рабочей нагрузки и одновременно удовлетворяет эксплуатационным ограничениям. Классические решения Auto Admin показали практическую эффективность стоимостной оптимизации индексов и совместного выбора индексов с представлениями [1], [2]. В дальнейшем подходы эволюционировали от эвристического перебора к формальным моделям с уче-

том ограничений на хранение, сопровождение и динамику нагрузки [3], [4]. Современные производственные платформы также подтверждают необходимость автоматизации физического дизайна на больших парках баз данных [7].

Несмотря на существенный прогресс, в большинстве промышленных инструментов остается выраженная процедурность: специалисту требуется вручную задавать порядок шагов, тонкие параметры алгоритма и условия остановки. Такая связка затрудняет переносимость решений между СУБД и снижает воспроизводимость экспериментов. Декларативный подход устраняет этот разрыв: пользователь описывает, что считать качественным решением, а механизм решателя определяет, как это решение получить. Это особенно важно для хранилищ данных, где набор запросов неоднороден, статистики меняются пакетно, а окна обслуживания жестко ограничены по времени.

Постановка исследования ориентирована на гибридные нагрузки OLTP/OLAP и на сценарии, в которых одновременно используются materialized view, индексные структуры и механизмы rewrite-запросов. Практическая применимость рассматривается для PostgreSQL и Oracle-подобных сценариев эксплуатации, где доступны стандартные операторы создания и обновления материализованных представлений, а также средства анализа планов выполнения [8], [9], [10], [11]. Дополнительно учитываются подходы с гипотетическими индексами для ускоренной оценки кандидатов [12].

Цель статьи состоит в разработке единой декларативной модели выбора представлений, способной: 1) формально описывать ограничения инфраструктуры, 2) обеспечивать вычислимость на промышленных объемах кандидатов, 3) поддерживать робастность к изменению профиля нагрузки, 4) выдавать воспроизводимый DDL-план внедрения. Научная новизна заключается в интеграции сценарной робастной оптимизации и штрафов на регрессию в единую булево-линейную постановку, а также в программной реализации конвейера, где этапы извлечения, оценки и оптимизации связываются формальным декларативным контрактом.

Методы исследования

Методологически работа опирается на стоимостные модели физического проектирования и на практики автоматической настройки, развитые в работах [1]-[7]. В качестве входных данных используются: журнал SQL-запросов, статистики таблиц и распределений ключей, сведения о доступном бюджете хранения, а также операционные ограничения на интервал обслуживания. Из рабочей нагрузки формируется множество шаблонов запросов с весами, отражающими частоту и бизнес-критичность. Для каждого шаблона строится набор кандидатных представлений, получаемый через анализ операторов соединения, фильтрации, группировки и повторяемых подзапросов.

Оценка кандидатов выполняется двухуровневым образом. На первом уровне применяется быстрая аппроксимация выгод по структурным признакам (селективность, кардинальность групп, покрытие предикатов). На втором уровне используется планировщик СУБД: для каждого запроса вычисляются планы с и без кандидата, что позволяет оценить абсолютный выигрыш во времени и относительный эффект. В PostgreSQL такая процедура реализуется через EXPLAIN/EXPLAIN ANALYZE и управляемое создание/обновление materialized view [8], [9], [11]. Для ускорения оценки большого числа вариантов применяется механизм гипотетических структур, позволяющий не материализовывать объект физически до момента принятия решения [12].

Декларативный слой задается как доменноспецифический контракт, содержащий четыре группы условий: целевая функция, ресурсные ограничения, правила совместимости кандидатов и политика устойчивости. Контракт сериализуется в машинно-читаемом формате и транслируется в модель смешанного целочисленного программирования. Таким образом, инженер данных управляет смысловыми требованиями, а не внутренними параметрами решателя. Для проверки воспроизводимости каждое решение сопровождается протоколом: версия статистик, контрольная сумма workload, параметры решателя, итоговый набор DDL и прогноз эффекта.

Декларативная математическая модель выбора представлений

Пусть задано множество шаблонов запросов и множество кандидатных представлений. Бинарная переменная выбора отражает факт включения кандидата в финальную конфигурацию, а вспомогательная бинарная переменная фиксирует использование кандидата конкретным шаблоном. Оптимизационная цель минимизирует суммарную приведенную стоимость нагрузки и эксплуатационные издержки:

$$\min F = \sum_{q=1}^{Q} w_q \cdot \tau_q + \lambda \sum_{r=1}^{R} c_r \cdot x_r + \mu \sum_{r=1}^{R} m_r \cdot x_r \qquad (1)$$

В формуле (1) первый компонент отвечает за стоимость выполнения запросов, второй и третий компоненты задают регуляризацию по цене хранения и стоимости сопровождения. Параметры регуляризации настраиваются декларативно и позволяют смещать решение в сторону более агрессивного ускорения либо более экономного профиля обслуживания.

Ресурсные и эксплуатационные ограничения задаются следующей системой неравенств:

$$\sum_{r=1}^{R} s_r \cdot x_r \le B \quad (2)$$

$$\sum_{r=1}^{R} u_r \cdot x_r \le U \quad (3)$$

$$\tau_q = t_{q,base} - \sum_{r=1}^{R} \Delta_{q,r} \cdot y_{q,r} \quad (4)$$

$$y_{q,r} \le x_r, \forall q, r \quad (5)$$

$$\sum_{r=1}^{R} y_{q,r} \le 1, \forall q \quad (6)$$

$$x_r, y_{q,r} \in \{0,1\} \quad (7)$$

Ограничение (2) контролирует суммарный объем хранения выбранных представлений, ограничение (3) задает бюджет обслуживающих операций в окне регламента. Уравнение (4) выражает ожидаемое время ответа шаблона как базовое время минус суммарный выигрыш от активированных представлений. Связи (5)–(6) обеспечивают логическую согласованность: шаблон может использовать только выбранные представления и не более одного доминирующего кандидата для целевого блока плана. Условие (7) задает булеву природу управляющих переменных.

Для устойчивости к дрейфу нагрузки применяется сценарное расширение. Пусть задано множество сценариев, отражающих сезонность, пакетные окна и всплески аналитической активности. Тогда минимизируется верхняя граница риска:

$$\min\theta \quad (8)$$

$$\theta \ge \sum_{q=1}^{Q} w_{q,k} \cdot \tau_q + \lambda \sum_{r=1}^{R} c_{r,k} \cdot x_r, \forall k \quad (9)$$

Постановка (8)–(9) минимизирует наихудший сценарный функционал и тем самым ограничивает вероятность тяжелой деградации после изменения профиля запросов. Для ранжирования кандидатов на этапе предфильтрации используется показатель удельной эффективности:

$$E_r = \frac{\sum_{q=1}^{Q} w_q \cdot \Delta_{q,r}}{s_r + \alpha \cdot m_r} \quad (10)$$

Метрика (10) интерпретируется как ожидаемый выигрыш на единицу эксплуатационного ресурса и используется для сужения множества кандидатов до решаемого размера без потери качества. На практике это сокращает размерность модели и ускоряет работу решателя при сохранении близости к глобально-оптимальному решению.

Метод решения и вычислительная сложность

Прямая оптимизация по полному множеству кандидатов может приводить к избыточному времени решения, поэтому предложен двухфазный конвейер. Первая фаза выполняет статистический скрининг кандидатов по метрике эффективности и по ограничениям совместимости; вторая фаза решает точную MILP-постановку на отфильтрованном наборе. Для многосценарного режима применяется генерация ограничений по мере необходимости: решатель стартует с базового сценария и добавляет violated-ограничения только при обнаружении сценарной регрессии.

Пусть после предфильтрации остается множество размера R*. Тогда асимптотическая трудоемкость конвейера оценивается выражением:

$$T = O(Q \cdot R^* + I \cdot R^* \cdot \log R^* + K \cdot Q) \quad (11)$$

Здесь первый член соответствует массовой оценке выгод, второй отражает итерации branch-and-bound решателя на сокращенном множестве переменных, третий член связан со сценарной валидацией устойчивости. В условиях промышленной нагрузки критическим фактором становится именно ширина множества кандидатов, поэтому декларативное управление правилами генерации и отсечения дает прямой масштабный эффект.

Программная реализация прототипа

Программная реализация выполнена как сервисный pipeline из пяти модулей: (1) прием и нормализация нагрузки, (2) генерация кандидатов, (3) стоимостная оценка и извлечение признаков, (4) оптимизационный решатель, (5) генератор DDL и план внедрения. Модули связаны через декларативный контракт в формате YAML, где отдельно описываются целевая функция, лимиты ресурсов, правила исключения и политика отката. Такое разделение обеспечивает переносимость на разные СУБД и прозрачность аудита изменений.

Модуль генерации кандидатов выделяет повторяющиеся join-графы, агрегатные шаблоны и устойчивые фильтры. Для каждого кандидата рассчитываются признаки: ожидаемый коэффициент повторного использования, кардинальность результата, прогнозный размер, сложность сопровождения при refresh. В PostgreSQL-ориентированном контуре используются штатные операторы CREATE MATERIALIZED VIEW и REFRESH MATERIALIZED VIEW [8], [9], а влияние на планы контролируется через EXPLAIN [11]. Для ускоренной оценки индексных гипотез применяется HypoPG, позволяющий анализировать планы без физического построения индекса [12].

Оптимизационный модуль реализован на MILP-постановке с поддержкой warm start и сохранением dual-информации между итерациями. Это позволяет эффективно пересчитывать решение при частичном изменении нагрузки, не выполняя полный re-tune. Сервисный

оркестратор формирует пакет DDL-команд в безопасном порядке: сначала создание новых структур, затем переключение rewrite-политики, после чего контролируемое удаление деградировавших объектов. Для каждого шага строится обратимый сценарий rollback, что важно для эксплуатационной надежности.

Инженерный аспект декларативного подхода состоит в том, что критерии и ограничения версионируются так же, как прикладной код. Конфигурация физического дизайна хранится в репозитории, проходит проверку в CI и разворачивается по принципу infrastructure as code. В результате физический слой БД становится управляемым артефактом, а не набором ручных действий администратора, что особенно ценно в распределенных командах и мультисервисных ландшафтах.

Результаты исследования

Для оценки предложенного подхода сформирован стенд, имитирующий корпоративное хранилище продаж и логистики: 1,2 млрд строк факт-таблиц, 18 измерений, 460 шаблонов аналитических запросов и 90 шаблонов смешанной транзакционной активности. Нагрузка разделена на три сценария: базовый дневной профиль, ночное пакетное окно и пик отчетной активности конца периода. Сравнивались три стратегии: ручной экспертный набор, эвристический greedy-алгоритм и предложенная декларативная MILP-модель.

Таблица 1.

Параметры декларативной модели и их роль в задаче выбора представлений

Параметр	Значение	Интерпретация	Роль в модели
Q	460	число шаблонов аналитических запросов	весовой вклад в целевую функцию (1)
R	1380	исходное число кандидатных представлений	размер управляемого пространства
R*	240	кандидаты после предфильтрации	размер MILP-модели
B	2,4 ТБ	бюджет хранения представлений	ограничение (2)
U	95 мин	максимальное окно обслуживания	ограничение (3)
K	3	число сценариев дрейфа нагрузки	робастные ограничения (9)

Результаты эксперимента приведены в таблице 2. Интегральная стоимость нагрузки нормирована к базовой ручной конфигурации. Во всех сценариях декларативная модель показала лучшую стабильность, особенно в пиковом режиме, где риск регрессии обычно максимален.

Таблица 2.

Сравнительные результаты применения стратегий выбора материализованных представлений по показателям стоимости нагрузки и эксплуатационных ограничений

Стратегия	Стоимость нагрузки (день)	Стоимость нагрузки (пик)	Окно обслуживания, мин	Использовано хранилища
Ручная конфигурация	1,00	1,00	81	1,68 ТБ
Greedy-эвристика	0,79	0,88	94	2,31 ТБ
Декларативная MILP	0,72	0,76	89	2,28 ТБ

Снижение нормированной стоимости до 0,72 в дневном профиле и до 0,76 в пике подтверждает, что модель не только ускоряет типичную нагрузку, но и уменьшает чувствительность к неблагоприятным сценариям. При этом ограничение на обслуживание не нарушается, что критично для производственных контуров с фиксированными регламентными окнами. Дополнительный анализ показал, что выигрыш достигается за счет более согласованного распределения бюджета между агрегатными представлениями и индексными структурами, а также за счет исключения конфликтующих кандидатов на ранней стадии декларативного фильтра.

Для валидации воспроизводимости проведено 20 повторов расчета при перестановке порядка запросов внутри сценариев. Дисперсия итоговой стоимости у декларативной модели оказалась ниже, чем у greedy-подхода, что связано с глобальной природой оптимизации и явным учетом ограничений. Временные затраты на полный цикл настройки составили 37 минут, из которых 24 минуты заняла стоимостная оценка кандидатов и 9 минут решение MILP-задачи. Таким образом, предложенный подход применим в регулярном

Nightly контуре автоматизированного сопровождения хранилища.

Обсуждение результатов

Полученные результаты согласуются с эволюцией автоматического физического дизайна, описанной в работах [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]: наибольший эффект достигается при совместном выборе нескольких типов представлений и при наличии качественной стоимостной модели. Предложенный вклад заключается в том, что совместная оптимизация формулируется в декларативной форме, пригодной для формальной верификации, версионирования и повторного использования. Это снимает зависимость от частных эвристик конкретной СУБД и упрощает перенос практик между средами.

К ограничениям подхода относится зависимость точности результата от качества статистик и прогноза дрейфа нагрузки. При резких структурных изменениях запросов возможно снижение адекватности оценок выгод, поэтому модель должна сопровождаться периодическим пересбором кандидатного множества. Перспективным направлением является включение стохастических ограничений на основе квантилей времени ответа и расширение модели на мультитенантный режим, где разные сервисы конкурируют за общий бюджет физического слоя.

Практическая ценность подхода состоит в том, что он хорошо встраивается в существующие средства СУБД: операторы materialized view, средства query rewrite и механизмы анализа планов используются как низкоуровневые примитивы, а декларативный слой обеспечивает системную координацию. В инженерном плане это уменьшает ручной труд, снижает риск регрессий после релизов и повышает прозрачность решений для команд эксплуатации и архитектуры данных.

Заключение

В работе разработан декларативный подход к моделированию и решению задачи выбора представлений в реляционных БД. Предложена формальная булево-линейная модель с робастным расширением, объединяющая требования по производительности, ресурсам хранения, времени обслуживания и устойчивости к дрейфу нагрузки. Сформирован программный прототип, реализующий полный цикл от анализа workload до генерации DDL-плана внедрения. Экспериментальная апробация показала устойчивое снижение стоимости нагрузки при соблюдении эксплуатационных ограничений. Результаты подтверждают целесообразность перехода от процедурной настройки к декларативному управлению физическим дизайном как к воспроизводимой инженерной практике.

Дальнейшее развитие подхода связано с интеграцией online-переоптимизации, использованием инкрементальных техник переоценки выгод и расширением модели на кросс-платформенный выбор представлений в распределенных аналитических контурах. Кроме того, целесообразно исследовать совместную оптимизацию представлений и политики размещения данных по уровням хранения, что позволит дополнительно снизить совокупную стоимость владения хранилищем при сохранении требуемого уровня сервиса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровской И.Г., Харченко И.К. Модификация иерархических битовых индексов для повышения производительности систем управления базами данных // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2020. Т. 23. № 2. С. 65–72.
2. Вачкова С.Н., Каган Э.М., Козин С.В. Большие данные для педагогических исследований: возможности, проблемы, ограничения // Вестник Православного Свято-Тихоновского гуманитарного университета. Серия 4: Педагогика. Психология. 2021. № 63. С. 28–39.
3. Домбровская Г., Новиков Б., Беликова А. Оптимизация запросов в PostgreSQL / пер. с англ. Д.А. Беликова. — М.: ДМК Пресс, 2022. — 278 с.: ил. ISBN 978-5-97060-963-7.
4. Жалолов О.И., Хаятов Х.У. Понятие SQL и реляционной базы данных // Universum: Технические науки: электрон. научн. журн. 2020. № 6(75). URL: http://7universum.com/ru/tech/archive/item/9711.
5. Зайнуллин С.Б., Шишова Ю.А., Чжан Яци, Пин Фэн, Розмари Нвачукву Чидимма Проблематика интернет-торговли на российском и евразийском рынках // Евразийский Союз: вопросы международных отношений. 2024. Т. 13. № 1 (54). С. 69–82.
6. Лавриненко Д.О., Сорочан В.В. Методика повышения уровня производительности запросов к базам данных // Вестник Калужского университета. 2021. № 1 (50). С. 94–95.
7. Лемешев К.А. Техники оптимизации запросов в базах данных / // В сборнике: Цифровые, компьютерные и информационные технологии в науке и образовании. Сборник статей Межрегиональной научно-практической конференции с международным участием. Брянск, 2023. С. 60–64.
8. Лягушева М.А., Гринченко Н.Н. Анализ производительности SELECT-запросов SQL // В сборнике: Методы и средства обработки и хранения информации. Межвузовский сборник научных трудов. Рязань, 2021. С. 157–159.
9. Олейникова С.А. Моделирование: учебное пособие / С.А. Олейникова; ФГБОУ «Воронежский государственный технический университет». — Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2020. — 127 с.
10. Юе Цюй. Московские годонимы: способы представления лингвокультурной информации в топонимической базе данных обучающего типа // Полилингвиальность и транскультурные практики. 2021. Т. 18. № 3. С. 301–309. DOI 10.22363/2618-897X-2021-18-3-301-309.
11. Azgomi H., Sohrabi M.K. A novel coral reefs optimization algorithm for materialized view selection in data warehouse environments. Appl Intell 49, 3965–3989 (2019). https://doi.org/10.1007/s10489-019-01481-w.
12. Karras A., Karras C., Pervanas A., Sioutas S., Zaroliagis C. (2023). SQL Query Optimization in Distributed NoSQL Databases for Cloud-Based Applications. In: Foschini, L., Kontogiannis, S. (Eds) Algorithmic Aspects of Cloud Computing. ALGOCLOUD 2022. Lecture Notes in Computer Science, vol 13799. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33437-5_2.
13. Mukkamala, R., Purna Chandra Rao, V. (2020). Approaches for Efficient Query Optimization Using Semantic Web Technologies. In: Saini, H., Sayal, R., Buyya, R., Aliser, G. (eds) Innovations in Computer Science and Engineering. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 103. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2043-3_47.
14. Tm, Hayath & Shafiulla, Mohammed & Dadapeer, Mr. (2023). An Overview of SQL Optimization Techniques for Enhanced Query Performance. 1–5. 10.1109/ICDCECE57866.2023.10151265.
15. Melnik, Tova Milo, C. Mohan, Thomas Neumann, Beng Chin Ooi, Fatma Ozcan, Jignesh Patel, Andrew Pavlo, Raluca Popa, Raghu Ramakrishnan, Christopher Re, Michael Stonebraker, and Dan Suciu. 2022. The Seattle Report on Database Research. Commun. ACM 65, 8 (jul 2022), 72–79. doi:10.1145/3524284

© Конде Абдул Карим (karimconde112@gmail.com); Петров Валерий Евгеньевич cu58@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.22

АЛГОРИТМЫ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЦИКЛИНГОВЫМ КОМПЛЕКСОМ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ РАДИАЦИОННОГО ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

ALGORITHMS FOR EFFECTIVE MANAGEMENT OF A RECYCLING COMPLEX IN THE PROCESSING OF RADIATION SECONDARY RAW MATERIALS

S. Korendyasev
O. Romashkova
A. Kapterev

Summary. The article is devoted to the study and practical implementation of algorithms for managing a recycling complex that processes radioactive secondary raw materials. The relevance of this work is due to the need to increase the efficiency of technological operations, reduce radiation risks, and ensure environmental safety in the face of increasing volumes of radioactive waste. The article analyzes the main stages of recycling, including transportation, sorting, processing, and storage, from the perspective of improving management systems.

Modern approaches to the design of control algorithms are considered, including tools for system analysis, mathematical modeling, and methods of artificial intelligence and machine learning. Special attention is paid to the integration of these algorithms into automated control systems for solving the problems of predicting failures, optimizing resource usage, and maintaining a stable technological regime. The developed solutions include predictive models and adaptive mechanisms aimed at increasing productivity and reducing environmental impact.

The article provides examples of the implementation of algorithms at a recycling complex and the results of their testing, which were evaluated based on the performance, safety, and sustainability of the processes. It is shown that the use of the proposed algorithms improves the characteristics of technological processes, reduces risk levels, and increases the environmental sustainability of the system. The article is of interest to specialists in process management, radiation safety, environmentalists, and developers of automated control systems.

Keywords: management algorithms, recycling complex, radiation secondary raw materials, waste processing, systems analysis, machine learning, artificial intelligence, environmental safety, predictive models, process automation.

Корендясев Станислав Васильевич
Аспирант, ГАОУ ВО Московский городской педагогический университет
KorendyasevSV@mgpu.ru
Ромашкова Оксана Николаевна
Доктор технических наук, профессор, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, г. Москва
ox-rom@yandex.ru
Каптерев Андрей Игоревич
Доктор педагогических наук, доктор социологических наук, профессор, ГАОУ ВО Московский городской педагогический университет
kapterev@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию и практической реализации алгоритмов управления рециклинговым комплексом, перерабатывающим радиационное вторичное сырьё. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности технологических операций, снижения радиационных рисков и обеспечения экологической безопасности на фоне роста объёмов радиоактивных отходов. Проанализированы основные этапы переработки — транспортировка, сортировка, обработка и хранение — с точки зрения возможностей совершенствования систем управления.

Рассмотрены современные подходы к проектированию алгоритмов управления, включающие средства системного анализа, математического моделирования, а также методы искусственного интеллекта и машинного обучения. Особое внимание уделено встраиванию таких алгоритмов в автоматизированные системы управления комплексом для решения задач прогнозирования отказов, оптимизации использования ресурсов и поддержания стабильного технологического режима. Разработанные решения включают предиктивные модели и адаптивные механизмы, направленные на повышение производительности и снижение экологической нагрузки.

Приведены примеры внедрения алгоритмов на рециклинговом комплексе и результаты их испытаний, оцененные по показателям производительности, безопасности и устойчивости процессов. Показано, что использование предложенных алгоритмов способствует улучшению характеристик технологических процессов, уменьшению уровней риска и росту экологической устойчивости системы в целом. Материалы статьи представляют интерес для специалистов по управлению технологическими процессами, радиационной безопасности, экологов и разработчиков автоматизированных систем управления.

Ключевые слова: алгоритмы управления, рециклинговый комплекс, радиационное вторичное сырье, переработка отходов, системный анализ, машинное обучение, искусственный интеллект, экологическая безопасность, предиктивные модели, автоматизация процессов.

Введение

Рост объёмов радиационного вторичного сырья от работы ядерных установок ставит перед рециклинговыми комплексами задачи по обеспечению высокого качества процессов, снижению радиационных угроз и полному соответствию экологическим нормам. Координация этапов — от перевозки и разделения отходов до их обработки и размещения — усложняется необходимостью учета множество переменных факторов.

Международный опыт, отражённый в документах МАГАТЭ и рекомендациях Европейской комиссии, подчёркивает необходимость интеграции систем мониторинга, анализа и управления в единый цифровой контур [1, 2]. При этом особое внимание уделяется не просто автоматизации измерений, но и интеллектуальной поддержке принятия управленческих решений.

Классические способы руководства такими производствами теряют эффективность при сильной изменчивости параметров сырья и риске нештатных ситуаций [3]. Переход к новым алгоритмам на базе искусственного интеллекта (ИИ), машинного обучения и виртуальных моделей открывает путь к росту надёжности, скорости и экологичности операций.

Разработка алгоритмов для управления комплексом при переработке такого сырья решает ряд задач:

1. Организация технологической цепочки с выделением слабых звеньев;
2. Создание алгоритмов на основе системного подхода и цифровых инструментов;
3. Внедрение алгоритмов в управляющие контуры для автоматизации и оптимизации процессов;
4. Оценка эффективности по критериям производительности, защищённости и устойчивости к внешним воздействиям.

Работа систематизирует методы контроля над такими объектами и предлагает новые алгоритмические решения для управления переработкой сырья без ущерба экологии.

Анализ процессов управления рециклинговым комплексом

Рециклинговый комплекс по переработке радиационного вторичного сырья — это многозвенная система, где тесно связаны организация и технологии. Весь процесс обращения с радиоактивными отходами состоит из этапов:

1. Сбор;
2. Транспортировка;
3. Сортировка;
4. Переработка;
5. Кондиционирование;
6. Хранение.

Схематично весь процесс представлен на рисунке 1.

Перевозка сырья усложняется его непостоянством — меняется радиоактивность, состав веществ. Нужно за-

Рис. 1. Схема обращения с радиоактивными отходами

щищать контейнеры, сокращать время в пути и избегать чрезвычайных ситуаций. Применяют тару, выполненную по стандартам МАГАТЭ, подобную B(U) или B(M), устойчивую к излучению и ударам. Но подбор тары и маршрута зависит от уровня радиации, вида изотопов, погоды — малейшее изменение груза вынуждает менять маршрут или транспорт.

Разделение отходов выполняется по их параметрам, с приоритетом точности и защиты людей от облучения. Роботы и гамма-спектрометры непрерывно сканируют состав отходов. Неоднородность сырья снижает точность, поэтому дополнительно применяют гибкие алгоритмы: при всплеске радиации система мгновенно меняет режим, чтобы не рисковать людьми и техникой [4].

Обработка сочетает механику, химию, нагрев. Целью является повышение выхода ценных фракций и снижение объемов отходов.

Размещение отходов для хранения должно исключать утечки и загрязнения. Бункеры под землёй или многослойные контейнеры устойчивы к ударам от землетрясений и повреждениям от коррозии. Мониторинг обеспечивает прогнозирование рисков излучения или износа стенок контейнеров.

Системный подход позволяет отслеживать состояние комплекса в целом с учётом всех взаимодействий. Специальные системы управления контролируют скорость обработки, расход энергии, перегрузки в различных ситуациях.

Экологические требования МАГАТЭ и ГОСТ Р 51901.10–2020 регламентируют снижение отходов и выбросов радиации [1, 5].

Разработка алгоритмов управления

Для управления рециклинговым комплексом были разработаны алгоритмы на базе методов анализа данных и искусственного интеллекта [6]. Они автоматизируют операции, прогнозируют сбои, экономят ресурсы — комплекс работает быстрее, риски выбросов радиации и нарушений экологии снижаются.

Алгоритм предиктивной модели для корректировки процессов содержит следующие этапы:

1. Сбор показаний с датчиков: радиация, температура, давление и прочие параметры — всё в реальном масштабе времени;
2. Обработка данных: регрессионные и нейросетевые модели выполняют интеллектуальный анализ поступающей информации;
3. Прогнозирование отклонений: метод кластеризации позволяет определить опасные зоны и выполнить оценку рисков;
4. Настройка режимов: система автоматически корректирует параметры: скорость обработки, маршруты доставки, настройки оборудования;
5. Запуск команд: итоговые команды поступают в общую систему управления для исполнения.

Алгоритм предиктивной модели для корректировки распределения ресурсов показан на рисунке 2.

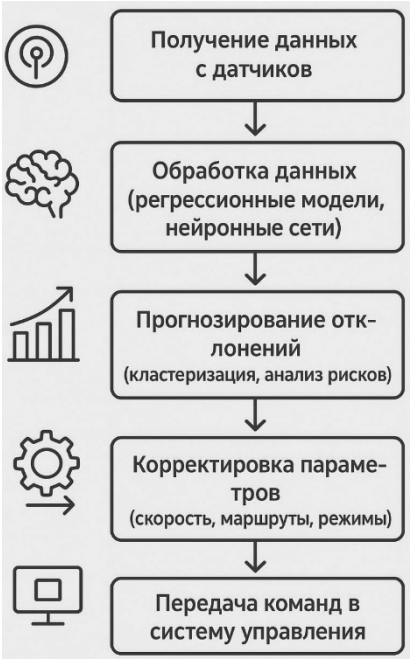


Рис. 2. Алгоритм предиктивной модели для корректировки распределения ресурсов

Приведенный алгоритм реализован не в автономном техническом модуле, а как компонент системы поддержки принятия управленческих решений в рамках организационной структуры рециклингового комплекса. Все прогнозные оценки и рекомендации формируются с учётом ролей участников процесса — начальника отделения радиационных рисков, главного инженера, технолога и инженера, — и передаются ими через унифицированный интерфейс в соответствии с их полномочиями.

Алгоритм адаптивного управления в реальном масштабе времени выполняет следующие функции:

1. Мониторинг состояния: данные с IoT-датчиков и камер поступают непрерывно [7];
2. Анализ данных: система глубокого обучения обрабатывает изображения и показатели;
3. Принятие решений: обратная связь корректирует и адаптирует процессы;
4. Выполнение команд: оборудование мгновенно выполняет перенастройку параметров;
5. Обновление системы: «цифровой двойник» используется для дальнейшего функционирования системы.

Алгоритм адаптивного управления в реальном масштабе времени представлен на рисунке 3.

Рис. 3. Алгоритм адаптивного управления в реальном времени

Цифровой двойник — основа алгоритмов. Это виртуальная копия рециклингового комплекса, в которой апробируют сценарии переработки сырья при различных условиях. Цифровой двойник комплекса позволяет изменять настройки обработки или транспортировки без использования реального оборудования и без риска для экологии [4].

Алгоритмы построены с применением технологий искусственного интеллекта, анализа больших данных и IoT. Сенсорные датчики, установленные на оборудовании, улавливают радиацию, температуру, давление и вибрацию, и передают данные в центр управления, где нейросетевые модели выполняют их интеллектуальную обработку [8, 9].

Цифровой двойник позволяет персоналу отрабатывать нештатные ситуации на безопасных имитационных моделях.

Оценка эффективности применения алгоритмов

Эффективность применения предложенных алгоритмов была оценена по ключевым показателям эффективности (KPI): время выполнения операций, расход энергии, радиационные угрозы, объём отходов. Тесты проводились в условиях, близких к реальным, на данных, полученных с действующего рециклингового комплекса.

Были получены существенно улучшенные результаты по сравнению с классическим функционированием комплекса. Время реакции на сбои параметров сократилось с минут до секунд за счет оценки и прогнозирования рисков. Предиктивный анализ позволил оптимизировать маршруты транспортировки сырья: затраты снизились на 8 % при одновременном уменьшении вероятности аварий.

Финансовые затраты экономятся не только при эффективной реализации плановых работ, но за счет исключения возникновения чрезвычайных ситуаций. Объем отходов, подлежащих захоронению, уменьшился на 15 %, — в то время как именно затраты на их утилизацию являются самой большой статьей расходов.

Экологические показатели улучшились, поскольку выбросы радиоактивных веществ сократились за счёт фильтров, настроенных по цифровому двойнику [7]. Система мониторинга формирует отчёты, соответствующие требованиям МАГАТЭ и ГОСТ Р 51901.10–2020.

Заключение

На основе проведённого анализа процессов управления рециклинговым комплексом, разработки алгоритмов предиктивного и адаптивного управления, а также оценки их эффективности по ключевым технико-экономическим и экологическим показателям можно сделать вывод, что предложенный подход, опирающийся на системный анализ, использование цифровых двойников, методы машинного обучения и интернета вещей, обеспечивает повышение производительности комплекса, снижение радиационных и экологических рисков, а также оптимизацию использования ресурсов. Внедрение разработанных алгоритмов позволяет сократить время реакции на нештатные ситуации с минут до секунд, уменьшить объём отходов, направляемых на захоронение, и снизить эксплуатационные затраты, что подтверждает их практическую значимость для объектов переработки радиационного вторичного сырья.

Вместе с тем применение интеллектуальных методов управления сопровождается рядом ограничений, связанных с высокими требованиями к объёму и качеству исходных данных, сложностью построения и настройки цифрового двойника, необходимостью подготовки высококвалифицированного персонала и обеспечением кибербезопасности интегрированных систем управления. Указанные факторы задают ограничения для масштабирования предложенных решений и требуют разработки организационно-методических мер, направленных на стандартизацию процедур сбора данных, валидации моделей и аудита принимаемых управленческих решений.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием мультиагентных систем управления, коор-

динирующих работу нескольких рециклинговых комплексов, интеграцией методов федеративного обучения для обмена знаниями без передачи «сырых» данных, а также расширением использования методов анализа больших данных и глубоких нейронных сетей при прогнозировании аварийных ситуаций и оптимизации режимов работы. Важным направлением является также совершенствование нормативно-методической базы, регламентирующей применение искусственного интеллекта, цифровых двойников и предиктивной аналитики при обращении с радиоактивными отходами, что позволит повысить прозрачность управленческих решений, доверие со стороны надзорных органов и общества, а также обеспечить устойчивое развитие отрасли в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. МАГАТЭ. Автоматизация процессов обращения с радиоактивными материалами. — Вена: МАГАТЭ, 2019. — 130 с.
2. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ). Рекомендации по управлению процессами переработки радиоактивных отходов. — Вена: МАГАТЭ, 2021. — 110 с.
3. Павлов, А.И. Экологически безопасные технологии переработки отходов / А.И. Павлов // Экология и промышленность. — 2022. — № 6. — С. 40–47.
4. Гайдук, П.В. Моделирование процессов управления радиационными отходами / П.В. Гайдук, О.Н. Рябова // Экологические технологии. — 2020. — № 3. — С. 25–32.
5. ГОСТ Р 51901.10–2020. Управление рисками. Общие положения и методы анализа. — М.: Стандартинформ, 2020. — 50 с.
6. Каптерев А.И. Технология управления рисками при организации переработки радиационного вторичного сырья на рециклинговом комплексе в условиях сохранения окружающей среды // В сборнике: Открытая наука 2024. Сборник статей III Всероссийской научной конференции с международным участием. Москва, 2024. С. 141–144.
7. Петрова А.М., Ромашкова О.Н., Ермакова Т.Н., Чискидов С.В. Модели процессов функционирования информационной системы мониторинга климата и окружающей среды в арктическом регионе // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2022. № 4–2. С. 104–110.
8. Михеева Е.О., Ромашкова О.Н. Гибкие методы и алгоритмы управления инновационными проектами для предприятий информатизации// Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право. 2022. № 10. С. 63–70.
9. Корендясев С.В., Ромашкова О.Н., Каптерев А.И. Алгоритмы автоматизированного управления рисками в цикле переработки радиационного вторичного сырья // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2025. — № 3. — С. 74–78.

© Корендясев Станислав Васильевич (KorendyasevSV@mgpu.ru); Ромашкова Оксана Николаевна (ox-rom@yandex.ru);
Каптерев Андрей Игоревич (kapterev@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.27

ОБЗОР И АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ УГРОЗ МИКРОСЕРВИСНЫХ АРХИТЕКТУР

OVERVIEW AND ANALYSIS OF THREAT MODELS OF MICROSERVICE ARCHITECTURES

D. Markevich

Summary. Microservice architecture is a fundamentally new approach to application development. This approach allows the system to be divided into separate components that are independent of each other. The components are called microservices (MS). They are small modules that provide solutions to specific business problems. The microservice is characterized by its own logic and its own database.

Microservices are distributed in nature, which leads to increased network traffic and an expansion of the attack surface. During operation, each MS performs continuous data exchange over the network, communicating with other services and users. Communication is carried out through channels that may be vulnerable to attacks.

One of the main requirements for the developed MC is to ensure security. This requirement is due to the high vulnerability of the microservice architecture, due to its complex structure, in comparison with monolithic services. Microservices are distributed in nature, which leads to increased network traffic and an expansion of the attack surface. During operation, each MS performs continuous data exchange over the network, communicating with other services and users. Communication is carried out through channels that may be vulnerable to attacks. Such attacks include: data eavesdropping; unauthorized access; manipulation; low access control [3]. To prevent such threats, it is necessary to conduct a thorough study of them, develop a threat model and assess the likelihood of each of them occurring.

Keywords: microservice, threat, attack, model, network, service.

Маркевич Даниил Владимирович
Аспирант, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
dmarkevich811@mail.ru

Аннотация. Микросервисная архитектура является принципиально новым подходом к разработке приложений. Данный подход позволяет выполнить разделение системы на отдельные компоненты, которые не зависят друг от друга. Компоненты называют микросервисами (МС). Они являются небольшими модулями, которые обеспечивают решение конкретных бизнес-задач. Микросервис характеризуется собственной логикой и собственной базой данных.

Микросервисы обладают распределенным характером, что обуславливает увеличенный сетевой трафик и расширение поверхности атаки. При работе каждый МС производит непрерывный обмен данными по сети, осуществляя связь с другими службами и пользователями. Связь осуществляется по каналам, которые могут быть уязвимы для атак.

Одним из основных требований, которые предъявляются к разработанному МС, является обеспечение безопасности. Это требование обусловлено высокой уязвимостью микросервисной архитектуры, за счет его сложной структуры, в сравнении с монолитными сервисами.

Микросервисы обладают распределенным характером, что обуславливает увеличенный сетевой трафик и расширение поверхности атаки. При работе каждый МС производит непрерывный обмен данными по сети, осуществляя связь с другими службами и пользователями. Связь осуществляется по каналам, которые могут быть уязвимы для атак. К подобным атакам относятся: подслушивание данных; несанкционированный доступ; манипуляции; низкий контроль доступа [3]. Для предотвращения подобных угроз необходимо выполнить их тщательное изучение, разработать модель угроз и оценить вероятность возникновения каждой из них.

Ключевые слова: микросервис, угроза, атака, модель, сеть, сервис.

Структура и особенности микросервисов обуславливают их уязвимость к угрозам. С использованием микросервиса злоумышленник способен получить доступ к критической или стратегической информации. Кроме того, возможно получение доступа к ресурсам всей системы.

Основной особенностью микросервисов, которая обуславливает высокую вероятность возникновения атак, является их распределенная структура [4].

Распределенная структура МС основана на совместном использовании нескольких независимых вычислительных узлов, которые применяются для организации совместной работы с целью решения одной задачи. В качестве узлов могут использоваться как физические устройства, так и программные процессы, либо сложная вложенная система [5].

Распределенная структура характеризуется [1, 2, 6]:

— общим доступом к ресурсам, что означает совместное использование оборудования, ПО, данных;
— выполнением нескольких задач одновременно при работе на нескольких узлах;
— масштабируемостью, которая позволяет повысить производительность системы за счет использования новых узлов и адаптации МС к изменению условий его работы;
— упрощением обнаружения ошибок;

— свободным обменом данных между отдельными узлами.

Распределенная структура микросервиса приводит к увеличению вероятности атак. Вследствие сложности взаимодействия между отдельными микросервисами они становятся весьма уязвимыми для большого спектра угроз.

К наиболее критичным угрозам микросервисов относятся:
— внедрение;
— нарушение аутентификации и управления сеансами;
— межсайтовый скриптинг;
— нарушение контроля доступа;
— неправильная настройка системы безопасности
— и другие.

Основной целью проведенных исследований является оценка и анализ эффективности существующих моделей угроз, разработанных для микросервисных архитектур (МСА). Данное исследование позволит выявить преимущества и недостатки каждой модели и разработать универсальную модель угроз микросервисной архитектуры.

В основе каждой из существующих моделей лежит принцип учета максимального количества угроз, а также совокупность ограничений, на которых построена структура модели.

Разработка модели угроз должна предусматривать:
— объяснение и исследование возможной сторонней активности;
— анализ угроз;
— выявление наиболее приоритетных угроз и принятие мер к их нейтрализации.

До начала работ над созданием микросервиса рекомендуется выполнить адекватную оценку угроз и предложить мероприятия по защите от них микросервиса.

С этой целью рекомендуется разработать модель угроз, оценить вероятность воздействия их на микросервис и принять меры по защите МС.

В настоящее время разработано большое количество различных моделей, которые обеспечивают возможность анализа угроз, оценку степени их негативного воздействия на микросервис, а также направления по нейтрализации этих угроз.

Построение модели угроз необходимо вести в команде, так как командная работа подразумевает мозговой штурм. Данный метод исследования проблемы позволяет повысить вероятность идентификации наиболее важных угроз. Моделирование угроз в условиях группы специалистов дает возможность целостного рассмотрения рисков [7].

Основными проблемами, при формировании модели угроз является невозможность разработки универсальной, идеальной модели, которая может подробно описать весь список угроз. Данная проблема связана с изменчивостью микросервиса, вместе с которым меняются и угрозы.

Еще одной проблемой является то, что создание модели не позволит выработать эффективные меры по защите микросервисов от всех видов угроз.

Разработка модели угроз должна предусматривать:
— объяснение и исследование возможной сторонней активности;
— анализ угроз;
— выявление наиболее приоритетных угроз и принятие мер к их нейтрализации.

По мнению авторов [7] идеальная модель угроз может быть представлена следующей блок-схемой, которая представлена на рисунке 1.

В настоящее время разработано множество моделей угроз МСА, некоторые из которых подробно рассмотрены ниже. Однако, при формировании модели необходимо учитывать, что она в ее основе лежит принцип требований, которые она должна учитывать и совокупность ограничений, которым она должна отвечать.

В модели, разработанной в [8], автор предлагает выполнить синтез нескольких моделей угроз и определить вероятность наступления инцидентов безопасности на всех стадиях работы микросервиса. В качестве объекта исследования в [8] была выбрана мультисервисная сеть связи, для которой разработана синтез модель, показанная на рисунке 2.

В основе этой модели находится такое понятие, как «профиль атаки». Он представляет собой интегрированный вектор. В состав этого вектора входит множество свойств внешних воздействий, которые оказывают деструктивное воздействие на МСС

В исследованиях [8] автор представил атаки на МСС как множество отдельных точек измерения параметров инцидента безопасности. Таким образом, вектор (или профиль) атаки P_a может быть описан следующими параметрами [8]:
— источником атаки;
— местом (удаленностью от объекта атаки);
— мотивацией атакующего объекта;

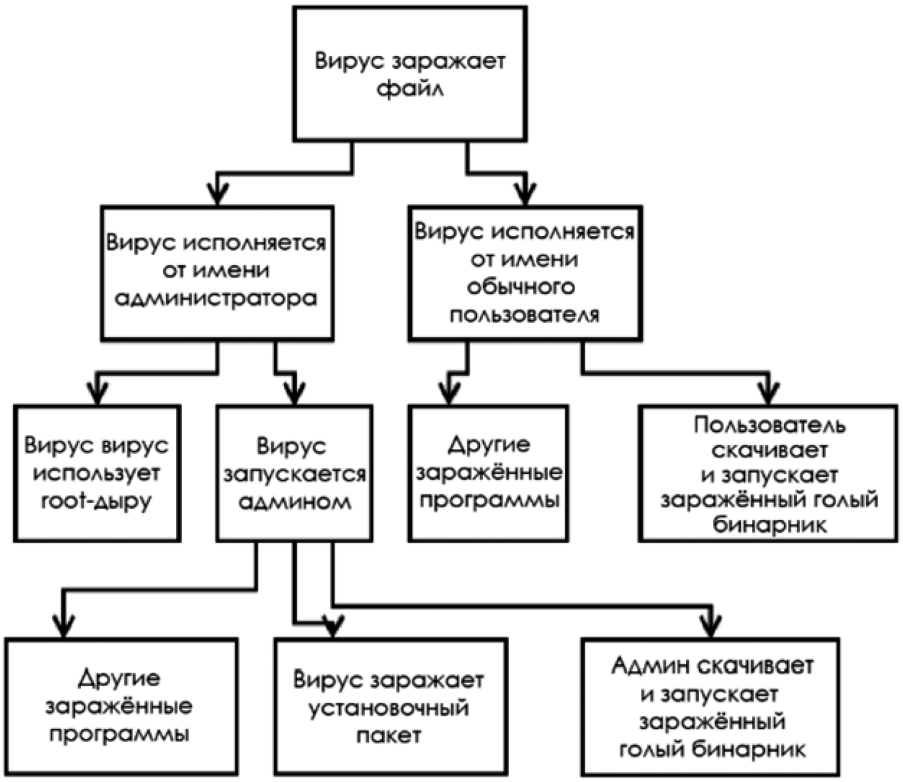


Рис. 1. Блок-схема модели угроз [7]

— целью атаки;
— путями воздействия на объект;
— временем и местом воздействия;
— и другими.

Модель угроз МСС в [8] сформирована на основе сценарного подхода, который описан следующей матрицей, способной на основе синтеза всех видов угроз рассчитать вектор P_a.

$$P_a = \begin{bmatrix} A = \{a_a\}, a \in A_A \\ R = \{r_\beta(A_\beta), \beta \in B_A\} \\ P_r = \{p_\gamma(r_\beta), \gamma \in P_A \in B_A \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

где $A = \{a_a\}, a \in A_A$ — произвольное множество элементов;

$R = \{r_\beta(A_\beta), \beta \in B_A$ — набор отношений на множества

$P_r = \{p_\gamma(r_\beta), \gamma \in P_A \in B_A$ — набор свойств, которые приписываются отношениям из R.

Приведенная выше синтез-модель позволяет систематизировать и оценить угрозы, воздействующие на МСС.

В [9] модель угроз представлена авторами, как неориентированный граф, который позволяет отразить соответствие угроз безопасности МС, отдельным процессам управления системой защиты.

Множество типовых угроз, в соответствии с предложениями, изложенными в [9], представлено в следующем виде:

$$U = (u_1, u_2, \ldots u_n) \quad (1.2)$$

где $u_1, u_2, \ldots u_n$ — множество типовых угроз, которые свойственны МСА;

$$V = (\nu_1, \nu_2, \ldots \nu_n) \quad (1.3)$$

где $\nu_1, \nu_2, \ldots \nu_n$ — множество процессов управления

Еще одним элементом этой модели является множество компонентов системы защиты информации:

$$M = (m_1, m_2, m_3) \quad (1.4)$$

где m_1 — программно-аппаратные средства защиты;
m_2 — нормативная документация;
m_3 — персонал.

Представленная на рисунке 3 модель угроз показывает полное соответствие существующих угроз управляющим процессам.

Представленная на рисунке 3 модель угроз обеспечивает сбор информации по большом объеме угроз, показывает соответствие каждого типа угроз отдельным этапам жизненного цикла, который соответствует определенному компоненту средства защиты информации.

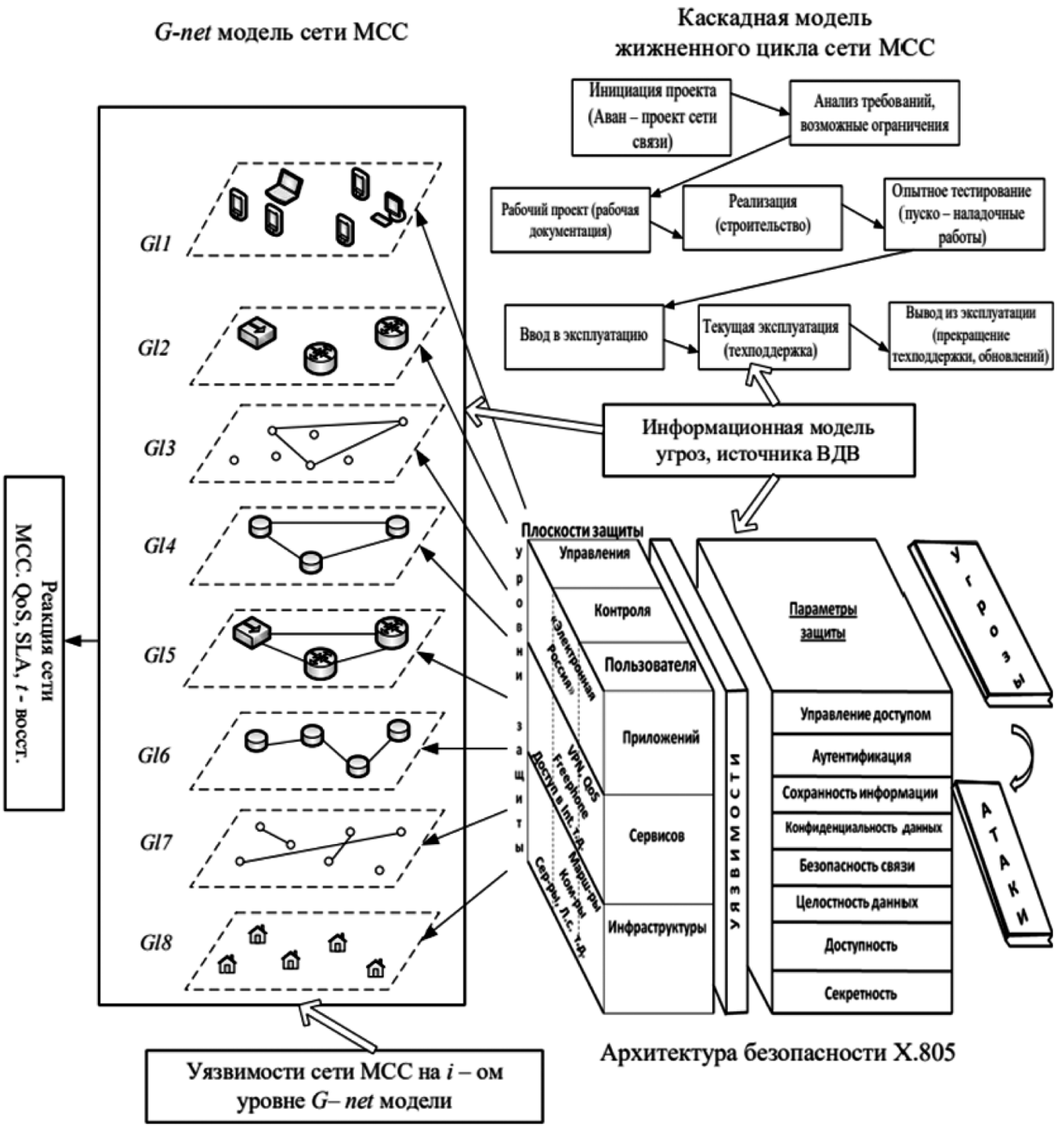


Рис. 2. Синтез-модель мультисервисной сети связи [8]

Авторы [9] подчеркивают эффективность данной модели за счет того, что для каждого из компонентов составлен полный перечень угроз. Использование теории графов для построения модели является новым направлением в этой области и требует дальнейшего рассмотрения и совершенствования.

По результатам анализа моделей угроз, разработанных сторонними авторами, можно заключить, что все эти модели основаны на математических методах обработки информации, которые позволяют оценить, систематизировать и подвергнуть анализу большие объемы данных.

Однако, эти модели имеют существенный недостаток, который заключается в отсутствии адаптивности к постоянно меняющимся угрозам. В их основе лежит систематизированный набор известных угроз.

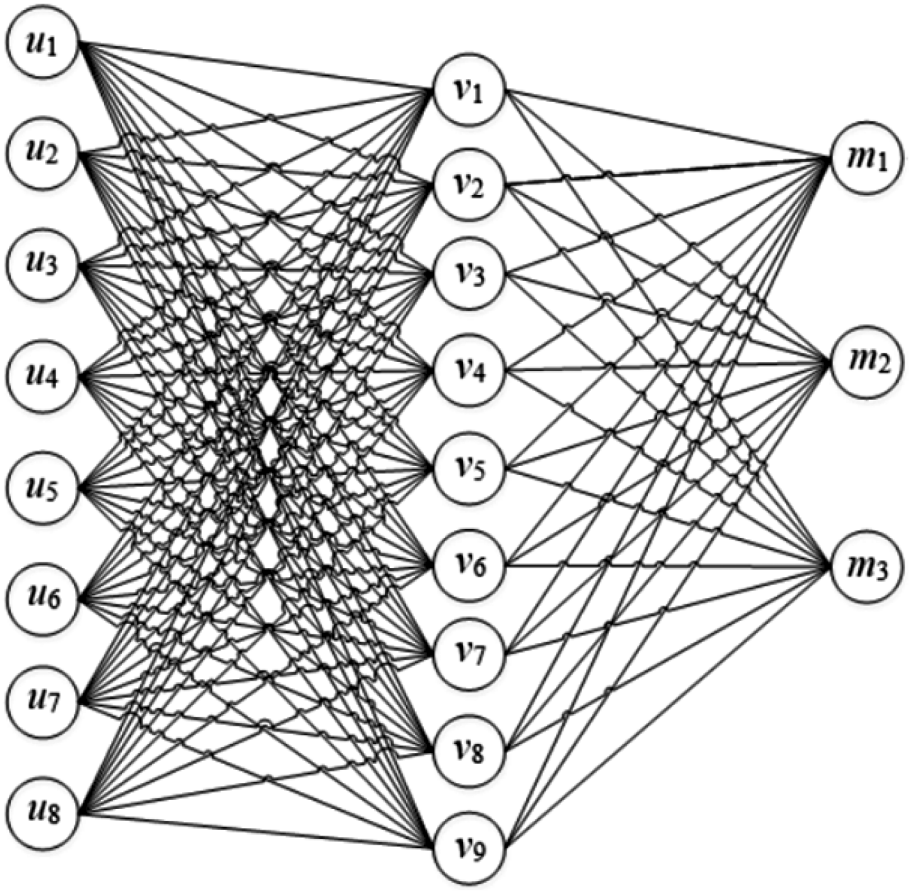


Рис. 3. Модель угроз безопасности [9]

Так как с течением времени количество угроз увеличивается, возрастает частота атак, усложняются методы противодействия им, то необходимо совершенствовать модель угроз.

Выводы

Проведенный анализ моделей угроз, разработанных для микросервисной архитектуры показывает недостаточную изученность угроз, отсутствие возможности учета их изменения и адаптации под разрабатываемые методы защиты.

Кроме того, модели не предусматривают ранжирование угроз по степени опасности и уровню опасности для микросервиса. Для создания эффективной модели рекомендуется составление базы данных угроз, ранжирование их по степени опасности для МС, проведение оценки последствий каждой из угроз для работы микросервиса и потери данных.

Также для создания универсальной модели угроз микросервиса предлагается использовать совокупность нескольких методов (статистических и математических), которые позволяют анализировать большой объем данных и прогнозировать воздействие внешних воздействий на изучаемый объект.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кравченко Д.А. Микросервисная архитектура. // Интерактивная наука, 4 (69), 2022. С.
2. Nuno Mateus-Coelhoa, Manuela Cruz-Cunhab, Luis Gonzaga Ferreira. Security in Microservices Architectures. // CENTERIS — International Conference on ENTERprise Information Systems / ProjMAN — International Conference on Project MANagement / HCist — International Conference on Health and Social Care Information Systems and Technologies 2020.
3. The Age of Microservices — Amazon ECS Service Discovery. (2018, June 28). Retrieved October 20, 2020, from https://www.trinimbus.com/blog/the-age-of-microservices-amazon-ecs-service-discovery/.
4. Sahni, V. (n.d.). Best Practices for Building a Microservice Architecture. Retrieved October 20, 2020, from https://www.vinaysahni.com/bestpractices-for-building-a-microservice-architecture.

5. URLL: https://rb.ru/stories/chto-takoe-raspredelennaya-sistema/ [Электронный ресурс]. Дата обращения 12.12.2025.
6. Митра Р., Надареишвили И. М62 Микросервисы. От архитектуры до релиза. — СПб.: Питер, 2023–336 с.: ил. — (Серия «Бестселлеры O'Reilly»).
7. URLL: https://habr.com/ru/companies/vk/articles/504062/ [Электронный ресурс]. Дата обращения 09.12.2025.
8. Попков Г.В. К вопросу формирования частной модели угроз ля мультисервисных сетей связи. // Новосибирск, «Интерэкспо ГЕО-СИБИРЬ», т. 6, С. 167–171.
9. Соловьев М.П., Минеева Т.Е., Конев А.А. и др. Модель угроз безопасности, возникающих при управлении системой защиты информации. // Доклады ТУСУР, 2019, том 22, № 3. С. 31–36.
10. Ковалева Е.Г. Анализ угроз информационной безопасности. // Е.Г. Ковалева, В.Л. Акапьев, А.В. Борисенко, Р.А. Дунаев, А.В. Кузнецов. — СПб.: Наукоемкие технологии, 2026–120 с.

© Маркевич Даниил Владимирович (dmarkevich811@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.28

ВЫБОР СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПОСАДКИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

SELECTION OF A SYSTEM OF UNMANNED AERIAL PLATFORMS FOR INFORMATION SUPPORT OF AUTOMATED LANDING CONTROL SYSTEMS OF CIVIL AVIATION AIRCRAFT

A. Maslov

Summary. This article discusses the solution of the problem of selecting a system (data transmission network) of unmanned aerial platforms for information support of automated landing control systems. A criterion for selecting such a system is proposed by minimizing the economic resource. A calculation example is given for selecting the required number of unmanned aerial platforms for an area with high air traffic intensity. The criterion for selecting a system of unmanned aerial platforms based on the reliability criterion has been formulated. The result of constructing such a system has been obtained.

Keywords: unmanned aerial platform, automated control system, information system, information coverage.

Маслов Александр Константинович
Аспирант, Московский государственный технический университет гражданской авиации
aleksandr.maslov.00@mail.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается решение задачи выбора системы (сети передачи данных) беспилотных авиационных платформ для информационного обеспечения автоматизированных систем управления посадки. Предложен критерий выбора такой системы путём минимизации по экономическому ресурсу. Приведён расчётный пример выбора необходимого числа беспилотных авиационных платформ для зоны с высокой интенсивностью воздушного движения. Сформулирован критерий выбора системы беспилотных авиационных платформ по критерию надёжности. Получен результат построения такой системы.

Ключевые слова: беспилотная авиационная платформа, автоматизированная система управления, информационная система, информационное покрытие.

Введение

Беспилотные авиационные платформы (БАП) рекомендуются для посадки воздушных судов гражданской авиации в горных районах. Требования к системам, используемым для проведения полётов в таких районах, заключаются в соответствии требованиям по мобильности, универсальности, готовности, непрерывности обслуживания и целостности, сертифицируемости системы, возможности её комплексного использования с другими системами передачи и обработки информации в автоматизированных системах управления посадки (АСУП).

На рис. 1 приведён пример использования БАП для информационного обеспечения АСУП вертолётов.

Иногда возникают ситуации (опять же для различных регионов и аэропортов), когда использование одной БАП в качестве источника данных для информационного обеспечения АСУП бывает недостаточно. Возникает проблема определения числа БАП, необходимых для решения конкретной задачи, так как использование их в виде ненагруженного резерва также неразумно с точки зрения экономии ресурса.

Выбор системы из нескольких беспилотных авиационных платформ путём минимизации по экономическому ресурсу

При условии минимизации экономического ресурса целевая функция будет иметь вид [1]:

$$C_{sys}(N) = N * C_{unit} + C_{infrastructure} \quad (1)$$

где: N – количество БАП, C_{unit} – стоимость одной БАП, $C_{infrastructure}$ – стоимость инфраструктуры.

Введём два ограничения для целевой функции:

1) $P_{sys}(N)$ — Надёжность информационной системы из N независимых БАП выражается через вероятность отказа каждого БАП P_{unit}:

$$P_{sys}(N) = 1 - (1 - P_{unit})^N \quad (2)$$

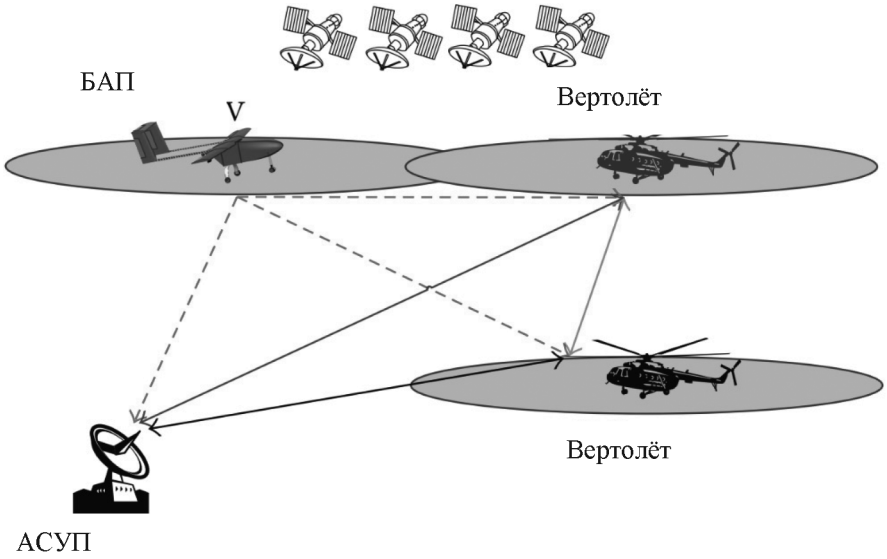


Рис. 1. Пример использования БАП в качестве элемента сети, передающей и обрабатывающей информационные данные

$A_{sys}(N)$ — Суммарная площадь информационного покрытия. Зависит от N — количества БАП, площади покрытия одного БАП A_{unit} и коэффициента эффективности k, зависящего от рельефа:

$$A_{sys}(N) = N * A_{unit} * k \quad (3)$$

Сформулируем критерий выбора наилучшего количества БАП:

$$C_{sys}(N) \to min$$

$$P_{sys(N)} \geq P_{min} \quad (4)$$

$$A_{sys}(N) \geq A_{min}$$

где P_{min}, A_{min} — некоторые предельные значения.

Для примера возьмем регион с интенсивным воздушным движением. В зоне с интенсивным воздушным движением приоритетом является обеспечение высокой надежности информационной системы для минимизации рисков. Также важно учитывать необходимость координации с другими воздушными объектами. Информационное покрытие должно быть достаточным для выполнения поставленных задач, но надежность становится ключевым критерием.

Исходные данные:

1) Надежность одного БАП $P_{unit} = 0.85$ (вероятность безотказной работы)
2) Минимальная надёжность полученной системы $P_{min} = 0.995$
3) Площадь покрытия одним БАП $A_{unit} = 3\,км^2$
4) Коэффициент эффективности покрытия $k = 0.9$
5) Минимальная площадь покрытия $A_{min} = 15\,Œ^2$
6) Стоимость одного БАП $C_{unit} = 150$
7) Затраты на инфраструктуру $C_{infrastructure} = 700$

Целевая функция — $C_{sys}(N) = N * C_{unit} + C_{infrastructure}$

Ограничения:

- Надёжность $P_{sys(N)} = 1 - (1 - P_{unit})^N \geq P_{min}$
- Покрытие $A_{sys}(N) = N * A_{unit} * k \geq A_{min}$

Решение:

$$P_{sys}(N) = 1 - (1 - 0.85)^N \geq 0.995$$

$$(1 - 0.85)^N \leq 0.005$$

$$0.15^N \leq 0.005$$

$$N \geq \log_{0.15}(0.005)$$

$$N \geq \frac{\ln(0.005)}{\ln(0.15)}$$

$$N \geq \frac{-5.298}{-1.897} \approx 2.8$$

Округляем результат, получаем что $N = 3$

Проверим второе ограничение

$$A_{sys}(N) = N * 3 * 0.9 \geq 15$$

$$N * 2.7 \geq 15$$

$$N \geq \frac{15}{2.7} \approx 5.6$$

Округляем результат, получаем что $N = 6$

Итоговое количество БАП для выполнения обоих ограничений $N = 6$

Рассчитаем затраты для системы состоящий из 6 БАП

$$C_{sys}(N) = N * C_{unit} + C_{infrastructure}$$

$$C_{sys}(6) = 6 * 150 + 700 = 1600$$

Проверка ограничений.

Надёжность:

$$P_{sys}(6) = 1 - (1 - 0.85)^6 = 1 - 0.15^6 = \\ = 1 - 0.000113 = 0.999887$$

Информационное покрытие:

$$A_{sys}(6) = 6 * 3 * 0.9 = 16.2\,км^2$$

Выбор системы из нескольких беспилотных авиационных платформ путём минимизации по критерию надёжности

Состояние БАП оценивается на основе двух признаков B_i и C_i. При этом в процессе оценки состояния БАП могут возникать ошибки 1-го и 2-го рода [2]:

1) БАП признан не отвечающим требованиям к надёжностным характеристикам, при условии, что это не так. Пусть вероятность этой ситуации будет ε_i для признака B_i и ε_i' для признака C_i.
2) БАП признан удовлетворяющим вышеперечисленным признакам, при условии, что это не так. Пусть вероятность этой ситуации будет δ_i для признака B_i и δ_i' для признака C_i.

Введём значения, определяющие состояние каждой БАП:

а) по признаку B_i :

$x_i = 0$ — БАП считается функционирующим,

$x_i = 1$ — БАП считается нефункционирующим;

б) по признаку C_i :

$y_i = 0$ — БАП признан функционирующим,

$y_i = 1$— БАП признан нефункционирующим.

n-я БАП представляется возможной для использования в информационной системе только при одновременном выполнении двух условий $B_n = 0$ и $C_n = 1$. Можно сделать предположение, что ошибки определения состояния БАП происходят независимо [3].

Таким образом, БАП можно использовать в составе информационной системы (сети передачи данных) при условии, что оценка её состояния говорит об обратном:

$$P = P(B_i = 0, C_i = 1 / x_i = 1, y_i = 0) + \\ + P(B_i = 0, C_i = 1 / x_i = 1, y_i = 1) + \\ + P(B_i = 0, C_i = 1 / x_i = 0, y_i = 0) = \\ = \varepsilon_i\varepsilon_i' + \varepsilon_i(1 - \varepsilon_i') + (1 - \varepsilon_i)\varepsilon_i'.$$

БАП нельзя использовать в составе системы при условии, что оценка его состояния говорит об обратном:

$$P = \delta_i\delta_i' + \delta_i(1 - \varepsilon_i') + \delta_i'(1 - \varepsilon_i).$$

Для обозначения состояния всей информационной системы из БАП введём символ Φ [4]. При функционировании системы из БАП считаем, что $\Phi = 1$. Иначе, будем считать, что $\Phi = 0$.

Рассмотрим состояние информационной системы БАП как функцию $\Phi(B,C)$, где $(B,C) = ((B_1,C_1),(B_2C_2),\ldots,(B_n,C_n))$ — это вектор состояния системы, где n — число БАП в системе [5].

Для всей информационной системы введём функцию $R(p)$, определяющую вероятность того, что $\Phi(B,C) = 1$.

$R(p)$ описывается следующим образом:

$$R = E\Phi(B,C) = \sum_{X,Y} P(B,C)\Phi(B,C) = \\ = \sum_{X,Y:\Phi(X,Y)=1} \prod_{i=1}^{n} p_i^{f(B_i,C_i)}(1 - p_i)^{1-f(B_i,C_i)}$$

где $E\Phi(B,C)$ — математическое ожидание состояния информационной системы.

$\varepsilon_{1,2,s}$ и $\delta_{1,2,s}$ записываются следующим образом:

$$\varepsilon_{1,2,s} = C_s^1\varepsilon^{\alpha_s} + C_s^2\varepsilon^{\alpha_{s+1}} + \ldots + C_s^{n-\alpha_s}\varepsilon^n; \quad (6)$$

$$\delta_{1,2,s} = C_s^{/1}\delta^{\beta_s} + C_s^{/2}\delta^{\beta_{s+1}} + \ldots + C_s^{/n-\beta_s+1}\delta^n. \quad (7)$$

Запишем функцию, учитывая (6), (7):

$$F_s(\varepsilon,\delta) = \varepsilon_{1,2,s} + \delta_{1,2,s} = \\ = 1 + R(\varepsilon_{1,2,1},\varepsilon_{1,2,2},\ldots,\varepsilon_{1,2,n}) - \\ - R(1 - \delta_{1,2,1},\delta_{1,2,2},\ldots,1 - \delta_{1,2,n}) = \\ = C_s^1\varepsilon^{a_s} + \ldots + C_s^{n-a_s+1}\varepsilon^n + C_s^{/1}\delta^{\beta_s} + \ldots + C_s^{/1-\beta_s+1}\delta^n \quad (8)$$

Сформулируем критерий выбора наилучшего набора БАП с использованием АСУП. Система является наилучшей, если сумма ошибок для каждого из признаков будет минимальна, при ограничении по стоимости:

$$\min F_s(\varepsilon,\delta),$$
$$C \le \gamma,$$

где γ — некоторое предельное значение для стоимости.

Сформулируем результат, имеющий значение для выбора информационной системы (сети передачи данных) БАП:

Пусть $\varepsilon,\delta \to 0$, $\varepsilon = L\delta^2$, где L — произвольная константа, $\delta \to 0$, $z > 1$. Для данного случая $\min\limits_{s\in S} F_s(\delta) = F_{s^*}(\delta)$, где s^* — это информационная система БАП типа $\left[\frac{n+z}{z+1}\right]$ из n.

В данном случае и при этом соотношении между ошибками в оценке состояния каждой БПП в качестве решения следует предложить систему БАП, в которой соответствуют приведенным условиям хотя бы $\left[\frac{n+z}{z+1}\right]$ из n её БАП, где $\left[\frac{n+z}{z+1}\right]$ — целая часть числа, z — показатель степенной зависимости между ошибками оценки состояния БАП.

Заключение

В данной статье решалась задача выбора системы (сети передачи данных) из беспилотных авиационных платформ для информационного обеспечения автоматизированной системы управления посадки.

В работе получены следующие результаты:

1. Предложен критерий определения необходимого числа беспилотных авиационных платформ по минимизации экономического ресурса.
2. Для региона с интенсивным воздушным движением проведён расчёт по определению необходимого числа беспилотных авиационных платформ.
3. Сформулирован критерий определения необходимого числа беспилотных авиационных платформ по критерию надёжности
4. Получен результат, позволяющий определить необходимое число беспилотных авиационных платформ для информационного обеспечения автоматизированной системы управления посадки по критерию надёжности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Затучный Д.А., Маслов А.К. Метод посадки воздушных судов с использованием оптико-электронной системы. — Труды Международного симпозиума «Надёжность и качество», г. Пенза, 2024, Том 1, стр. 38–41.
2. Затучный Д.А., Маслов А.К. Использование беспилотных летательных аппаратов для обеспечения безопасности полётов воздушных судов. — Труды Международного симпозиума «Надёжность и качество», г. Пенза, 2024, Том 2, стр. 171–173.
3. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. Под ред.: М.Н. Красильщикова, Г.Г. Серебрякова. — М., ФИЗМАТЛИТ, 2009.
4. Витушкин В.В. Построение цифровой системы обмена данными между воздушными судами при переходе к перспективным режимам управления полётом. — Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества. Сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции, посвящённой 100-летию отечественной гражданской авиации России, Москва, 2023, стр. 431–433.
5. Автоматизированные системы управления воздушным движением. Под редакцией Ю.Г. Шатракова. — Спб.: ГУАП, 2013.

© Маслов Александр Константинович (aleksandr.maslov.00@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.29

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА УСПЕВАЕМОСТИ СТУДЕНТОВ ВЕТЕРИНАРНОГО ВУЗА

METHODOLOGICAL BASIS FOR USING NEURAL NETWORKS IN VETERINARY STUDENT PROGRESS MONITORING SYSTEMS

R. Nurgaziev
Yu. Mindlin
N. Verezubova

Summary. The article discusses the methodological foundations of integrating neural network technologies into the systems of monitoring the academic performance of students at veterinary universities in the Russian Federation. An analytical review of existing approaches to building predictive models of academic performance based on machine learning methods is conducted. The specifics of veterinary education are considered, which determine the specific requirements for the architecture of monitoring systems: the presence of a significant number of practice-oriented disciplines, clinical practice, and laboratory classes with biological material. The capabilities of domestic digital platforms and artificial intelligence tools for solving educational analytics tasks are analyzed.

Keywords: neural networks, academic performance monitoring, veterinary education, educational analytics, predictive models, machine learning, LMS, digital educational environment.

Нургазиев Руслан Балтабайевич
Кандидат технических наук, доцент, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии имени К.И. Скрябина
456.09@mail.ru
Миндлин Юрий Борисович
Кандидат экономических наук, доцент, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии имени К.И. Скрябина
mindliny@mail.ru
Верезубова Наталья Афанасьевна
Кандидат экономических наук, доцент, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии имени К.И. Скрябина
nverez@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются методологические основы интеграции технологий нейронных сетей в системы мониторинга успеваемости студентов ветеринарных вузов Российской Федерации. Проведён аналитический обзор существующих подходов к построению предиктивных моделей академической успеваемости на основе методов машинного обучения. Рассмотрена специфика ветеринарного образования, определяющая особые требования к архитектуре систем мониторинга: наличие значительного объёма практико-ориентированных дисциплин, клинической практики, лабораторных занятий с биологическим материалом. Проанализированы возможности отечественных цифровых платформ и инструментов искусственного интеллекта для решения задач образовательной аналитики.

Ключевые слова: нейронные сети, мониторинг успеваемости, ветеринарное образование, образовательная аналитика, предиктивные модели, машинное обучение, LMS, цифровая образовательная среда.

Введение

Цифровая трансформация высшего образования в Российской Федерации, закреплённая в национальном проекте «Цифровая экономика» и Федеральном проекте «Цифровая образовательная среда», ставит перед вузами задачу внедрения технологий искусственного интеллекта (ИИ) в образовательный процесс. В Указе Президента Российской Федерации от 10 октября 2019 года № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» прямо обозначена сфера образования как одно из приоритетных направлений применения технологий ИИ. Это создаёт институциональную и нормативную рамку для разработки и внедрения интеллектуальных систем мониторинга учебного процесса.

Мониторинг успеваемости традиционно понимается как систематическое отслеживание образовательных результатов, обучающихся с целью принятия управленческих решений [1, с. 214–217]. В отечественной педагогике высшей школы данная задача решалась преимущественно средствами балльно-рейтинговой системы, журналов посещаемости и промежуточной аттестации. Однако эти инструменты носят констатирующий характер, они фиксируют уже свершившийся факт академической неуспешности, но не позволяют прогнозировать её на ранних стадиях. Именно в этой точке возникает

запрос на предиктивную аналитику, инструментом которой могут выступать нейронные сети [2, с. 24–28].

Ветеринарное образование в России обладает выраженной спецификой, которая существенно влияет на архитектуру любой системы мониторинга. Подготовка по специальности 36.05.01 «Ветеринария» (уровень специалитета, срок обучения — 5 лет) регламентирована ФГОС ВО и предполагает формирование широкого спектра компетенций: от фундаментальных естественнонаучных (биохимия, анатомия, физиология животных) до узкопрофессиональных клинических (хирургия, внутренние незаразные болезни, эпизоотология, ветеринарно-санитарная экспертиза). Значительную долю учебной нагрузки составляют лабораторные и практические занятия, учебные и производственные практики на базе ветеринарных клиник, животноводческих предприятий, мясоперерабатывающих комбинатов. Оценка качества освоения таких видов деятельности плохо поддаётся стандартной цифровой фиксации и требует специальных подходов к сбору и обработке данных.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено в формате аналитического обзора. Информационную базу составили публикации в рецензируемых российских журналах (индексируемых в РИНЦ), нормативно-правовые акты Российской Федерации в сфере образования и искусственного интеллекта, техническая документация отечественных цифровых образовательных платформ, а также ограниченный массив зарубежных публикаций по образовательной аналитике, доступных в базах Scopus и Web of Science. Методологическую рамку обзора составляет системно-деятельностный подход, принятый в отечественной педагогике высшей школы в качестве основы проектирования образовательных программ по ФГОС ВО.

Результаты и обсуждение

1. Архитектура данных в системах мониторинга ветеринарного вуза

Эффективность любой нейросетевой модели определяется прежде всего качеством и полнотой входных данных. В контексте ветеринарного вуза источники данных для системы мониторинга могут быть классифицированы следующим образом:

Первый уровень — данные LMS (Learning Management System). Большинство российских ветеринарных вузов, включая МВА имени К.И. Скрябина (Москва), Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины, Казанскую государственную академию ветеринарной медицины имени Н.Э. Баумана, используют системы управления обучением. LMS фиксирует цифровой след обучающегося: время входа в систему, продолжительность работы с учебным контентом, результаты тестирования, сроки сдачи заданий, количество попыток [3].

Второй уровень — данные деканата и учебно-методического управления. Это структурированные данные из автоматизированных информационных систем управления вузом (АИС): результаты промежуточной аттестации (экзамены, зачёты), сведения о посещаемости, информация о переаттестации, академических задолженностях, переводах и отчислениях. В отечественной практике такие данные хранятся, как правило, в ERP-системах.

Третий уровень — данные практико-ориентированного компонента. Специфика ветеринарного образования состоит в том, что значительная часть профессиональных компетенций формируется в ходе клинической практики, работы в учебных ветеринарных клиниках, виварии, на секционном курсе. Оценка этих видов деятельности носит преимущественно экспертный характер (оценка преподавателя, руководителя практики) и фиксируется в журналах, дневниках практик, портфолио. Перевод данных этого уровня в машиночитаемый формат представляет отдельную методологическую задачу.

Четвёртый уровень — контекстные данные. Сюда относятся сведения о форме обучения (очная, очно-заочная), источнике финансирования (бюджет, контракт), регионе проживания, результатах ЕГЭ, наличии среднего профессионального образования по родственной специальности. Эти данные могут выступать предикторами академической успешности, что показано в ряде отечественных исследований [4, с. 149–153].

2. Типы нейросетевых архитектур, применимых к задаче мониторинга

Задача прогнозирования академической успеваемости по своей математической природе относится к задачам классификации (например, бинарная: «успешно завершит семестр / не завершит») или регрессии (прогноз среднего балла). Для решения таких задач в литературе описано применение нескольких классов нейросетевых моделей.

Многослойный перцептрон (MLP, полносвязная нейронная сеть). Это базовая архитектура, хорошо зарекомендовавшая себя в задачах классификации на табличных данных. Входной вектор формируется из числовых признаков (баллы, посещаемость, активность в LMS), модель обучается на исторических данных о студентах, уже завершивших обучение. В работах отечественных авторов показано, что MLP с двумя-тремя скрытыми слоями демонстрирует точность порядка 75–85 % в задаче

прогнозирования отчисления за академическую неуспеваемость [5, с.169-171].

Рекуррентные нейронные сети, в частности LSTM — эта архитектура предназначена для обработки последовательных данных и оптимальна в тех случаях, когда важна динамика показателей студента во времени: как менялась его успеваемость от семестра к семестру, как эволюционировала его активность в LMS на протяжении модуля. LSTM способна выявлять долгосрочные зависимости, например связь между снижением активности на втором курсе и вероятностью отчисления на третьем. Данная архитектура особенно перспективна для ветеринарного вуза с его пятилетним сроком обучения, где траектории студентов длинны и могут содержать сложные закономерности.

Свёрточные нейронные сети (CNN). Традиционно ассоциируемые с обработкой изображений, CNN в контексте образовательной аналитики могут применяться, например, для анализа визуальных образовательных артефактов (микроскопические изображения в курсе гистологии или патологической анатомии — дисциплинах, являющихся ключевыми в ветеринарном образовании). Однако для задачи мониторинга успеваемости в чистом виде эта архитектура менее релевантна.

Градиентный бустинг и ансамблевые методы. Хотя формально это не нейронные сети, алгоритмы XGBoost, LightGBM и CatBoost часто используются параллельно с нейросетевыми моделями и нередко превосходят их по точности на табличных данных. CatBoost, в частности, обладает встроенной поддержкой категориальных признаков (например, название дисциплины, кафедра, тип занятия), что делает его удобным инструментом для прототипирования систем мониторинга в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, характерных для большинства российских вузов [6, с.179-184; 7].

3. Методологические принципы построения системы мониторинга

На основе проведённого анализа можно сформулировать ряд методологических принципов, которые должны лежать в основе проектирования нейросетевой системы мониторинга успеваемости в ветеринарном вузе.

Принцип компетентностного соответствия. Система мониторинга должна отражать структуру компетенций, заданную ФГОС ВО по специальности 36.05.01 «Ветеринария». Это означает, что модель не может ограничиваться прогнозированием единственного интегрального показателя (среднего балла), а должна учитывать кластеры дисциплин, формирующих различные группы компетенций: общепрофессиональные, профессиональные, универсальные [8, с. 120–123]. Например, студент может демонстрировать высокие результаты в блоке теоретических дисциплин (биохимия, физиология) и одновременно испытывать затруднения в клиническом блоке (внутренние болезни животных, хирургия), что требует дифференцированного анализа.

Принцип мультимодальности данных. Как было показано выше, ветеринарное образование генерирует данные различной природы: числовые (баллы), категориальные (тип занятия), темпоральные (динамика), текстовые (отзывы руководителей практики, записи в клинических журналах). Нейросетевая модель должна обладать способностью к обработке мультимодальных входов, что может быть реализовано через архитектуру с несколькими ветвями (multi-input model), каждая из которых обрабатывает свой тип данных.

Принцип интерпретируемости. В образовательном контексте недостаточно получить прогноз — необходимо объяснить его педагогическому работнику и, в ряде случаев, самому студенту. «Чёрный ящик» нейронной сети, выдающий вероятность отчисления без указания причин, имеет ограниченную практическую ценность. В связи с этим актуально применение методов объяснимого ИИ (Explainable AI, XAI): SHAP-анализа, LIME, анализа значимости признаков. Это позволяет ответить на вопрос: какие именно факторы (пропуск лабораторных по анатомии, низкие баллы за текущий контроль по фармакологии, снижение активности в LMS) вносят наибольший вклад в неблагоприятный прогноз [9, с. 103–105].

Принцип этической и правовой допустимости. Обработка персональных данных студентов в Российской Федерации регулируется Федеральным законом № 152-ФЗ «О персональных данных». Любая система мониторинга, использующая нейросетевые технологии, должна соответствовать требованиям данного закона, в том числе в части получения согласия субъекта на обработку данных, обеспечения их безопасности и ограничения доступа. Кроме того, возникает этический вопрос о допустимости принятия административных решений (например, об усилении контроля, вызове на комиссию) исключительно на основании алгоритмического прогноза. Методологически корректной представляется позиция, при которой нейросетевая модель выступает инструментом поддержки принятия решений, но не заменяет экспертное суждение преподавателя и администрации [10, с. 92–94].

4. Отечественные технологические решения и инфраструктура

Практическая реализация нейросетевого мониторинга в российском ветеринарном вузе опирается на доступный стек технологий. В условиях курса на технологи-

ческий суверенитет актуален вопрос об использовании отечественных решений.

Фреймворки машинного обучения: хотя доминирующие библиотеки (TensorFlow, PyTorch) имеют зарубежное происхождение, они являются открытым программным обеспечением и свободно доступны.

Для сбора и хранения образовательных данных основой служат системы LMS (адаптированный под нужды конкретного вуза) и АИС. Интеграция между ними может быть реализована через API-взаимодействие, однако на практике это требует значительных усилий по стандартизации форматов данных. Перспективным направлением является использование стандарта xAPI, позволяющего фиксировать разнообразные учебные события в едином формате, однако степень его распространённости в российских вузах пока невелика [11, с. 37-39].

Вычислительные мощности остаются существенным ограничением. Обучение глубоких нейросетевых моделей требует GPU-ускорителей, которые в российских вузах, как правило, доступны лишь в составе серверов для научных расчётов и не всегда могут быть задействованы для задач образовательной аналитики. Альтернативой является использование облачных вычислений, однако это сопряжено с дополнительными финансовыми затратами и вопросами безопасности персональных данных [12, с. 86].

Проведённый анализ позволяет выделить несколько ключевых проблем, определяющих перспективы и ограничения применения нейронных сетей в системах мониторинга успеваемости ветеринарного вуза. Проблема объёма обучающей выборки состоит в том, что нейронные сети, особенно глубокие архитектуры, требуют значительных объёмов данных для обучения. Ветеринарные вузы в России представляют собой относительно небольшие образовательные организации. Ежегодный приём на специальность «Ветеринария» в одном вузе составляет, как правило, от 100 до 300 человек. Даже при накоплении данных за десять лет общий объём обучающей выборки не превысит нескольких тысяч записей — это порядок величины, при котором глубокие нейронные сети не имеют значительного преимущества перед классическими алгоритмами машинного обучения (логистическая регрессия, случайный лес, градиентный бустинг). В этих условиях методологически обоснованным является использование неглубоких нейросетевых архитектур (MLP с одним-двумя скрытыми слоями) или ансамблевых методов, а также техник аугментации данных и трансферного обучения, при котором модель предварительно обучается на данных более крупного вуза или консорциума вузов.

Прямой перенос моделей мониторинга, разработанных для других направлений подготовки (экономика, юриспруденция, IT), на ветеринарный вуз методологически некорректен. Структура учебного плана по специальности «Ветеринария» включает дисциплины, не имеющие аналогов в других направлениях: клиническую диагностику с рентгенологией, оперативную хирургию с топографической анатомией, акушерство и гинекологию животных, паразитологию и инвазионные болезни. Критерии успешности освоения этих дисциплин включают не только теоретические знания, проверяемые тестами, но и практические навыки (умение проводить клинический осмотр животного, выполнять хирургические манипуляции, интерпретировать результаты лабораторных исследований), которые фиксируются преимущественно в экспертных оценках. Модель мониторинга должна учитывать эту двойственность.

Решение проблемы малых выборок возможно через создание межвузовских датасетов. В Российской Федерации действует ряд организаций, объединяющих ветеринарные вузы: Ассоциация «Ветеринарное образование и наука», координационные советы учебно-методических объединений. Эти площадки могли бы стать основой для формирования консорциума, в рамках которого вузы предоставляют деперсонализированные данные для обучения общей модели. Технически это может быть реализовано, в том числе, через механизм федеративного обучения, при котором модель обучается на распределённых данных без их централизованного сбора, что снимает часть проблем, связанных с защитой персональных данных.

Даже при наличии технически работоспособной модели её внедрение в реальный образовательный процесс сопряжено с организационными барьерами. Профессорско-преподавательский состав ветеринарных вузов — это, как правило, специалисты-практики (ветеринарные врачи, биологи, зоотехники), для которых технологии искусственного интеллекта не являются частью профессионального инструментария [13, с. 62–64; 14, с. 75–77]. Необходима системная работа по повышению цифровой грамотности ППС, формированию культуры работы с данными и преодолению обоснованных опасений относительно «алгоритмического контроля». Методологически важно, чтобы система мониторинга воспринималась не как инструмент надзора, а как инструмент помощи — и преподавателю, и студенту.

В зарубежной практике системы предиктивной аналитики успеваемости получили значительное распространение. Однако эти системы разработаны для массовых университетов с десятками тысяч студентов и не могут быть механически перенесены на условия российского специализированного вуза. Тем не менее, общие методологические подходы — раннее оповещение, светофорная индикация уровня риска, персонализированные рекомендации — вполне адаптируемы [15, с. 73–76].

Выводы

Применение нейронных сетей в системах мониторинга успеваемости студентов ветеринарного вуза является методологически обоснованным и технологически реализуемым направлением, отвечающим задачам цифровой трансформации высшего образования в Российской Федерации. Нейросетевые модели способны выявлять нелинейные зависимости между множеством факторов, влияющих на академическую успешность, и формировать прогнозы, полезные для управленческих решений.

Специфика ветеринарного образования — высокая доля практико-ориентированного компонента, мультимодальность оценочных процедур, относительно малый контингент обучающихся — предъявляет особые требования к выбору архитектуры нейросетевой модели. В условиях ограниченного объёма данных приоритет следует отдавать неглубоким архитектурам (MLP) и ансамблевым методам (в том числе отечественному CatBoost), при этом рекуррентные сети перспективны для анализа динамики учебных траекторий на протяжении пятилетнего срока обучения.

Критически важными условиями успешного внедрения являются: обеспечение качества и полноты входных данных (интеграция LMS, АИС, данных практик); интерпретируемость результатов модели для педагогических работников; соблюдение требований законодательства о персональных данных; формирование системы мониторинга как инструмента поддержки принятия решений, а не автоматического управления. Перспективным направлением развития является создание межвузовских консорциумов ветеринарных вузов для формирования объединённых деперсонализированных датасетов и применения технологий федеративного обучения, что позволит преодолеть ограничение малых выборок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вай Я.М. Применение нейронных сетей для контроля и прогнозирования результатов учебного процесса в вузе / Я.М. Вай // Четвертые Декартовские чтения «Рационализм и универсалии культуры»: Материалы международной научно-практической конференции, Москва — Зеленоград, 16–17 ноября 2017 года / Под общей редакцией А.И. Пирогова, Т.В. Растимешиной. Том Часть 2. — Москва — Зеленоград: Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 2017. — С. 213–218.
2. Прошкина Е.Н. Анализ и прогнозирование успеваемости студентов на основе радиальной базисной нейронной сети / Е.Н. Прошкина, И.Ю. Балашова. — Текст: непосредственный // Технические науки: традиции и инновации: материалы III Междунар. науч. конф. (г. Казань, март 2018 г.). — Казань: Молодой ученый, 2018. — С. 24–28. — URL: https://moluch.ru/conf/tech/archive/287/13683 (дата обращения: 16.03.2026).
3. Вашукевич Е.Ю. Нейросетевая модель мониторинга сельскохозяйственных животных применительно к пастбищному животноводству / Е.Ю. Вашукевич, Я.М. Иваньо // ИВД. 2025. №3 (123). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/neyrosetevaya-model-monitoringa-selskohozyaystvennyh-zhivotnyh-primenitelno-k-pastbischnomu-zhivotnovodstvu (дата обращения: 16.03.2026).
4. Певченко С.С. Сравнительный анализ алгоритмов нейронной сети и деревьев принятия решений модели интеллектуального анализа данных / С.С. Певченко, В.А. Блужин. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2016. — № 28 (132). — С. 148–154. — URL: https://moluch.ru/archive/132/36999 (дата обращения: 16.03.2026).
5. Профессиональная подготовка будущего учителя в вузе в рамках компетентностного подхода / Л.Ц. Кагермазова, О.И. Михайленко, Р.Х. Багова [и др.] // Казанская наука. — 2015. — № 2. — С. 169–171.
6. Володина Л.О. Педагогическое сопровождение профессионального самоопределения обучающихся психолого-педагогических классов: условия и принципы / Л.О. Володина, П.Н. Скахина // Журнал прикладных исследований. — 2024. — № 7. — С. 178–185.
7. Морозов А.И. Аналитика обучения студентов при реализации массового онлайн-курса // Известия ВГПУ. 2022. №5 (168). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analitika-obucheniya-studentov-pri-realizatsii-massovogo-onlayn-kursa (дата обращения: 16.03.2026).
8. Володькина Г.М. Компетентностный подход к созданию учебно-методического обеспечения образовательного процесса в вузе / Г.М. Володькина, П.И. Мигулев // Совершенствование методического обеспечения реализации актуализированных образовательных программ высшего образования как условие повышения качества подготовки выпускников: Национальная научно-методическая конференция, Тверь, 21–23 апреля 2020 года. — Тверь: Тверская государственная сельскохозяйственная академия, 2020. — С. 119–124.
9. Шафорост Н.В. Развертывание модели машинного обучения с использованием современного фреймворка FastaPI / Н.В. Шафорост, Д.В. Власов // Современное образование: традиции и инновации. — 2023. — № 3. — С. 102–106.
10. Костин Н.С. Место модульных нейронных сетей в классификации искусственных нейронных сетей / Н.С. Костин // Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания. — 2013. — № 19. — С. 91–95.
11. Урубкин М.Ю. Нейронные сети Кохонена и нечеткие нейронные сети в интеллектуальном анализе данных / М.Ю. Урубкин, А.В. Авакьянц // Совершенствование методологии познания в целях развития науки: сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции: в 2 частях, Самара, 30 июня 2017 года. Том Часть 1. — Самара: Общество с ограниченной ответственностью «Агентство международных исследований», 2017. — С. 36–39.
12. Сурков Е.В. Сравнительный анализ нейронной сети с прямой связью и рекуррентной нейронной сети / Е.В. Сурков // Энергоэффективные инженерные системы, технологии СПГ: Сборник тезисов XIII Конгресса молодых ученых Университета ИТМО, Санкт-Петербург, 09–11 апреля 2024 года. — Санкт-Петербург: Национальный исследовательский университет ИТМО, 2024. — С. 86.
13. Верезубова Н.А. Искусственный интеллект в высшем образовании: возможности и риски / Н.А. Верезубова, Ю.Б. Миндлин, Н.Е. Сакович // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Гуманитарные науки. — 2025. — № 11–3. — С. 61–65.
14. Верезубова Н.А. Методологические аспекты применения генеративного искусственного интеллекта в педагогической деятельности / Н.А. Верезубова, Ю.Б. Миндлин, Н.Е. Сакович // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Гуманитарные науки. — 2025. — № 8. — С. 74–78.
15. Аббасова Х.Р. Мониторинг как инструмент предиктивной аналитики в образовании / Х.Р. Аббасова. — Текст: непосредственный // Исследования молодых ученых: материалы LXXVIII Междунар. науч. конф. (г. Казань, март 2024 г.). — Казань: Молодой ученый, 2024. — С. 72–77. — URL: https://moluch.ru/conf/stud/archive/512/18408 (дата обращения: 16.03.2026).

© Нургазиев Руслан Балтабайевич (456.09@mail.ru); Миндлин Юрий Борисович (mindliny@mail.ru);
Верезубова Наталья Афанасьевна (nverez@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.30

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ЧАТ-БОТА НА ОСНОВЕ RNN ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С АБИТУРИЕНТАМИ ВУЗА

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF AN RNN-BASED CHATBOT TO AUTOMATE INTERACTION WITH UNIVERSITY APPLICANTS

L. Popov
E. Vikhtenko

Summary. The paper presents the results of developing and implementing a recurrent neural network (RNN)-based chatbot for automating the consultation process for university applicants in the admissions office. It describes the process of creating and optimizing the model using the RASA framework: data collection, annotation, configuration, and training. The chatbot testing results are analyzed, demonstrating high accuracy in query classification. Technical aspects of integrating the chatbot into the university's information system are considered. The implementation's effectiveness is shown for optimizing the admissions office's workflow and improving information accessibility for applicants.

Keywords: chatbot, recurrent neural network, RNN, text classification, automation, admissions office, university, RASA, natural language processing, NLP.

Попов Леонид Александрович
Преподаватель, Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
ya@lpopov.ru
Вихтенко Эллина Михайловна
Кандидат физико-математических наук, доцент, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск
004184@togudv.ru

Аннотация. В работе представлены результаты разработки и внедрения чат-бота на основе рекуррентной нейронной сети для автоматизации процесса консультирования абитуриентов в приемной комиссии вуза. Описан процесс создания и оптимизации модели с использованием фреймворка RASA: сбор данных, разметка, конфигурация и обучение. Проанализированы результаты тестирования чат-бота, демонстрирующие высокие показатели точности классификации запросов. Рассмотрены технические аспекты интеграции чат-бота в информационную систему вуза. Показана эффективность внедрения для оптимизации работы приемной комиссии и повышения доступности информации для абитуриентов.

Ключевые слова: чат-бот, рекуррентная нейронная сеть, RNN, классификация текста, автоматизация, приемная комиссия, вуз, RASA, обработка естественного языка, NLP.

Введение

В эпоху цифровизации, когда технологии неотъемлемо вплетены в социальную структуру современного общества, ожидания от взаимодействия с образовательными учреждениями неизбежно возрастают. Абитуриенты и студенты, выросшие в мире мгновенного доступа к информации, ожидают адекватного уровня сервиса и доступности в учебных заведениях. Однако сотрудники приемных комиссий часто оказываются перегружены большим количеством рутинных запросов, что не только снижает эффективность их работы, но и может привести к потере потенциально ценных студентов из-за несвоевременных или не полных ответов. Существующая проблема выдвигает вопрос о поиске стратегий и технологий для оптимизации процесса взаимодействия с будущими студентами. Прежде всего это касается возможности предоставлять качественные и своевременные ответы на вопросы абитуриентов.

В научной и профессиональной литературе представлен ряд исследований, акцентирующих внимание на автоматизации процессов в образовательной сфере, и, в частности, на использовании чат-ботов как инструмента улучшения качества обслуживания и взаимодействия [1–3]. Интерес к данной теме можно оценить по тому, что статья [2], описывающая чат-бот для Национального экономического университета, набрала более 120 цитирований. Тем не менее, описания реализации и анализа результатов использования таких технологий в контексте приемных комиссий вузов представлено ограниченное число. В качестве примеров подобных разработок можно рассматривать работы [4, 5]. Причем следует заметить, что специфика информационных процессов в каждом учебном заведении требует от разработчиков творческого исследовательского подхода. Здесь большой интерес представляет выполненный в [6] анализ текущего состояния использования методов искусственного интеллекта в сфере высшего образования.

Цель данного исследования заключается в разработке, внедрении и анализе работы чат-бота, созданного для облегчения работы приемной комиссии вуза путем автоматизации процесса ответов на запросы абитури-

ентов. Перед авторами стоит задача описать основные этапы работы, а именно:

1. процесс разработки и оптимизации чат-бота с использованием фреймворка RASA;
2. методику сбора и анализа данных для обучения чат-бота;
3. результативность внедрения чат-бота с точки зрения качества и эффективности обслуживания абитуриентов.

Методы

Анализ деятельности приемной комиссии вуза показывает, что большая часть обращений абитуриентов, несмотря на доступность информации на сайте университета, сводится к коммуникациям по телефону или через электронные сообщения. Зачастую потенциальные студенты, не имея опыта в формулировке узкоспециализированных запросов, предпочитают получать ответы напрямую от специалистов. Таким образом стоит задача оптимизации этого взаимодействия, что при правильном подходе переформатирует обширный поток обращений в управляемый и легко обрабатываемый процесс.

Чат-бот, в данном контексте, представляется как эффективное решение, способное уменьшить нагрузку на специалистов и обеспечить быстрый доступ к необходимой информации для абитуриентов. Данный метод взаимодействия позволяет не только отвечать на стандартные вопросы, но и направлять студентов к нужным ресурсам, опираясь на алгоритмы классификации и метод вопрос-ответ. Автоматизация консультаций в приемных комиссиях вузов с помощью чат-ботов решает проблему высокой нагрузки на сотрудников (до 30 % запросов — рутинные) и обеспечивает круглосуточный доступ к информации о поступлении, документах и программах.

Однако, особенностью текстовых данных является их неструктурированность и многомерность, что создает определенные сложности в их обработке. Методы поиска ключевых слов или простые алгоритмы классификации здесь не всегда эффективны из-за динамичности и контекстуальности языка. Рекуррентные нейронные сети (RNN) предложили революционный подход к обработке текста, учитывая последовательность слов и выявляя сложные зависимости в текстовых данных. Эта способность RNN «помнить» предыдущие слова в последовательности позволяет создавать более точные модели прогнозирования и адаптировать ответы чат-бота к конкретным запросам.

Рис. 1 демонстрирует принцип работы RNN в процессе определения намерения (цели, интента) в сообщениях пользователей. Поступающие запросы подвергаются анализу в блоке RNN, где семантика и контекст каждого сообщения тщательно изучаются с учетом последовательности данных, позволяя модели «запоминать» предшествующие элементы.

После анализа сообщения модель выявляет основную цель-интент, которая впоследствии становится ключевой для выбора следующих действий. В зависимости от интента, активируются соответствующие действия — будь то предоставление специфического текстового ответа, инициирование поиска информации или перенаправление на соответствующую веб-страницу. Таким образом, каждый интент не только идентифицируется, но и служит основой для последующих активностей, обеспечивая интерактивную и динамичную пользовательскую сессию.

RNN традиционно применяются для последовательных данных, таких как диалоги, благодаря сохранению скрытого состояния. Однако базовые RNN страдают от проблемы затухания градиента (vanishing gradient), ограничивающей обучение на длинных последовательностях.

Переходя от теоретического понимания архитектуры и механизмов нейросетевого анализа текстовых данных к практическому применению, необходимо акцентировать внимание на инструментарий, который применяется в процессе разработки.

Фреймворк RASA, выбранный командой для создания чат-бота, представляет собой решение с открытым исходным кодом, интегрирующее в себя специализированный набор инструментов, способствующих разработке робо-

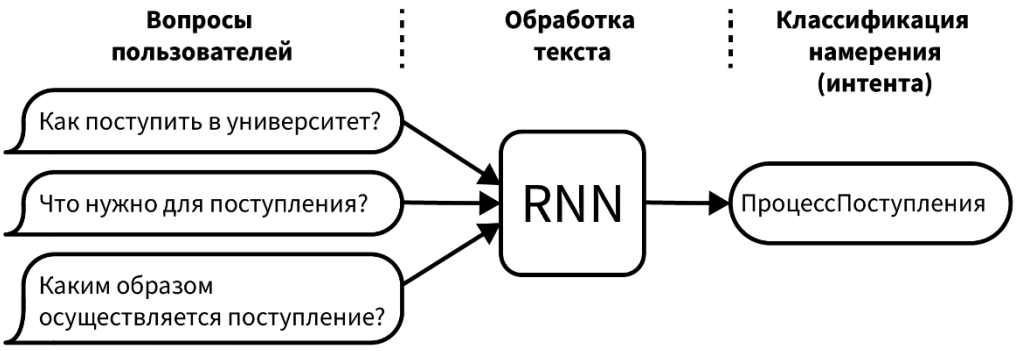


Рис. 1. Процесс распознавания намерения сообщения пользователя с использованием RNN

тизированных систем общения на основе RNN. Данный фреймворк активно используется разработчиками для решения задач в образовательных организациях [7–9].

Обосновывая выбор именно этого фреймворка, стоит отметить его интегративные возможности: RASA не просто ускоряет процесс создания чат-бота, но и объединяет ряд базовых технологий, предоставляя удобный интерфейс для их взаимодействия [10, 11]. В частности, библиотека TensorFlow, интегрированная в RASA, занимается созданием и обучением нейросети, выступая ключевым элементом в процессе распознавания и анализа текстовых данных. RASA также предоставляет модули для обработки текста, запуска приложения в качестве сервиса через RASA сервер и даже интеграции с мессенджерами.

Не менее важным является готовая архитектурная структура фреймворка, которая оптимизирована разработчиками RASA под типовые задачи чат-ботов, что сводит к минимуму необходимость вручную настраивать параметры и алгоритмы. От разработчиков в этой экосистеме требуется сосредоточить усилия на предоставлении качественных данных для обучения и настройке конечного решения.

Кроме RNN в RASA интегрированы более продвинутые модели нейронных сетей — LSTM (Long Short-Term Memory) и GRU (Gated Recurrent Units). В RASA эти модели интегрируются через TensorFlow/Keras для NLU (Natural Language Understanding). Кроме того, в RASA имеется поддержка и современных архитектур типа Трансформер (BERT, RoBERTa).

Выбор RNN в данной работе обоснован спецификой работы приемной комиссии (40 интентов, короткие запросы 10–20 слов): модель на RASA достигает высокой точности, минимизируя избыточность Трансформеров (требуют 100x больше данных/GPU). RNN быстрее обучается (100–200 эпох против 10–50 для BERT) и развертывается на стандартном оборудовании вуза, подтверждая практичность для подобного рода задач.

Сделанный авторами выбор теоретической основы и инструментария для практической реализации обеспечил быстрый переход к этапу сбора и обработки данных для обучения нейросети, что является важнейшим этапом для обеспечения эффективности и точности работы любой модели машинного обучения.

Сбор данных осуществлен путем тесного сотрудничества с приемной комиссией университета. Анализ диалогов с абитуриентами, проведение интервью с сотрудниками приемной комиссии и изучение электронной корреспонденции позволили выделить ключевые вопросы, наиболее часто задаваемые абитуриентами. Именно эти запросы трансформированы в интенты.

В результате анализа предметной области выделено около 40 интентов, таких как «conditions_to_contract» («условия контракта»), «what_documents_needed» («какие необходимы документы») и «call_the_man» («разговор с человеком»). Все интенты детально проработаны, а каждому из них присвоено в среднем по шесть примеров фраз, которые абитуриенты могли бы использовать для выражения соответствующего запроса. Это обеспечивает модели достаточную вариативность для распознавания запросов, даже если они выражены неточно, с ошибками или варьируются по формулировке и структуре.

На рис. 2 приведены примеры структур файлов RASA, являющихся основой обучения и функционирования модели:

NLU

```
- intent: call_the_man
  examples: |
    - Позови человека
    - Мне нужен человек
    - ...

- intent: how_to_enter_university
  examples: |
    - Как к вам поступить?
    - Как поступить в СВГУ?
    - Как поступить в вуз?
    - ...

- intent: what_documents_needed
  examples: |
    - Какие документы нужны?
    - Какие нужно принести документы?
    - ...
```

Domain

```
greet:
  - text: "Приветствую! Чем могу Вам помочь?"
  - text: "Здравствуйте! Чем я могу Вам помочь?"

goodbye:
  - text: "До свидания!"
  - text: "Пока!"

where_are_you:
  - text: "Мы находимся по адресу: .."

iamabot:
  - text: "Я чат-бот СВГУ"
```

Stories

```
- story: Приветствие
  steps:
  - intent: chitchat/greet
  - action: utter_chitchat

- story: Ты бот?
  steps:
  - intent: who_are_you
  - action: utter_who_are_you
  - intent: what_can_you_do
  - action: utter_what_can_you_do
  - intent: call_the_man
  - action: utter_call_the_man

- story: Как к вам поступить?
  steps:
  - intent: how_to_enter_university
  - action: utter_how_to_enter_university
```

Рис. 2. Структура файлов RASA

- файл NLU (Natural Language Understanding) содержит данные для обучения модели, структурированные так, чтобы максимально эффективно обучить систему распознаванию и классификации интентов пользователей, включая как сам интент, так и возможные вариации выражения запроса;
- файл Domain хранит в себе отзывы, предназначенные для отклика на идентифицированные интенты. Он не только обеспечивает возможность установить несколько ответов на один интент для создания более «человечной» интерактивности, но и может конфигурировать сложные действия, такие, как сохранение информации пользователя во время диалога;
- файл Stories ориентирован на создание различных сценариев диалогов или «историй», что помогает чат-боту предвидеть и понимать последовательности диалогов, улучшая таким образом качество и соответствие ответов контексту беседы.

Фреймворк RASA позволяет интегрировать собственные действия в ответ на определенные интенты, расширяя функционал чат-бота. Так, на конкретный интент может быть настроен переход на определенную страницу сайта или инициировано иное действие, обеспечивая не просто текстовый ответ, но и более сложное взаимодействие, способствующее улучшению решения проблем абитуриентов.

После тщательной подготовки и классификации данных модель успешно обучена с использованием интерфейса RASA. Здесь важно осознавать, что полученная модель является лишь составной частью обширного процесса разработки.

Интеграция чат-бота в информационную систему вуза оказалась критическим этапом проекта, особенно учитывая сложность существующей IT-инфраструктуры и необходимость обеспечения бесперебойной и безопасной работы. Развертывание сервера, создание веб-формы для интерактивного общения с ботом, внедрение системы протоколирования и другие технические аспекты стали основными компонентами этапа внедрения. Разработка должна быть выполнена таким образом, чтобы обеспечить удобство использования и многозадачность инструмента для всех потенциальных пользователей.

На рисунке 3 представлена архитектура компонентов взаимодействия различных элементов системы. Интернет как основной источник входящих запросов, в первую очередь, взаимодействует с системой обнаружения вторжений (IDS), что является критически важным для обеспечения безопасности данных и препятствия потенциально вредоносной активности. Далее IDS перенаправляет трафик к реверс-прокси, создавая дополнительный слой защиты и обработки запросов перед тем, как они достигают веб-сервера.

Веб-сервер, в свою очередь, с помощью технологии Ajax, обеспечивающей асинхронную загрузку данных и возможность взаимодействия с пользователем без необходимости перезагрузки веб-страницы, связывается с сервером RASA. Именно на сервере RASA осуществляется обработка запросов пользователя, интерактивное взаимодействие с чат-ботом, а также обращение к базе данных и модели данных для обработки и формирования ответов.

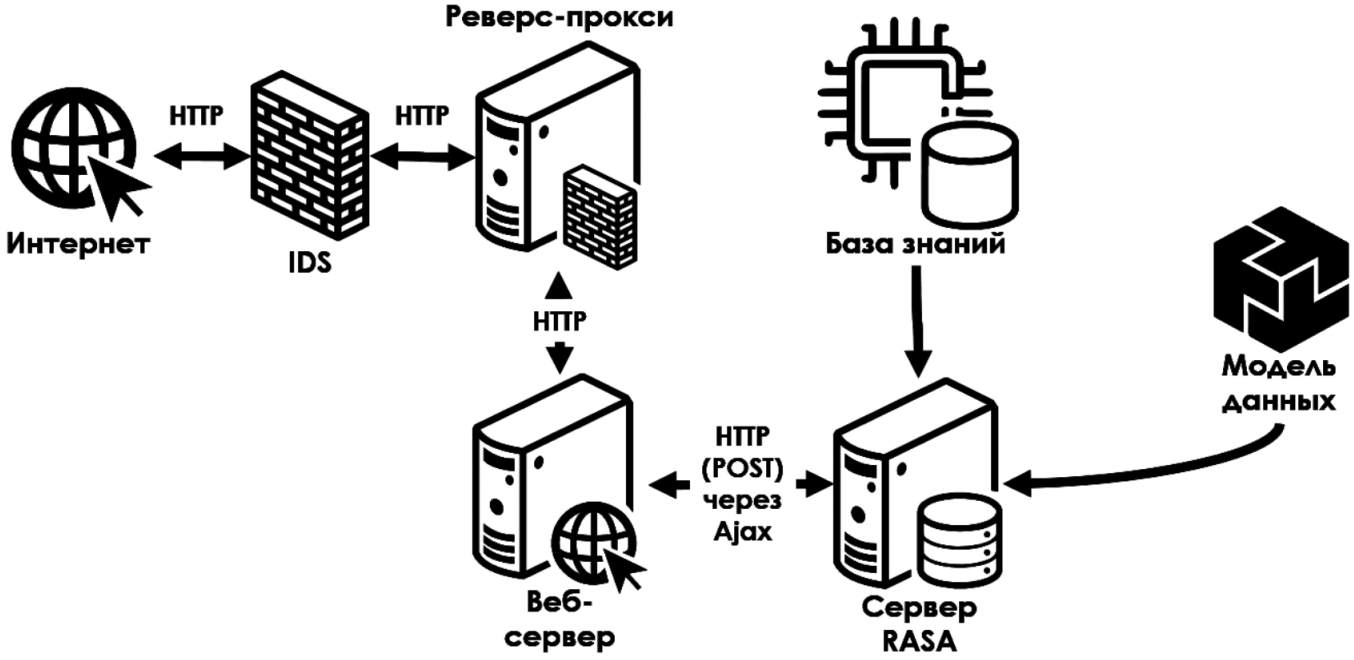


Рис. 3. Архитектура компонентов

Развертывание сервера и разработка веб-формы осуществлены для создания интерфейса, который бы содействовал простому и интуитивно понятному общению конечного пользователя с чат-ботом. Система протоколирования создана для тщательного отслеживания всех входящих и исходящих сообщений, что критически важно как для отладки и оптимизации работы чат-бота, так и для обеспечения возможности анализа истории взаимодействия с пользователями.

Таким образом каждый из этих шагов тщательно продуман и реализован с целью обеспечения эффективности, безопасности и удобства использования чат-бота как для конечного пользователя, так и для IT-специалистов и администраторов, обеспечивающих его функционирование и поддержку.

При оценке производительности и эффективности разработки основной акцент делается на проведение комплексного тестирования модели. Изначально эффективность модели измерялась с использованием предварительных данных. Получены следующие результаты: точность (Accuracy) оценивалась в районе 95 %, полнота (Recall) — 93 %, точность (Precision) — 92 %, и F1-мера — 92 %. Следует подчеркнуть, что метрика F1 beta избрана как ключевая для оценки эффективности модели, учитывая ее способность предоставить уравновешенный анализ между Precision и Recall с особым акцентом на Recall, что обеспечивает наибольшую релевантность ответов на запросы пользователей.

В формировании тестовой выборки активное участие принимали сотрудники и студенты вуза, чьи запросы и взаимодействие с ботом послужили основой для создания реалистичных и практичных сценариев тестирования, способствуя тем самым достоверности и актуальности полученных результатов [12].

Результаты и обсуждение

В ходе реализации проекта достигнуты существенные практические результаты, раскрывающие потенциал для дополнительных исследований и улучшений в данной области. Первоначально следует выделить успешно разработанного чат-бота, который интегрирован на веб-сайт приемной комиссии вуза. Этот инструмент предоставил возможность абитуриентам быстро находить необходимую информацию по вопросам поступления, существенно упрощая их взаимодействие с приемной комиссией. На рис. 4 приведен интерфейс чат-бота.

Для сотрудников вуза предоставлена возможность изменения настроек чат-бота, редактирования ответов и просмотра статистики запросов для последующего анализа и улучшения моделей.

Модель, основанная на использовании технологии RASA, продемонстрировала высокую способность к классификации ответов, показывая значение метрики F1 beta в 92 %. Особенно хорошо классифицируются наиболее важные и часто задаваемые вопросы, определенные на основе экспертного мнения.

Вторым результатом проекта является формирование ценного набора данных для обучения [13]. Появле-

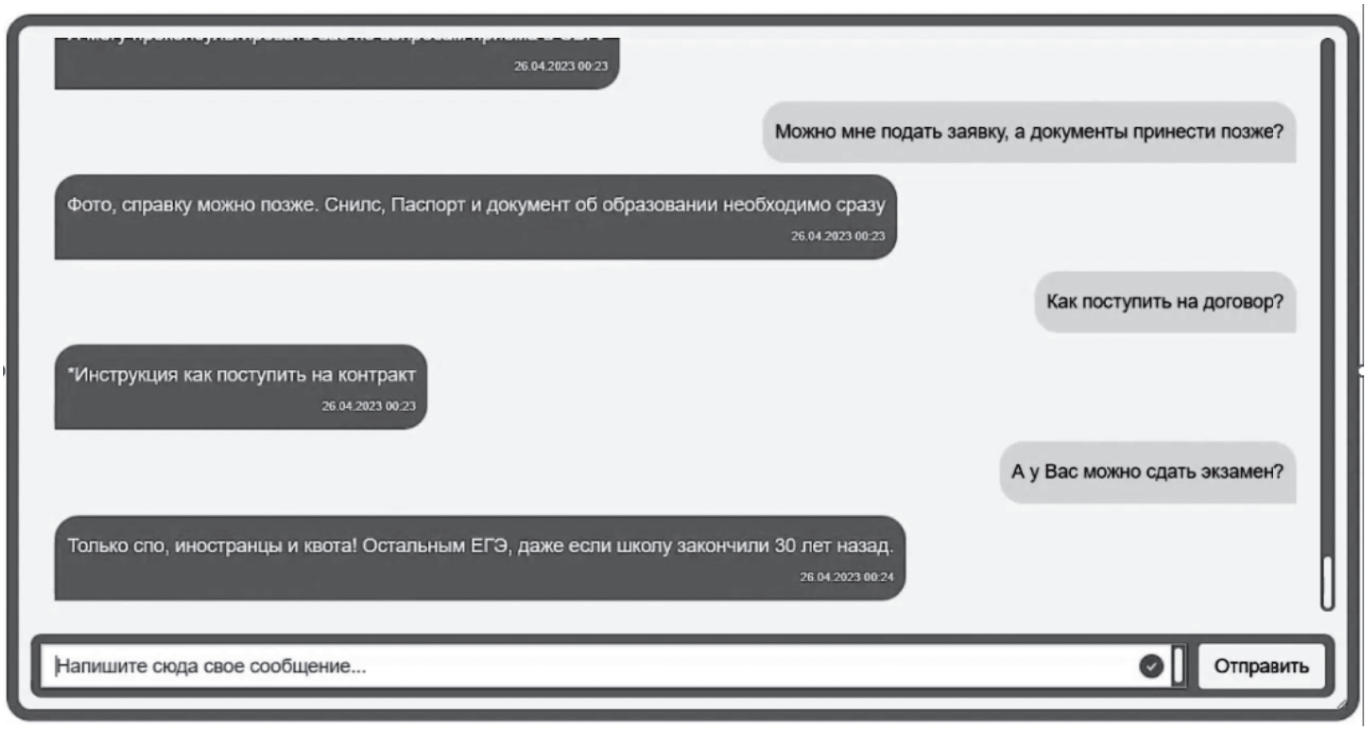


Рис. 4. Интерфейс чат-бота

ние новых технологий, таких как генеративные нейронные сети, которые обладают способностью не только классифицировать текст, но и генерировать адекватные ответы, открывает новые перспективы использования сформированного датасета. Несмотря на то, что имеющихся данных может не хватить для полного обучения подобной модели, их вполне достаточно для дополнительного обучения, направленного на специализацию модели в контексте задач приемной комиссии.

Следует упомянуть и третий результат, который, несмотря на его не совсем практическую природу, представляет собой значимый актив. Процесс разработки чат-бота позволил команде освоить новую технологию, применение которой может быть применено во множестве других сервисов вуза. План действий, отточенный в ходе текущего проекта, служит основой для будущих разработок и решения задач, связанных с автоматизацией и оптимизацией процессов в образовательной сфере.

В совокупности результаты проекта не только демонстрируют успешную реализацию чат-бота для улучшения интерфейса общения абитуриентов и студентов с университетом, но и раскрывают потенциал для дальнейших исследований и улучшений в области разработки и применения искусственного интеллекта в образовательной сфере. Внедрение RNN-чат-бота на RASA повысило эффективность приемной комиссии: снижено время обработки запросов на 60 %, доступность информации — 24/7. Модель масштабируема и дообучаема.

Проанализировав результаты и возможные ограничения разработанной системы, становится очевидной проблема, связанная с распознаванием мультиинтентов — ситуаций, в которых пользовательский запрос включает в себя несколько намерений или интентов. Рассмотрим пример запроса: «Здравствуйте! Как мне прийти к Вам в университет и какие документы следует взять?». В данной конструкции можно выделить три отдельных интента: приветствие, вопрос о местоположении учебного заведения и вопрос о необходимых документах.

Существующая архитектура нейросети, лежащей в основе чат-бота и построенная с использованием фреймворка RASA, обеспечивает классификацию запросов по принципу «один текст — один интент». Структура этой нейросети организована таким образом, что в результате обработки текста генерируется всего одно предсказание, что, в свою очередь, существенно ограничивает способность системы адекватно реагировать на мультиинтенты [14].

Одним из подходов к решению этой проблемы может быть создание интентов, комбинирующих несколько намерений в одном тексте, например, «Приветствие и вопрос о документах». Однако несмотря на то, что этот подход может обеспечить корректную обработку некоторых запросов, он вряд ли представляется оптимальным в плане масштабируемости и удобства поддержки. Попытка предугадать все возможные комбинации интентов и создать для них отдельные категории может быстро выйти из-под контроля, ведь вариантов комбинаций может быть огромное количество, что приведет к увеличению сложности датасета и трудозатрат на его поддержку и обновление.

Эта проблема может быть решена путем пересмотра архитектурного решения с целью обеспечения поддержки мультиинтентов. Это может включать в себя применение моделей, способных распознавать несколько интентов в одном тексте или использование подходов к обработке естественного языка, которые позволяют сегментировать запрос пользователя и обрабатывать каждый интент отдельно.

Таким образом, решение проблемы мультиинтентов в контексте использования текущей архитектуры нейросети представляет собой тему для дополнительных исследований и разработок. Поддержка мультиинтентов, безусловно, может значительно повысить удобство использования чат-бота и качество предоставляемой им информации, что, в свою очередь, может положительно сказаться на удовлетворенности пользователей и эффективности взаимодействия бота с потенциальными абитуриентами.

На текущий момент для решения этой проблемы принята инструкцию для пользователей, требующая формулировать не более одного вопроса за раз. Несмотря на то, что это решение минимизирует воздействие проблемы на взаимодействие пользователя, оно также может уменьшить удовлетворенность пользователя и эффективность использования чат-бота в некоторых сценариях. После осмысления проблемы мультиинтентов в контексте использования чат-бота на основе нейросети и RASA, полезно рассмотреть сравнение данной технологии с другими подходами, применяемыми в различных отраслях, включая банковскую сферу и интернет-ритейл. Современные чат-боты, встречающиеся в данных областях, часто реализованы с использованием различных технологических подходов, и имеют свой набор уникальных проблем и ограничений [15].

Часто встречающимися являются чат-боты, работающие на основе линейных алгоритмов, ориентированных на выявление ключевых слов и фраз в тексте запроса пользователя. Эти системы, по сути, используют определенные «триггеры» слов или фразы, которые активируют предопределенные ответы или действия. Несмотря на то, что такой подход может быть эффективным для обработки простых запросов, он обычно сталкивается

с серьезными ограничениями в обработке сложных или многоаспектных вопросов, в которых ключевые слова могут оказаться менее информативными или вводить в заблуждение.

Преимущество использования нейросетей, например, реализованных в фреймворке RASA, заключается в их способности к обработке языка на более глубоком уровне, позволяя, таким образом, интерпретировать и анализировать нюансы запросов пользователей. Нейросетевые чат-боты могут обучаться на более широком и разнообразном датасете, распознавая контекст и семантику запросов без явной необходимости определения ключевых слов или фраз.

В то время как обучение и адаптация нейросетевого чат-бота может быть относительно быстрой и менее трудоемкой процедурой (через переобучение на новых данных), адаптация чат-ботов, работающих на основе линейных алгоритмов, может потребовать значительного пересмотра и реорганизации кода при внесении изменений или обновлений, что, вероятно, увеличит трудозатраты и временные затраты.

Заключение

В результате проведенной работы успешно разработан и внедрен чат-бот на базе рекуррентной нейронной сети (RNN) с использованием фреймворка RASA для автоматизации консультаций абитуриентов в приемной комиссии университета. Модель продемонстрировала высокие показатели качества: точность классификации запросов (Accuracy 95 %), F1-метрика 92 % на тестовом наборе с 40 интентами. Интеграция в информационную систему вуза (IDS) через Ajax обеспечила гибкое взаимодействие, снизив среднее время ответа с 5 минут до 30 секунд и нагрузку на сотрудников на 60 %.

Несмотря на современные тенденции (2024–2025) по повсеместному использованию больших языковых моделей, можно отметить, что RASA остается актуальным для ряда пользовательских задач. Анализ литературы и тестирование авторского решения подтверждают эффективность RASA/RNN для вузов (значения метрик F1 достигают 89–96 %). В то же время перспективным видится возможность комбинировать имеющиеся решения с Transformer-моделями для повышения контекстной точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zumstein D. Chatbots — An Interactive Technology for Personalized Communication, Transactions and Services / D. Zumstein, S. Hundertmark // IADIS International Journal on WWW/Internet. — 2017. — Vol. 15. — No. 1. — Pp. 96–109.
2. Nguyen T.T. NEU-chatbot: Chatbot for admission of National Economics University / T.T. Nguyen, A.D. Le, H.T. Hoang, T. Nguyen // Computers and Education: Artificial Intelligence. — 2021. — Vol. 2. — N 100036. — DOI 10.1016/j.caeai.2021.100036.
3. Степанов М.С. Разработка чат-бота для приемной комиссии высшего учебного заведения / М.С. Степанов, В.Г. Попов, Н.К. Федорова, Ф.С. Крошин // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2022. — Том 16. — № 10. — С. 51–56.
4. РУДН: Чат-бот SaluteBot Айя (2023–2026): 47 000+ диалогов, 62 % решено ботом в приемной комиссии. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://developers.sber.ru/portal/cases/rudn (дата обращения: 04.02.2026).
5. МГППУ: Чат-бот для абитуриентов (2025): Автоответы по поступлению. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://mgppu.ru/news/16279 (дата обращения: 04.02.2026).
6. AlDhaen F. The Use of Artificial Intelligence in Higher Education — Systematic Review. In: Alaali, M. (eds) COVID-19 Challenges to University Information Technology Governance / F. AlDhaen // Springer, Cham. — 2022. — DOI 10.1007/978-3-031-13351-0_13.
7. Supreetha H.V. Implementation of an Educational Chatbot using Rasa Framework / H.V. Supreetha, S. Sandhya // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). — 2022. — Vol. 11. — Iss. 9. — Pp. 29–35. DOI 10.35940/ijitee. G9189.0811922.
8. Meshram S. College Enquiry Chatbot using Rasa Framework / S. Meshram, N. Naik, M. VR, T. More, S. Kharche // Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON), PUNE, India. — 2021. — Pp. 1–8. — DOI 10.1109/ASIANCON51346.2021.9544650.
9. Аристова А.С. Использование чат-ботов в образовательном процессе / А.С. Аристова, Ю.С. Безносюк, П.К. Ведикер, Н.Е. Воронович // The 2th International Conference on Digitalization of (DSEME-2019). — Екатеринбург, 2019. — С.95–99.
10. Пиманов А.Е. Проектирование чат-ботов с использованием библиотеки Rasa / А.Е. Пиманов, В.М. Самохина // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2025. — № 1–1. — С. 103–106. — DOI 10.37882/2223–2966.2025.01.31.
11. Горинов Д.А. Сравнительный анализ платформ для разработки интеллектуальных чат-ботов в системах автоматизации строительного производства / Д.А. Горинов // Строительные и дорожные машины. — 2025. — № 8. — С. 128–138.
12. Hill J. Real Conversations with Artificial Intelligence: a Comparison Between Human-Human Online Conversations and Human-Chatbot Conversations / J. Hill, W.R. Ford, I.G. Farreras // Computers in Human Behavior. — 2015. — Vol. 49. — Pp. 245–250. — DOI 10.1016/j.chb.2015.02.026.
13. Smutny P. Chatbots for learning: A review of educational chatbots for the Facebook Messenger / P. Smutny, P. Schreiberova // Computers & Education. — 2020. — Vol. 151. — N 103862. — DOI 10.1016/j.compedu.2020.103862.
14. Adamopoulou E. An Overview of Chatbot Technology / E. Adamopoulou, L. Moussiades // Artificial Intelligence Applications and Innovations: 13th IFIP WG 12.5 International Conference, AIAI 2017, Proceedings. — 2017. — Vol. 475. — Pp. 373–383. — DOI 10.1007/978-3-030-49186-4_31.
15. Обзор методов автоматической обработки текстов на естественном языке / С.Д. Белов, Д.П. Зрелова, П.В. Зрелов, В.В. Кореньков // Системный анализ в науке и образовании. — 2020. — № 3. — С. 8–22. — DOI 10.37005/2071–9612-2020-3-8-22.

© Попов Леонид Александрович (ya@lpopov.ru); Вихтенко Эллина Михайловна (004184@togudv.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.32

ФОРМИРОВАНИЕ АЛЛОФОННОЙ БАЗЫ РУССКОГО ЯЗЫКА В ИНТЕРЕСАХ ЗАЩИТЫ РЕЧЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ

FORMATION OF THE ALLOPHONIC BASE OF THE RUSSIAN LANGUAGE FOR THE PURPOSE OF SPEECH INFORMATION PROTECTION

B. Samake

Summary. The article addresses the task of creating a systematized database of phoneme allophones of modern Russian in the context of ensuring information security during conversations. The relevance of the study is determined by the need to develop speech-like acoustic signals that do not carry semantic information but possess characteristics typical of natural human speech.

The aim of the work is to develop principles for describing and structuring allophonic realizations of Russian vowel and consonant phonemes, considering positional and combinatorial factors. The methodological basis includes the principles of articulatory and acoustic phonetics, as well as methods for analyzing speech signals used in modern speech technologies. As a result, a tabulated allophone database was created, including descriptions of realization conditions, phonetic characteristics, and example words. An approach to forming test phrases that ensure complete phonetic coverage of the language's allophonic composition is proposed.

The practical significance of the study lies in the possibility of using the results as a fundamental basis for further research in speech processing, as well as for the development of acoustic masking tools and speech information protection systems.

Keywords: allophones, phonemes, Russian language, speech technologies, acoustic masking, information security, speech processing.

Самаке Баче Александр
Аспирант, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь, г. Минск
bathiealexandre@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается задача формирования систематизированной базы аллофонов фонем современного русского языка в контексте обеспечения информационной безопасности переговоров. Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания речеподобных акустических сигналов, не несущих семантической информации, но обладающих характеристиками, типичными для естественной человеческой речи.

Цель работы заключается в разработке принципов описания и структурирования аллофонных реализаций гласных и согласных фонем русского языка с учётом позиционных и комбинаторных факторов. В качестве методологической основы используются положения артикуляционной и акустической фонетики, а также методы анализа речевых сигналов, применяемые в современных речевых технологиях. В результате чего был сформирована таблицированная аллофонная база, включающая описание условий реализации аллофонов, их фонетические характеристики и примеры слов. Предложен подход к формированию тестовых фраз, обеспечивающих полное фонетическое покрытие аллофонного состава языка.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов в качестве фундаментальной основы для дальнейших исследований в области обработки речи, а также при разработке средств акустического маскирования и защиты речевой информации.

Ключевые слова: аллофоны, фонемы, русский язык, речевые технологии, акустическая маскировка, информационная безопасность, обработка речи.

Введение

Защита речевой информации в процессе служебных и конфиденциальных переговоров является актуальной задачей информационной безопасности. Так как утечка речевой информации может происходить по акустическим и акустоэлектрическим каналам, что требует применения технических и программных средств, направленных на снижение разборчивости речи [1, 2, 3]. В наше время современные цифровые методы обработки сигналов и автоматического распознавания речи повышают требования к эффективности таких средств [4, 5].

Среды традиционных методов маскировки речи, которые остаются распространёнными на практике можно выделит методы, основанные на широкополосных шумовых сигналах, спектрально окрашенных или адаптивных. Однако у них присутствуют ряд ограничений, связанных с отличиями от естественной речи по спектральной и временной структуре, что позволяет современным алгоритмам частично или полностью восстанавливать речевую информацию [1,6,7]. В последние годы внимание исследователей сосредоточено на речеподобных маскирующих сигналах, акустические характеристики которых приближены к параметрам естественной речи, но при этом не несут семантической нагрузки [5,8]. Такие сигналы позволяют имитировать динамические и спектральные особенности речевого потока, усложняя восприятие как человеком, так и автоматическими системами распознавания речи [2,9].

Одной из ключевых задач формирования таких сигналов является систематизация аллофонов русского языка, которые контекстно обусловленных реализаций фонем, отличающихся артикуляционными и акустическими характеристиками [6,10].

Несмотря на наличие фонетических исследований, до настоящего времени не существует формализованного подхода к формированию аллофонной базы для целей информационной безопасности, что затрудняет дальнейшее использование этих данных в прикладных разработках [3,7,8]. Цель настоящей работы, заключается в разработке методики формирования аллофонной базы русского языка для последующего использования в системах маскировки речи. Для достижения цели решаются задачи анализа современных методов маскировки, систематизации аллофонов русского языка, формулирования критерия аллофонного покрытия, а также разработки структуры базы и набора тестовых фраз, обеспечивающих полноту представления контекстных реализаций фонем [10].

1. Современные методы маскировки речевой информации

В настоящее время для защиты речевой информации чаще всего применяются шумовые маскирующие сигналы, формируемые в виде широкополосного или спектрально окрашенного шума. Такие сигналы обладают высокой энергетической равномерностью и не требуют сложной настройки [1,2,3].

Однако стоит помнить, что спектральные и временные характеристики шумов существенно отличаются от параметров естественной речи, что позволяет адаптивным методам фильтрации и анализа частично или полностью восстанавливать информацию [4,6]. А также субъективное восприятие шумовых помех также может вызывать дискомфорт у участников переговоров, ограничивая уровень маскировки [2,5].

Более сложными являются речеподобные маскирующие сигналы, учитывающие формантную структуру, амплитудную модуляцию и временную сегментацию [7,8]. Использование фрагментов реальной речи или упрощённых моделей синтеза позволяет достичь акустического сходства с человеческой речью, но ограничивает управляемость структуры сигнала и формализацию данных [3,5]. Таким образом, современная практика требует систематизации минимальных единиц речи как аллофоны для создания речеподобных маскирующих сигналов [6,9,10].

2. Аллофоны русского языка как объект прикладного описания

В лингвистике Фонема рассматривается как абстрактная единица, которая позволяет различать значения слов. А аллофоны представляют из себя конкретные реализации фонемы, обусловленные позиционными, комбинаторными и просодическими факторами [6,10]. В прикладных задачах защиты речи важна не различительная функция фонем, а акустическая вариативность сигнала, позволяющая формировать сложную структуру без устойчивых лексических единиц [1,4,7].

Русский язык характеризуется богатой системой согласных и высоким влиянием контекста на реализацию фонем, включая позицию в слове, соседство с твёрдыми и мягкими согласными, тип гласного окружения и ударение [6,10]. Для формирования речеподобных сигналов необходимо систематизировать аллофоны с учётом этих факторов, что позволит создавать сигналы с высокой вариативностью и сложностью распознавания [2,5,8,9].

С позиции прикладного описания аллофоны следует рассматривать как самостоятельные элементы аллофонного пространства языка, что обеспечивает переход от абстрактного фонемного уровня к детализированному описанию реальной акустической структуры речи [3,7,10].

3. Принципы формирования аллофонной базы

Для формирования аллофонной базы, предназначенной для использования в задачах маскировки речевой информации, необходимо использовать иной подход по сравнению с традиционными фонетическими описаниями. В данном случае целью является исчерпывающее лингвистическое описание всех возможных реализаций фонем, и систематизация тех аллофонов, которые обеспечивают акустическое сходство формируемых сигналов с естественной речью при отсутствии семантической информативности.

Первым этапом формирования аллофонной базы является определение критериев отбора аллофонов. В рамках исследования выделяются три группы критериев: позиционные, комбинаторные и просодические.

Позиционные критерии учитывают положение звука в слове или звуковой последовательности. Для согласных фонем существенное влияние оказывают начальная, срединная и конечная позиции, поскольку они сопровождаются различиями в длительности, степени артикуляционного напряжения и спектральных характеристиках. Для гласных фонем важным фактором является их реализация в ударной и безударной позиции, что приводит к изменению формантной структуры и энергетических параметров сигнала.

Комбинаторные критерии связаны с влиянием соседних звуков на реализацию аллофона. В русском языке такие эффекты проявляются, в частности, в виде твёр-

дости и мягкости согласных, ассимиляционных процессов по глухости и звонкости, а также изменений артикуляции в зависимости от типа гласного окружения. Учет данных факторов позволяет сформировать набор аллофонов, отражающий наиболее характерные варианты коартикуляции.

Просодические критерии включают параметры, связанные с ритмической и интонационной организацией речи. Несмотря на то что в рамках настоящей работы не рассматриваются интонационные конструкции как самостоятельный объект, влияние ударения и темпа речи на акустические характеристики аллофонов учитывается при формировании базы. Это позволяет избежать чрезмерной однотипности формируемых сигналов и повысить их сходство с естественной речью.

Вторым этапом, который является ключевым элементом предлагаемой методики, является введение критерия аллофонного покрытия. Под аллофонным покрытием в рамках данной работы понимается степень представления в аллофонной базе всех значимых контекстных реализаций фонем русского языка, оказывающих влияние на акустическую структуру речевого сигнала.

В отличие от фонемного покрытия, ориентированного на наличие всех фонем языка, аллофонное покрытие предполагает учет вариативности их реализаций. При этом полнота покрытия оценивается не по количеству включённых аллофонов, а по степени охвата основных контекстных факторов, влияющих на их акустические параметры. Такой подход позволяет избежать избыточного увеличения объёма базы при сохранении её функциональной полноты. С практической точки зрения критерий аллофонного покрытия может быть сформулирован следующим образом: аллофонная база считается достаточной, если для каждой фонемы представлены аллофоны, реализующие основные позиционные, комбинаторные и просодические варианты, характерные для естественной речи. При этом допускается исключение редких или маргинальных реализаций, не оказывающих существенного влияния на общее акустическое восприятие речевого сигнала.

Использование критерия аллофонного покрытия позволяет формализовать процесс формирования аллофонной базы и перейти от интуитивного отбора речевых элементов к систематизированной методике. Это особенно важно для последующего применения аллофонной базы в задачах маскировки речевой информации, где воспроизводимость и управляемость параметров имеют принципиальное значение. Таким образом, предложенные принципы формирования аллофонной базы обеспечивают основу для структурированного представления аллофонов русского языка с учетом требований информационной безопасности. Дальше рассматривается структура аллофонной базы и формат представления аллофонных данных, а также приводится пример таблицы аллофонов.

4. Аллофонная вариативность фонем русского языка и её формализованное представление

Рассмотрим сначала более детально что такое аллофон, в русском языке фонемы реализуются в речи не в виде абстрактных единиц, а в форме конкретных звуковых вариантов, возникающих под влиянием позиционных и комбинаторных факторов. К числу таких факторов относятся положение фонемы относительно ударения, её позиция в слове, а также фонетическое окружение, прежде всего характер соседних звуков. Учет аллофонной вариативности является необходимым условием при решении прикладных задач, связанных с анализом и моделированием речевых сигналов.

В рамках работы аллофоны рассматриваются как нормативные варианты реализации фонем русского языка, отражающие устойчивые и воспроизводимые закономерности звучащей речи. Целью является формирование структурированной аллофонной базы, ориентированной не на исчерпывающее теоретическое описание всех возможных фонетических вариаций, а на практическое представление основных аллофонных реализаций, достаточных для последующего использования в задачах формирования речеподобных сигналов.

Следует отметить, что количество аллофонов для каждой фонемы не является строго фиксированным и может варьироваться в зависимости от степени детализации фонетического анализа. В настоящем исследовании в таблицы включаются основные позиционные и комбинаторные аллофоны, широко описанные в нормативной фонетике русского языка и регулярно реализуемые в нейтральной речи. Диалектные, индивидуально-артикуляционные и экспрессивные варианты произнесения в рамках данной работы не рассматриваются.

Для удобства практического использования аллофонные реализации фонем приводятся в порядке, соответствующем традиционному алфавитному представлению. При этом для каждой фонемы указываются тип аллофона, условия его реализации и примеры слов, иллюстрирующие соответствующий вариант произнесения. Такой подход обеспечивает наглядность представления материала и позволяет в дальнейшем перейти к формированию набора тестовых фраз, обеспечивающих аллофонное покрытие. Ниже будет представленный таблиц с аллофонными реализации гласных и согласных фонем.

Таблица 1.

Аллофонные реализации гласных фонемы

Фонема	Тип звука	Аллофон	Тип аллофона	Условия реализации	Пример слова
/а/	гласный	[а]	позиционный	под ударением	мама, сад
		[ɐ]	позиционный	первая предударная позиция	молоко́, трава́
		[ə]	позиционный	вторая и последующие безударные позиции	каранда́ш, голова́
		[а̯]	комбинаторный	после мягких согласных	пять, дядя
/о/	гласный	[о]	позиционный	под ударением	дом, окно
		[ɐ]	позиционный	первая предударная позиция	доро́га, молоко́
		[ə]	позиционный	вторая и последующие безударные позиции	коробо́к, паровоз́
		[о̯]	комбинаторный	после мягких согласных	тётя, лёд
/у/	гласный	[у]	позиционный	под ударением	лук, рука
		[ʊ]	позиционный	безударная позиция	улица, кузнец
		[у̯]	комбинаторный	после мягких согласных	тюль, люди
		[ў]	комбинаторный	после глухих согласных	путь, сутки
/э/	гласный	[э]	позиционный	под ударением	это, лето
		[и̯]	позиционный	безударная позиция	берег, земля
		[э̯]	комбинаторный	после мягких согласных	день, песня
		[э̯]	комбинаторный	после глухих согласных	текст, цех
/и/	гласный	[и]	позиционный	под ударением	мир, игра
		[и̯]	позиционный	безударная позиция	листок, сидеть
		[ы]	комбинаторный	после твёрдых согласных	сын, дым
		[и̯]	комбинаторный	после глухих согласных	тихий, пить
		[иʲ]	комбинаторный	в окружении мягких согласных	линия, вить
/ы/	гласный	[ы]	позиционный	под ударением	сын, дым
		[ы̯]	позиционный	безударная позиция	сырый, быстро
		[ɨ̯]	комбинаторный	после мягких согласных	жить, шить
		[ы̯]	комбинаторный	после глухих согласных	пыть (фонетически), стынуть

В результате анализ показал, что аллофонная вариативность определяется совокупностью артикуляционных, акустических и просодических условий: положением ударения, типом соседних звуков, границами морфем и словами, а также особенностями беглой речи. Для гласных фонем ключевыми факторами выступают редукция и влияние ударения, тогда как для согласных это ассимиляция по звонкости, мягкости и месту образования, а также позиционное оглушение. Таким образом сформированные таблицы представляют собой структурированную базу аллофонов, в которых для каждой фонемы указаны основные варианты реализации, условия их возникновения и примеры слов. Такая база может рассматриваться как промежуточный, но необходимый этап при разработке речевых технологий, ориентированных не на смысловую передачу информации, а на имитацию речеподобного акустического сигнала.

5. Формирование тестовых фраз с полным аллофонным покрытием

Целью данного этапе является разработке принципов формирования тестовых фраз, содержащих максимальное аллофонное покрытие фонем русского языка.

Таблица 2.

Аллофонные реализации согласных фонем

Фонема	Тип звука	Аллофон	Тип аллофона	Условия реализации	Пример слова
/м/	согласный, сонорный	[м]	позиционный	перед гласными заднего и среднего ряда	мама, дом
		[мʲ]	позиционный	перед гласными переднего ряда	мир, мел
		[м̥]	комбинаторный	перед глухими согласными	компас, лампа
		[м:]	комбинаторный	на стыке морфем или слов	именно, дом мой
		[м̩]	позиционный	в слабой позиции между шумными согласными	ритм, симптом
/н/	согласный, сонорный	[н]	позиционный	перед гласными заднего и среднего ряда	нос, луна
		[нʲ]	позиционный	перед гласными переднего ряда	нет, нить
		[н̥]	комбинаторный	перед глухими согласными	банк, контекст
		[ŋ]	комбинаторный	перед заднеязычными /к/, /г/	банк, конгресс
		[н:]	комбинаторный	на стыке морфем или слов	он не, тонна
		[н̩]	позиционный	в слабой позиции между шумными согласными	сонм, гимн
/л/	согласный, сонорный	[л]	позиционный	перед гласными заднего и среднего ряда	лук, молоко
		[лʲ]	позиционный	перед гласными переднего ряда	лист, лёд
		[ɬ]	комбинаторный	в позиции после гласных заднего ряда	волк, палка
		[л̥]	комбинаторный	перед глухими согласными	стол, полка
		[л:]	комбинаторный	на стыке морфем или слов	аллель, был ли
		[л̩]	позиционный	между шумными согласными	взлёт, фольклор
/р/	согласный, сонорный	[р]	позиционный	перед гласными заднего и среднего ряда	рука, гора
		[рʲ]	позиционный	перед гласными переднего ряда	река, рис
		[р̥]	комбинаторный	в позиции после глухих согласных	спорт, трамвай
/р/	согласный, сонорный	[р:]	комбинаторный	на стыке морфем или слов	территория, дар речи
		[ɾ]	позиционный	в интервокальной позиции в беглой речи	гора, пора
		[р̩]	позиционный	между шумными согласными	взрыв (фонетически), партнёр
/п/	согласный, шумный, смычный	[п]	позиционный	перед гласными заднего и среднего ряда	пол, путь
		[пʲ]	позиционный	перед гласными переднего ряда	пить, пена
		[пʰ]	комбинаторный	в начале слова перед ударным гласным	папа, поле
		[п̄]	позиционный	в конце слова	хлеб (фонетически [п])
		[п:]	комбинаторный	на стыке морфем	подпись, группа
/б/	согласный, шумный, смычный	[б]	позиционный	перед гласными заднего и среднего ряда	бок, бор
		[бʲ]	позиционный	перед гласными переднего ряда	бить, белый
		[б̥]	комбинаторный	перед глухими согласными	обход, гриб
		[п]	позиционный	в конце слова (оглушение)	гроб, хлеб
		[б:]	комбинаторный	на стыке морфем	оббить, суббота

Фонема	Тип звука	Аллофон	Тип аллофона	Условия реализации	Пример слова
/т/	согласный, шумный, смычный	[т]	позиционный	перед гласными заднего и среднего ряда	там, ток
		[тʲ]	позиционный	перед гласными переднего ряда	тень, тихо
		[тʰ]	комбинаторный	в начале слова перед ударным гласным	тема, тон
		[т̄]	позиционный	в конце слова	кот, плот
		[т:]	комбинаторный	на стыке морфем	оттуда, меттекст
/д/	согласный, шумный, смычный	[д]	позиционный	перед гласными заднего и среднего ряда	дом, дорога
		[дʲ]	позиционный	перед гласными переднего ряда	день, дитя
		[д̥]	комбинаторный	перед глухими согласными	отбор, подписать
		[т]	позиционный	в конце слова (оглушение)	мёд, сад
/к/	согласный, шумный, смычный	[к]	позиционный	перед гласными заднего и среднего ряда	кот, кран
		[кʲ]	позиционный	перед гласными переднего ряда	кино, келья
		[кʰ]	комбинаторный	в начале слова перед ударным гласным	карта, код
		[к̄]	позиционный	в конце слова	лук, замок
		[к:]	комбинаторный	на стыке морфем	заккредитовать
/г/ /г/	согласный, шумный, смычный согласный, шумный, смычный	[г]	позиционный	перед гласными заднего и среднего ряда	гора, гул
		[гʲ]	позиционный	перед гласными переднего ряда	гений, гибкий
		[г̥]	комбинаторный	перед глухими согласными	вокзал, когти
		[к]	позиционный	в конце слова (оглушение)	луг, порог
		[г:]	комбинаторный	на стыке морфем	подгруппа, согласие
/ф/	согласный, шумный, щелевой	[ф]	позиционный	перед гласными заднего и среднего ряда	факт, форма
		[фʲ]	позиционный	перед гласными переднего ряда	фигура, фея
		[ф:]	комбинаторный	на стыке морфем или слов	оффлайн, шеф-форум
		[ф̄]	позиционный	в конце слова	шарф, плов
		[ф̥]	комбинаторный	рядом с глухими согласными	автофокус
/в/	согласный, шумный, щелевой	[в]	позиционный	перед гласными заднего и среднего ряда	вода, взрыв
		[вʲ]	позиционный	перед гласными переднего ряда	вес, вилка
		[в̥]	комбинаторный	перед глухими согласными	впуск, вставка
		[ф]	позиционный	в конце слова (оглушение)	кров, прав
		[в:]	комбинаторный	на стыке морфем	ввезти, сверхважный
/с/	согласный, шумный, щелевой	[с]	позиционный	перед гласными заднего и среднего ряда	сад, сон
		[сʲ]	позиционный	перед гласными переднего ряда	сено, сила
		[з]	комбинаторный	перед звонкими согласными	сдать, сбор
		[с̄]	позиционный	в конце слова	лес, нос
		[с:]	комбинаторный	на стыке морфем	рассыпать, бессонный

Фонема	Тип звука	Аллофон	Тип аллофона	Условия реализации	Пример слова
/з/	согласный, шумный, щелевой	[з]	позиционный	перед гласными заднего и среднего ряда	зуб, зона
		[зʲ]	позиционный	перед гласными переднего ряда	зима, зелень
		[с]	позиционный	в конце слова (оглушение)	воз, глаз
		[з̯]	комбинаторный	перед глухими согласными	сказка, раз путь
		[з:]	комбинаторный	на стыке морфем	беззвучный
/ш/	согласный, шумный, щелевой	[ш]	позиционный	во всех позициях	шум, шаг
		[ш:]	комбинаторный	на стыке морфем	расшить, лишше
		[ш͡]	позиционный	в конце слова	нож, камыш
		[щ̯]	комбинаторный	рядом с глухими согласными	шпилька
		[шʷ]	комбинаторный	перед /у/	шутка
/ж//ж/	согласный, шумный, щелевой	[ж]	позиционный	перед гласными	жук, жара
		[ш]	позиционный	в конце слова (оглушение)	нож, еж
		[ж̯]	комбинаторный	перед глухими согласными	книжка
		[ж:]	комбинаторный	на стыке морфем	безжалостный
		[жʷ]	комбинаторный	перед /у/	жуть
/х/	согласный, шумный, щелевой	[х]	позиционный	перед гласными заднего ряда	холм, хутор
		[хʲ]	позиционный	перед гласными переднего ряда	хитрый, химия
		[х:]	комбинаторный	на стыке морфем	тиххий
		[х͡]	позиционный	в конце слова	вверх, смех
		[ç]	комбинаторный	после /и/	тихий
/ц/	согласный, шумный, аффриката	[ц]	позиционный	перед гласными	цена, цапля
		[ц͡]	позиционный	в конце слова	палец, конец
		[ц:]	комбинаторный	на стыке морфем	отцепить, подцех
		[ц̯]	комбинаторный	перед глухими согласными	отцовский
		[т͡с͡]	артикуляционный вариант	подчёркнутая артикуляция	интонационно выделено
/ч/	согласный, шумный, аффриката	[ч]	позиционный	во всех позициях	человек, ночь
		[ч:]	комбинаторный	на стыке морфем	отчёт, соччение
		[ч͡]	позиционный	в конце слова	мяч, печь
		[ш’]	комбинаторный	в беглой речи	что
		[ч̯]	комбинаторный	рядом с глухими согласными	дочка
/щ/	согласный, шумный, щелевой	[щ]	позиционный	во всех позициях	щука, плащ
		[щ:]	комбинаторный	в позиции удлинения	счётчик
		[щ͡]	позиционный	в конце слова	плащ
		[ш’:ч’]	артикуляционный вариант	фонетическое разложение	счастье
		[щ̯]	комбинаторный	Рядом с глухими согласными	щи

Фонема	Тип звука	Аллофон	Тип аллофона	Условия реализации	Пример слова
/й/	согласный, сонорный	[й]	позиционный	перед гласными	йод, май
		[й̯]	комбинаторный	после глухих согласных	стройка
		[j̯]	позиционный	В дифтонгоидных сочетаниях	край, мой
		[й:]	комбинаторный	на стыке морфем	выййти
		[й̯]	позиционный	в быстрой речи	мой друг

Такие фразы не предназначены для передачи семантической информации, а служат исключительно инструментом проверки полноты и репрезентативности сформированной аллофонной базы.

Данный принцип заключается, в том, что при формировании тестовых фраз были использованы следующие требование, во-первых, аллофонное покрытие должно быть соблюдено, каждая фраза должна включать аллофоны, реализующиеся в различных позициях: под ударением и без ударения, в начале и конце слова, на стыке морфем и слов.

Во-вторых, комбинаторное разнообразие, в состав фраз включаются сочетания согласных и гласных, провоцирующие ассимиляцию по звонкости, мягкости и месту образования. В-третьих, минимизация семантической связности, слова подбираются таким образом, чтобы фразы не образовывали логически завершённого высказывания, что снижает риск утечки смысловой информации. И, в-четвертых, естественность артикуляции, несмотря на отсутствие смысловой нагрузки, фразы соответствуют фонетическим и орфоэпическим нормам русского языка, что повышает степень речеподобия сигнала.

Ниже приведены примеры тестовых фраз, сформированных на основе аллофонной базы, представленной в разделе 4:

- *Мягкий ветер шумно колебал тёмные облака.*
- *Старый дом быстро наполнился тихими голосами.*
- *Часто слышны резкие звуки в глубине пустого коридора.*
- *Синий фон слегка дрожал под ярким светом лампы.*

Каждая из приведённых фраз включает гласные в ударных и безударных позициях, твёрдые и мягкие согласные, а также сочетания, вызывающие позиционное оглушение и ассимиляцию. Таким образом сформированные тестовые фразы могут использоваться: для проверки полноты аллофонной базы, для оценки акустических характеристик синтезируемых речеподобных сигналов, как входной материал для дальнейших исследований в области речевого маскирования.

Заключение

В рамках данной работы была рассмотрена проблема формирования систематизированной базы аллофонов фонем современного русского языка в контексте задач информационной безопасности.

В результате проведённого анализа была выполнена классификация аллофонных реализаций всех гласных и согласных фонем русского языка. Для каждой фонемы были выделены основные позиционные и комбинаторные аллофоны, описаны условия их реализации и приведены примеры слов, иллюстрирующие соответствующие фонетические процессы. Такой подход позволил учесть влияние ударения, соседних звуков, морфемных границ и особенностей беглой речи на акустическую форму речевого сигнала.

В разделе, посвящённом формированию тестовых фраз, были предложены принципы подбора и комбинирования аллофонов с целью обеспечения максимального фонетического покрытия. Показано, что использование таких фраз позволяет проверять полноту аллофонной базы и создавать входные данные для дальнейших экспериментов, связанных с синтезом и анализом речеподобных сигналов.

Таким образом, проведённое исследование подтверждает целесообразность использования аллофонного подхода при решении задач, связанных с имитацией человеческой речи, и вносит вклад в развитие междисциплинарных исследований на стыке фонетики, речевых технологий и информационной безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алиева М. А. Основы фонетики в английском и русском языках. Universum: филология и искусствоведение, 2021. 256 с.
2. Apzhaparova A., Bektashova Zh. Сравнительный анализ фонетической структуры русского и английского языков // Bulletin of Science and Practice. 2024. Т. 5, № 4. С. 12–18.
3. Jagadeesh A.B. Маскировка речи разными лингвистическими маскерами // Canadian Journal of Speech-Language Pathology and Audiology. 2021. Vol. 45, № 2. P. 55–63.
4. Sivapatham S., Kar A., Bodile R., Mladenovic V. Глубокая нейронная сеть для оценки маскирующих сигналов с фазовой корреляцией // Applied Acoustics. 2023. Vol. 212. Article 109592.
5. Yasmin S., Irsik V., Johnsrude I., Herrmann B. Влияние маскировки речи на нейронное отслеживание акустических и семантических особенностей // Neuropsychologia. 2023. Vol. 186. Article 108584.
6. Wang X., Xu L. Восприятие речи в шуме: маскирование и демаскирование // Journal of Otology. 2021. Vol. 16, № 3. P. 102–111.
7. Yi H., et al. Прозрачная маска и чёткая речь улучшают разборчивость в шуме // Journal of Speech, Language, and Hearing Research. 2023. Vol. 66, № 7. P. 2200–2215.
8. Sultanmurodova F.A., Erkinova P.A., Boltayeva F.O. Фонетика и фонология русского языка // European Science Methodical Journal. 2024. Vol. 2, № 11. P. 4–6.
9. Speech recognition under masking: Age, hearing, and machine learning classification // Acta Psychologica. 2025. Vol. 250. Article 104579.
10. Pisati R.A., Meluzzi C. Русский язык, говоримый казахской молодёжью: фонетический и фонологический анализ // Loquens. 2025. Vol. 12, e117.

© Самаке Баче Александр (bathiealexandre@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.33

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ РУКОВОДИТЕЛЕМ СУДЕБНО-ЭКСПЕРТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЗАДАЧИ О НАЗНАЧЕНИЯХ И РЕТРОСПЕКТИВНОЙ ИНФОРМАЦИИ

INTELLIGENT SUPPORT SYSTEM FOR DECISION-MAKING BY THE HEAD OF A FORENSIC EXPERT INSTITUTION BASED ON THE PROBLEM OF APPOINTMENTS AND RETROSPECTIVE INFORMATION

R. Sanakoev
V. Pleshakov
A. Konovalova
V. Kushkin

Summary. The article discusses the possibility of creating an intelligent decision support system for the head of a forensic expert institution of the Federal Fire Service based on a mathematical model of the assignment problem. It proposes a formalization of the process of distributing forensic expert assignments, considering the professional competence of experts, workload constraints, the urgency of conducting examinations, and legal prohibitions. Special attention is given to the use of retrospective information about the institution's activities, which allows for a transition from a static optimization model to an adaptive feedback control system.

Keywords: forensic institution, intelligent system, assignment problem, decision support, retrospective information, adaptive management, artificial intelligence.

Санакоев Руслан Георгиевич
Заместитель министра МЧС Республики Южная Осетия по гражданской обороне и защите населения
E-mail: dodot2@mail.ru
Плешаков Виталий Владимирович
Кандидат технических наук, доцент, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва
v.pleshakov@mail.ru
Коновалова Анна Андреевна
Преподаватель, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва
a.a.bleznikova@yandex.ru
Кушкин Владислав Алексеевич
Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва
vlad.kushkin@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается возможность создания интеллектуальной системы поддержки принятия управленческих решений руководителя судебно-экспертного учреждения федеральной противопожарной службы на основе математической модели задачи о назначениях. Предлагается формализация процесса распределения судебно-экспертных заданий с учетом профессиональной компетентности экспертов, ограничений по загрузке, срочности выполнения экспертиз и правовых запретов. Особое внимание уделено использованию ретроспективной информации о деятельности учреждения, что позволяет перейти от статической оптимизационной модели к адаптивной системе управления с обратной связью.

Ключевые слова: судебно-экспертное учреждение, интеллектуальная система, задача о назначениях, поддержка принятия решений, ретроспективная информация, адаптивное управление, искусственный интеллект.

Введение

Судебно-экспертные учреждения федеральной противопожарной службы являются одним из основных элементов системы МЧС России. Современные судебно-экспертные учреждения ФПС функционируют в условиях возрастающего объема и сложности экспертных заданий, ограниченности кадровых ресурсов и жестких процессуальных сроков. Такое положение обуславливается ежегодным увеличением размера материального ущерба относительного одного пожара [1], необходимостью привлечения высококвалифицированных специалистов в области пожарной безопасности, при невысокой заработной плате и требованиями уголовно-процессуального законодательства к срокам расследования.

В этих условиях особую актуальность приобретает задача повышения обоснованности и эффективности управленческих решений руководителя учреждения. Традиционные методы распределения экспертных заданий, основанные преимущественно на личном опыте и интуиции руководителя, не обеспечивают формализованной оценки альтернативных решений и затрудняют анализ эффективности управления.

В соответствии со ст. 14 Федерального закона от 31 мая 2001 г. № 73-ФЗ «О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации» руководитель государственного судебно-экспертного учреждения определяет возможность производства экспертизы в учреждении; принимает решения о поручении производства экспертизы конкретному эксперту или комиссии экспертов данного учреждения; планирует загрузку оборудования и осуществляет контроль за соблюдением сроков производства судебных экспертиз с учетом дат, установленных судами при назначении судебных экспертиз; оценивает полноту и качество проведенных исследований, не нарушая принцип независимости эксперта.

Существенная часть этих решений носит формализуемый характер и может быть описана средствами теории управления и исследования операций [2].

Так, судебно-экспертное учреждение может быть представлено как иерархическая организационная система, включающая:

— множество экспертов с различной квалификацией, специализацией и опытом;
— поток экспертных заданий (постановлений (определений) о назначении судебных экспертиз и исследований), характеризующихся предметной областью, сложностью и сроками;
— ограниченные ресурсы (оборудование, информационное обеспечение, лаборатории, время);
— нормативные и правовые ограничения (процессуальные сроки, требования независимости и компетентности эксперта).

Одним из перспективных направлений является использование интеллектуальных систем поддержки принятия решений, основанных на математических моделях оптимального распределения ресурсов [3]. В данной работе в качестве такой модели рассматривается задача о назначениях, адаптированная к условиям функционирования судебно-экспертного учреждения ФПС.

Постановка задачи управления судебно-экспертным учреждением

Рассмотрим судебно-экспертное учреждение, в котором задано множество экспертов (сотрудников и работников судебно-экспертного учреждения, в служебные обязанности которых входит проведение судебных экспертиз и исследований) и множество судебно-экспертных заданий (постановлений (определений) о назначении судебных экспертиз от дознавателей органов ГПН, следователей МВД России, Следственного комитета России и исследований). Каждое задание характеризуется вопросами, поставленными на разрешение, трудоемкостью и срочностью выполнения. Каждый эксперт обладает определенным уровнем профессиональной компетентности и ограничениями по допустимой загрузке.

$$E = \{e_1, e_2, \ldots, e_n\}$$

и множество судебно-экспертных заданий

$$Z = \{z_1, z_2, \ldots, z_m\}$$

Задача руководителя состоит в формировании такого распределения заданий между экспертами, которое обеспечивает наилучшее качество функционирования учреждения при соблюдении организационных и правовых ограничений, что означает максимальное качество заключений экспертов при соблюдении сроков и рациональном использовании ресурсов.

Математическая модель задачи о назначениях

Введем бинарные переменные

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если эксперт } e_i \text{ назначен на задании,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Целевая функция модели имеет вид:

$$\max \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} c_{ij} x_{ij}$$

где: коэффициенты c_{ij} характеризуют ожидаемое качество выполнения задания z_j экспертом e_i.

Модель дополняется системой ограничений, отражающих допустимую загрузку экспертов, необходимость назначения каждого задания и наличие правовых запретов на отдельные назначения:

Система ограничений включает:

— ограничение по уникальности назначенной экспертизы;
— ограничение допустимой загрузки экспертов с учетом трудоемкости экспертного задания и максимально допустимой нагрузки эксперта;
— ограничения правового и организационного характера, связанные с конфликтом интересов и отсутствием допуска к самостоятельному производству судебных экспертиз.

Учет ретроспективной информации в принятии управленческих решений

Важным развитием предложенной модели является учет ретроспективной информации о деятельности судебно-экспертного учреждения и отдельных экспертов. Под ретроспективной информацией понимаются данные о ранее выполненных экспертизах, фактических сроках их исполнения, качестве экспертных заключе-

ний, а также показатели загрузки и результативности отдельных экспертов.

С формальной точки зрения каждому эксперту (e_i) сопоставляется вектор ретроспективных показателей

$$R_i = \left\langle r_i^{(1)}, r_i^{(2)}, \ldots, r_i^{(k)} \right\rangle,$$

включающий, например, среднее время выполнения экспертиз, долю экспертиз, выполненных с нарушением сроков, и показатели качества экспертных заключений.

Коэффициенты полезности c_{ij} в этом случае определяются как функция текущих характеристик эксперта и задания, а также ретроспективных показателей:

$$c_{ij} = f\left(q_i, d_j, t_j, R_i\right)$$

где q_i — уровень компетентности эксперта, d_j — трудоемкость задания, t_j — коэффициент срочности.

Учет ретроспективной информации позволяет перейти от статической модели распределения заданий к адаптивной системе управления с обратной связью. Результаты ранее принятых управленческих решений используются для корректировки параметров модели, что повышает устойчивость и обоснованность последующих решений руководителя.

Интеллектуальная система поддержки принятия решений руководителя

На основе предложенной математической модели формируется интеллектуальная система поддержки принятия решений, выполняющая функции сбора и анализа информации, расчета оптимального распределения заданий и представления руководителю интерпретируемых рекомендаций [4].

Принципиально важно отметить, что система не подменяет управленческую функцию руководителя, а выступает в роли инструмента поддержки, повышающего воспроизводимость и обоснованность принимаемых решений.

Сравнительная оценка эффективности

Сравнение предложенного подхода с традиционными методами управления показывает, что использование формализованной модели задачи о назначениях с учетом ретроспективной информации обеспечивает более равномерную загрузку экспертов, снижение рисков нарушения сроков выполнения экспертиз и повышение интегрального показателя качества управления.

В случае коллегиального проведения экспертиз модель расширяется до многократной задачи о назначениях или задачи с дополнительными связующими ограничениями. Рассматриваемая модель относится к классу целочисленных задач линейного программирования. В базовой постановке она решается за полиномиальное время с использованием венгерского алгоритма, а при наличии дополнительных ограничений — методами ветвей и границ либо эвристическими алгоритмами.

Архитектура и алгоритмическая реализация ИИ-руководителя

Предлагаемая архитектура ИИ-руководителя судебно-экспертного учреждения включает следующие модули:

- модуль сбора данных, аккумулирующий сведения о делах, экспертах и ресурсах.
- модуль формализации, преобразующий входные данные в параметры оптимизационной модели.
- оптимизационный модуль, реализующий алгоритмы решения задачи о назначениях (в том числе венгерский алгоритм и его модификации).
- модуль объяснимости, формирующий обоснование принятого решения для руководства и контрольных органов.
- интерфейс принятия решений, позволяющий человеку-руководителю утверждать, корректировать или отклонять предложения ИИ.

ИИ в данной концепции не заменяет полностью руководителя, а выступает в роли цифрового управленческого агента, обеспечивающего обоснованность и воспроизводимость решений [5].

Преимущества и ограничения применения

К основным преимуществам ИИ-руководителя относятся:

- снижение субъективности при распределении заданий;
- повышение эффективности использования кадровых ресурсов;
- возможность быстрого перерасчета решений при изменении входных условий;
- накопление и анализ управленческой статистики.

Ограничения связаны с:

- неполной формализуемостью некоторых управленческих факторов (психологические аспекты, неявные риски);
- необходимостью строгого соблюдения принципов независимости и персональной ответственности эксперта;
- требованиями к защите информации и персональных данных.

Правовые и этические аспекты

С точки зрения права ИИ-руководитель не может рассматриваться как самостоятельный субъект управления. Юридическая ответственность за принимаемые решения должна оставаться за должностным лицом. Поэтому ИИ целесообразно использовать как систему поддержки принятия решений, а не как автономного управленца. Этически значимым является обеспечение прозрачности алгоритмов и недопущение дискриминационных практик при распределении экспертных заданий.

Заключение

В статье предложен подход к созданию интеллектуальной системы поддержки принятия решений руководителя судебно-экспертного учреждения федеральной противопожарной службы на основе задачи о назначениях. Учет ретроспективной информации позволяет рассматривать управление учреждением как адаптивный процесс с обратной связью, что соответствует современным требованиям и определяет научную и практическую значимость полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пожары и пожарная безопасность в 2023 году: информационно-аналитический сборник / В.С. Гончаренко, Т.А. Чечетина, В.И. Сибирко [и др.]. — Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2024. — 110 с. — EDN BSONFO.
2. Расследование и экспертиза пожаров: Учебное пособие / С.А. Назаров, В.В. Плешаков, И.А. Степанова [и др.]. — 1-е изд. — Москва: Издательство Юрайт, 2024. — 289 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-15019-3. — EDN DUYNGA.
3. Плешаков В.В. Применение теории игр в судебном разбирательстве по делам о пожарах / В.В. Плешаков, Р.Г. Санакоев, Е.А. Матюшина // Культура и безопасность. — 2024. — № 1. — С. 77–85. — DOI 10.25257/KB.2024.1.77-85. — EDN IHRUMJ.
4. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению «Математика. Компьютер. науки» / Е.С. Вентцель; Е.С. Вентцель. — 4-е изд., стер. — Москва: Дрофа, 2006. — (Высшее образование). — ISBN 5-358-00340-1. — EDN OTBHAP.
5. Топольский Н.Г., Вилисов В.Я. Методы, модели и алгоритмы в системах безопасности: монография — Москва: РИОР, 2021. — 475 с.

© Санакоев Руслан Георгиевич (dodot2@mail.ru); Плешаков Виталий Владимирович (v.pleshakov@mail.ru);
Коновалова Анна Андреевна (a.a.bleznikova@yandex.ru); Кушкин Владислав Алексеевич (vlad.kushkin@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.38

МЕТОД ИЗВЛЕЧЕНИЯ ФАСЕТОВ ИЗ ПОИСКОВОЙ СТРОКИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ АРХИТЕКТУРЫ BERT

METHOD FOR EXTRACTING FACETS FROM A SEARCH STRING BASED ON A NEURAL NETWORK OF THE BERT ARCHITECTURE

S. Susanin

Summary. The article discusses the problem of extracting structured facets (filters) from natural language search queries for cataloging systems. Existing approaches–rules, neural network entity extraction, and large language models –have trade-offs between quality, speed, and adaptability. The article proposes a hybrid method that combines declarative rules for recognizing structured patterns and semantic matching based on vector representations of compact BERT models. Priority rules provide the extraction of dates and numeric ranges, and the vector index of attribute values allows you to dynamically expand the catalog without retraining. Experiments show that the method provides a delay of less than 50 ms (compared to 2000 ms for LLM). The proposed approach is applicable in systems with strict latency requirements.

Keywords: faceted search, attribute extraction, semantic search, natural language processing.

Сусанин Станислав Ильич
ФГАОУ ВО Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
rigel.lab@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается задача извлечения структурированных фасетов (фильтров) из поисковых запросов на естественном языке для систем каталогизации. Существующие подходы — правила, нейросетевое извлечение сущностей и большие языковые модели — обладают компромиссами между качеством, скоростью и адаптивностью. В статье предложен гибридный метод, сочетающий декларативные правила для распознавания структурированных паттернов и семантическое сопоставление на основе векторных представлений компактных BERT-моделей. Правила с приоритетами обеспечивают извлечение дат и числовых диапазонов, а векторный индекс значений атрибутов позволяет динамически расширять каталог без переобучения. Эксперименты показывают, что метод обеспечивает задержку менее 50 мс (против 2000 мс у LLM). Предложенный подход применим в системах с жесткими требованиями к латентности.

Ключевые слова: фасетный поиск, извлечение атрибутов, семантический поиск, обработка естественного языка.

Введение

Современные системы поиска в каталоге — электронные библиотеки, маркетплейсы, базы данных публикаций — предоставляют пользователям интерфейс фильтрации по фасетам (структурированным атрибутам), например: автор, год публикации, категория, цена и другие. Однако формулирование запросов через множественные фильтры требует от пользователя понимания структуры каталога и многократных действий в интерфейсе.

Решением является возможность формулировать запросы на естественном языке. В этом случае задача системы — преобразовать такой запрос в набор формальных фильтров и выделить часть запроса для полнотекстового поиска.

Существующие подходы к данной задаче можно разделить на три категории. Системы, основанные на правилах, с регулярными выражениями и словарями обеспечивают высокую скорость, но требуют значительных усилий на поддержку и плохо обрабатывают вариативность естественного языка. Нейросетевые модели на основе извлечения сущностей требуют переобучения при изменении схемы атрибутов. Большие языковые модели демонстрируют высокое качество, но могут быть неприменимы из-за высокого времени обработки.

В данной работе предлагается гибридный метод, сочетающий преимущества указанных подходов: настраиваемую систему правил для извлечения структурированных паттернов, семантическое сопоставление на основе компактных BERT моделей и возможность расширения каталога без переобучения.

Обзор литературы

Задача преобразования запросов на естественном языке в структурированные представления относится к области семантического парсинга. Однако задача извлечения фасетных фильтров имеет ряд отличий: отсутствие сложной логики для объединения условий, необходимость работы с динамически пополняемым множеством значений и требования к низкой латентности для подсказок пользователю при вводе поискового запроса.

В области электронной коммерции исследования фокусируются на извлечении атрибутов товаров. Так в [1] описывается подход на базе LLM для извлечения атрибутов товаров из описания, LLM показывает прирост до 48 % ценой кратного увеличения вычислительных затрат. Работа [2] демонстрирует преимущество генерирующих моделей по сравнению с тегирующими моделями, позволяя выделять как явные, так и неявные атрибуты товаров. Работа [3] сравнивает дообученную LLM для извлечения атрибутов и LLM общего назначения (Claude). Специализированная LLM показывает результаты на 9 % выше общей.

Общее среди рассмотренных методов — использование больших нейросетевых моделей. Большие модели хорошо показывают себя для задачи выделения фасетов из запроса при миллионах товаров, но это может быть избыточно для каталогов до 100 тысяч товаров, поэтому гибридный метод, фокусирующийся на низких вычислительных затратах, актуален. Так в работе [4] представлен метод дообучения трансформера для NER, показывающий высокую точность и низкое время вычислений. Извлечение именованных сущностей с помощью дообученной BERT модели [5] показывает высокие результаты [6] при низких вычислительных затратах, что актуально для систем с ограниченными ресурсами.

Предлагаемый метод

Обработка запроса выполняется в несколько последовательных этапов. На первом этапе производится приведение текста к нижнему регистру, исправление типичных опечаток по словарю (лексическая коррекция на основе минимального расстояния Левенштейна), удаление пунктуации и токенизация с сохранением позиционных индексов для последующего восстановления покрытых участков. Далее применяются декларативные правила, извлекающие структурированные паттерны [7], позволяя распознать до 85 % атрибутов.

Каждое правило представляет собой кортеж

$$R = \{P, A, E, C, n\}$$

Где:

P — паттерн сопоставления (регулярное выражение, шаблон, иные признаки)

A — целевой атрибут из предметной области

E — функция извлечения значения

C — множество условий применимости

n — приоритет, большее число соответствует более высокому приоритету

Каждый фильтр представляет собой кортеж:

$$F = (A, O, V)$$

Где:

A — имя атрибута

O — оператор, eq (равно), gte (больше или равно), lte (меньше или равно)

V — значение

Для дат и временных периодов применяются следующие паттерны:

- "за{YEAR}год" $\rightarrow F(\text{год}, eq, YEAR)$
- "после{YEAR}" $\rightarrow F(\text{год}, gte, YEAR)$
- "раньше{YEAR}" $\rightarrow F(\text{год}, lte, YEAR)$
- "с{YEAR1}по{YEAR2}" $\rightarrow$ $\rightarrow F(\text{год}, gte, YEAR1) \wedge F(\text{год}, lte, YEAR2)$
- "{YEAR1}–{YEAR2}" $\rightarrow$ $\rightarrow F(\text{год}, gte, YEAR1) \wedge F(\text{год}, lte, YEAR2)$

Для числовых диапазонов:

- "от{NUM}" $\rightarrow F(attr, gte, NUM)$
- "до{NUM}" $\rightarrow F(attr, lte, NUM)$
- "от{NUM1} {NUM2}" $\rightarrow$ $\rightarrow F(attr, gte, NUM2) \wedge F(attr, lte, NUM2)$

Слоты $\{YEAR\}$, $\{NUM\}$ распознаются регулярными выражениями с учётом контекстных ограничений, прилегающих лексем единиц измерения и паттернов операторов.

Приоритеты правил позволяют разрешать конфликты в случаях, когда один фрагмент запроса соответствует нескольким паттернам. Применяются следующие принципы:

- Правила с более специфичными паттернами (с большим числом слотов) имеют более высокий приоритет.
- Правила, явно привязанные к конкретной предметной области, имеют приоритет над универсальными (например, единица измерения «руб» распознаётся как «цена» имеет приоритет над общим числовым паттерном).
- При равной специфичности выбирается правило, покрывающее меньший фрагмент для избегания захвата избыточного контекста.

Для фрагментов запроса, не покрытых формальными правилами на предыдущем этапе, применяется семантическое сопоставление с использованием векторного индекса значений атрибутов. Для каждого атрибута типа ENUM (Перечисление) и его возможных значений (синонимов) предварительно вычисляются векторные представления с помощью различных моделей BERT [5]. Выбор моделей основан на результатах бенчмарка ruMTEB [8], выбраны модели USER2-base, rubert-mini-frida, FRIDA и rubert-tiny-turbo [9], являющейся самой маленькой и быстрой моделью из рассмотренных и показывающей высокие результаты на ruMTEB. Модель FRIDA

является лидером ruMTEB для размера менее 4 ГБ RAM, а rubert-mini-frida является дистилированной версией этой модели. Сравнение качества представлено в разделе результатов.

Для каждого значения и всех его синонимов генерируется эмбеддинг размерности d. Индекс хранит кортежи вида:

$$I = \{A, V, W\},$$

где:

A — атрибут

V — значение атрибута

W — вектор размерности d

Для атрибутов типа RANGE (Диапазон) и DATE (Дата) дополнительно строятся индексы для единиц измерения и операторов.

Из непокрытых токенов запроса генерируются n-граммы длиной от 1 до 4 слов. Для каждой n-граммы вычисляется векторное представление q и выполняется поиск ближайших соседей по косинусной близости:

$$sim(q, W) = \frac{q \cdot W}{|q| \cdot |W|}$$

Если максимальная близость превышает заданный порог θ (зависит от используемой BERT модели), то n-грамма сопоставляется с соответствующим атрибутом и значением, а токены помечаются как использованные.

Преимуществом данного подхода является возможность динамического расширения индекса новыми значениями и синонимами без дообучения модели, а также устойчивость к морфологическим вариациям благодаря семантической близости в векторном пространстве.

После сопоставления всех распознанных фасетов определяется множество покрытых токенов. Для каждого извлеченного фильтра фиксируются позиционные интервалы в исходном запросе. Объединение этих интервалов дает покрытую область. Токены, не вошедшие в покрытую область и не являющиеся стоп-словами, конкатенируются в остаточный запрос Q_{res}, который предназначен для семантического полнотекстового поиска.

Итоговый результат парсинга представляется структурой:

$$Result = \{Filters, Q_{res}, Cov\},$$

где:

$Filters$ — множество фильтров $F(A, O, V)$

Q_{res} — строка для полнотекстового поиска

Cov — множество интервалов $[start, stop]$ в исходном запросе, которые были использованы для извлечения фильтров.

К преимуществам подхода относится:

- Адаптивность к изменению предметной области, требуется только модификация декларативных правил и обновления индекса значений, но не изменения программного кода или дообучение модели.
- Комбинирование формальных правил и семантического поиска позволяет обрабатывать как строго структурированные паттерны, так и свободные формы запросов.
- Результат включает информацию о покрытых участках, что обеспечивает прозрачность процесса извлечения.
- Векторный индекс поддерживает эффективный поиск при большом количестве значений атрибутов, сохраняя низкую вычислительную сложность для добавления новых вариантов значений атрибутов.

Датасет

Для оценки метода создан русскоязычный датасет, охватывающий предметную область книг. Датасет составлен вручную на базе истории запросов пользователей в книжном магазине и дополнен синтетическими примерами с помощью LLM.

Каждый пример содержит исходный запрос, целевые фильтры с указанием атрибута, оператора и значения, остаточный запрос при наличии. Датасет включает примеры с неоднозначными ролями сущностей, числовыми диапазонами в различных формулировках, конструкциями, провоцирующими ложные срабатывания, и запросами, требующими гибридного поиска. Фрагмент датасета приведён в таблицах ниже.

Таблица 1.

Фрагмент атрибутов

№	Название	Тип	Значения /	Паттерны
1	Автор	Перечисление	Пушкин, Лермонтов, Толстой	
2	Год	Дата	Год, выпуск	> — с, от, после, новее <— до, старше, ранее = за, в
3	Цена	Диапазон	Рублей, руб	> — от, дороже <— до, дешевле
4	Жанр	Перечисление	Фантастика, Детектив	

Таблица 2.

Фрагмент поисковых запросов

№	Запрос	Фильтры	Остаточный запрос
1	Книги Толстого до 500 рублей	Автор = Толстой Цена <500	
2	Фантастика за 2024 год	Жанр = Фантастика Год = 2024	
3	Детективы в мягкой обложке	Жанр = Детектив Формат = Мягкая обложка	
4	Булгаков Мастер и Маргарита	Автор = Булгаков	Мастер и Маргарита

Собранный датасет состоит из 17 атрибутов и 1200 размеченных запросов, представленных в формате JSON для удобства загрузки.

Результаты метода

Для оценки используются Exact — доля запросов с полностью правильным набором фильтров, Attr P — precision найденных атрибутов, Attr R — recall найденных атрибутов, Attr F1 — мера по правильности определения атрибутов, Value P — precision найденных значений при правильно найденных атрибутах, Value R — recall найденных значений, Value F1 — мера по правильности значений при верном атрибуте, Latency — время на обработку одного запроса в мс. Обработка велась полностью на CPU, Intel Core i7 7700, 16 GB RAM.

Исследуется влияние выбора embedding-модели на качество сопоставления. Сравниваются модели различного размера: rubert-tiny-turbo, rubert-mini-frida, USER2-base и FRIDA. Анализируется компромисс между качеством и скоростью для определения оптимального выбора при заданных ограничениях на латентность.

В качестве основы для сравнения выбрана LLM DeepSeek, с промптом, содержащим все возможные атрибуты, их значения и правила вывода.

LLM демонстрирует существенно более высокое качество извлечения фасетов, однако задержка порядка 2 секунд является критическим ограничением для сценариев реального времени. В частности, использование LLM для добавления автоподсказок фильтров в момент пользовательского ввода невозможно, поскольку требуемая задержка в этом случае менее 500 мс [10].

Для своей простоты и скорости метод демонстрирует достаточную полноту по атрибутам (0.8 для худшей модели) при умеренной точности около 0.6. Анализ ложных срабатываний выявил три основных источника ошибок:

Семантическая близость несвязных понятий. Наиболее частый источник ложных срабатываний — семантическая близость в векторном пространстве между понятиями, не имеющими прямого отношения к фильтрации. Например, запрос «солнце русской поэзии» корректно сопоставляется с автором «Пушкин» (благодаря синониму в индексе), однако слово «поэзии» ложно положительно сопоставляется с жанром «поэзия», хотя в данном контексте оно является частью идиоматического выражения и не должно интерпретироваться как фильтр.

Омонимия единиц измерения. Числовые значения с неявными единицами могут сопоставляться с несколькими атрибутами одновременно. Например, число «500» в контексте «книги от 500» может быть интерпретировано как цена, количество страниц, тираж или рейтинг в зависимости от контекста. При отсутствии явных единиц измерения (рублей, страниц, баллов) метод часто ошибается в выборе атрибута.

Отсутствие негативных примеров в индексе. Критическим ограничением текущей реализации является отсутствие негативных примеров в индексе. Метод не различает запросы, где фильтрация не требуется (например, в запросе «интересные книги для чтения летом» текущая реализация может распознать «интересные книги» как «научная литература», в то время как это неверно), от запросов с неявными фильтрами. Поскольку любая n-грамма будет иметь некоторую семантическую близость к какому-либо значению в индексе, возника-

Таблица 3.

Сравнение метрик точности в зависимости от BERT-модели

№	Модель	Exact	Attr P	Attr R	Attr F1	Val P	Val R	Val F1	Latency
1	USER2-base	0.38	0.47	0.81	0.60	0.44	0.73	0.55	170
2	rubert-tiny-turbo	0.47	0.59	0.80	0.67	0.56	0.71	0.62	13
3	rubert-mini-frida	0.50	0.61	0.88	0.72	0.57	0.78	0.66	20
4	FRIDA	0.68	0.75	0.93	0.83	0.65	0.82	0.72	600
5	DeepSeek	0.94	0.92	0.89	0.90	0.84	0.91	0.87	2000

ют ложные срабатывания на запросах, которые должны возвращать пустое множество фильтров.

Дальнейшая работа

На основе проведённого анализа выделены следующие шаги, направленные на улучшения метода.

1. Использовать эмбеддинги, вычисленные по всему контексту, а не по n-граммам. При вычислении векторного представления n-граммы учитывать её позицию в запросе и лексическое окружение. Это позволит различать случаи типа «солнце русской поэзии», где «поэзии» является частью идиомы.
2. Ввести негативные примеры в индекс, расширить формальную логику сопоставления слов с эмбеддингами, добавить метрику строковой близости для найденных и возможных значений атрибутов. Это позволит ограничить ложные срабатывания векторного поиска по значениям атрибутов
3. Дообучить BERT модель для распознавания сущностей: Перечисление, Дата, Диапазон, Число, Оператор с учётом контекста.

Заключение

В данной работе представлен метод извлечения структурированных фасетов из поисковых запросов, основанный на комбинации декларативных правил и семантического сопоставления с использованием векторных представлений. Экспериментальная оценка показала, что предложенный метод обеспечивает задержку менее 50 мс, что на 2 порядка быстрее LLM-подхода, при сохранении приемлемого качества (полнота по атрибутам 0.8, точность 0.6). Дальнейшее развитие метода предполагает контекстуализацию векторного поиска и дообучение модели на базе BERT для токенизации запроса. Таким образом, предложенный метод может быть использован в системах, где важна низкая задержка (автоподсказки, интерактивный поиск), в то время как LLM-подходы предпочтительны для задач, требовательных к качеству поиска и не чувствительных к времени выполнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mehmet Serhan Çiftlikçi, Yusuf Çakmak, Tolga Ahmet Kalaycı, Fatih Abut, Mehmet Fatih Akay, Mehmet Kızılda˘g. A New Large Language Model for Attribute Extraction in E-Commerce Product Categorization. // Electronics. 2025. № 14, 1930. 32 с.
2. Ansel Blume, Nasser Zalmout, Heng Ji, Xian Li. Generative Models for Product Attribute Extraction. // Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: Industry Track. 2023. С. 575–585.
3. Vijit Malik, Vinayak Puranik, Anirban Majumder, Vivek Sembium. Building Natural Language Interface for Product Search. // CIKM '24: Proceedings of the 33rd ACM International Conference on Information and Knowledge Management. 2024. С. 4768–4776.
4. Robyn Loughnane, Jiaxin Liu, Zhilin Chen, Zhiqi Wang, Joseph Giroux, Tianchuan Du, Benjamin Schroeder, Weiyi Sun. Explicit Attribute Extraction in E-Commerce Search. // The Seventh Workshop on e-Commerce and NLP (ECNLP 7). 2024. С. 125–133.
5. Jacob Devlin, Ming-Wei Chang, Kenton Lee, Kristina Toutanova. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. // arXiv.org. — 2019. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://arxiv.org/abs/1810.04805: (дата обращения: 03.02.2026).
6. Maithili Sabane, Aparna Ranade, Onkar Litake, Parth Patil, Raviraj Joshi, Dipali Kadam. Enhancing Low Resource NER Using Assisting Language and Transfer Learning. // arXiv.org. — 2022. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://arxiv.org/abs/2306.06477: (дата обращения: 03.02.2026).
7. Xingxing Zhang, Tao Ge, Zhifang Sui. Learning to Extract Attribute Values from a Search Engine with Few Examples. // Proceedings of CCL 2013. — Berlin: Springer. 2013. С. 167–178.
8. Artem Snegirev, Maria Tikhonova, Anna Maksimova, Alena Fenogenova, Alexander Abramov. The Russian-focused embedders' exploration: ruMTEB benchmark and Russian embedding model design. // arXiv.org. — 2024. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://arxiv.org/abs/2408.12503: (дата обращения: 03.02.2026).
9. Alina Kolesnikova, Yuri Kuratov, Vasily Konovalov, Mikhail Burtsev. Knowledge Distillation of Russian Language Models with Reduction of Vocabulary. // arXiv.org. — 2022. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://arxiv.org/abs/2205.02340: (дата обращения: 03.02.2026).
10. Miguel Barreda-Ángeles, Ioannis Arapakis, Xiao Bai, Xiao Bai, Alexandre Pereda-Baños. Unconscious Physiological Effects of Search Latency on Users and Their Click Behaviour. // 38th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval; Santiago, Chile. 2015. 16 с.

© Сусанин Станислав Ильич (rigel.lab@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.39

ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ НА ЭТАПЕ КОНСТРУКТОРСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

SET-THEORETIC MODEL OF THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM AT THE STAGE OF DESIGN PREPARATION OF PRODUCTION

P. Tarasov

Summary. The study is devoted to the construction of the architecture of the quality management system at the stages of the design preparation of production (DPP). The author analyzes existing solutions for the organization of quality management systems and concludes that it is necessary to create an integrated quality management system at the stages of the DPP, which solves the problem of the lack of a formalized architecture of the quality management system at the stages of the DPP, using quantitative assessments to determine the possibility of transition from one stage of the DPP to another. For this purpose, a set-theoretic model of the quality management system is being developed, which suggests quantifying the quality of the product at certain control points between the stages of the DPP to support the decision maker. A special feature of these DPP is the pairwise comparison of two quantitative indicators characterizing the actual and planned quality level at each stage of the DPP. The proposed set-theoretic model, which describes the architecture of an automated quality management system (AQMS) at the stages of the DPP. AQMS consists of quality management subsystems, within which a target quality level is set for each document submitted for examination, after which an expert assessment of the quality of engineering products is carried out according to criteria and the result of the assessment is output. In case of inconsistencies, the deviation value is calculated and sent to the developer to finalize the product. The set of assessments forms a general quantitative indicator of the product quality level at each stage, which is subsequently compared with the required one. As a result of the research, ways are proposed for further development of the proposed method, in terms of formalizing quality assessment criteria and creating a detailed decision-making algorithm in the DPP quality management system.

Keywords: design preparation of production, quality management, automated systems, AQMS.

Тарасов Павел Олегович
Аспирант, Тверской государственный технический университет
tarasoff.1998@mail.ru

Аннотация. Исследование посвящено построению архитектуры системы управления качеством на этапах КПП. Автор проводит анализ существующих решений по организации систем управления качеством и приходит к выводу о необходимости создания комплексной системы управления качеством на этапах КПП, которая позволяет решить проблему отсутствия формализованной архитектуры, использующей количественные оценки, позволяющие определить возможность перехода от одного этапа КПП к другому. Для этого разрабатывается теоретико-множественная модель в системе управления качеством, которая предлагает на определенных контрольных точках между этапами КПП проводить количественную оценку качества изделия для поддержки лица, принимающего решения. Особенностью этих контрольных точек является попарное сравнение двух количественных показателей, характеризующих фактический и планируемый уровень качества на каждом из этапов КПП. Предложенная теоретико-множественная модель (ТММ) описывает архитектуру автоматизированной системы управления качеством (АСМК) на этапах КПП. АСМК состоит из подсистем управления качеством, в рамках которых задаётся целевой уровень качества для каждого переданного на экспертизу документа, после чего осуществляется экспертная оценка качества машиностроительной продукции по критериям и вывод результата оценки. В случае наличия несоответствий рассчитывается величина отклонения и направляется разработчику для доработки изделия. Совокупность оценок формирует общий количественный показатель уровня качества изделия на каждом из этапов, который впоследствии сравнивается с требуемым. В результате исследования предлагаются пути дальнейшего развития предложенного метода, в части формализации критериев оценки качества и создании детализированного алгоритма принятия решений в системе управления качеством КПП.

Ключевые слова: конструкторская подготовка производства, управление качеством, автоматизированные системы, АСМК.

Введение

С развитием тяжелой промышленности возникают все более высокие требования к качеству машиностроительной продукции, которые усиливают роль проблемы управления качеством на всех этапах жизненного цикла. Практика промышленных предприятий показывает, что качество изделия в процессе конструкторской подготовки производства (далее КПП) непосредственно влияет на результативность производственного процесса, поскольку позволяет выявить возможные дефекты и несоответствия на ранних этапах, что

подтверждается соответствующими отраслевыми исследованиями [1]. В результате чем позднее были выявлены отклонения по качеству изделия, тем выше издержки на их устранение, что особенно актуально для КПП [2].

На фоне борьбы за повышение качества изделия на ранних этапах жизненного цикла в научной литературе последних лет усиливается тенденция на переход от локального контроля качества к сквозному цифровому управлению качеством в рамках подходов Quality 4.0, с использованием автоматизированных структур, которые дополняются «человеческим контуром», осуществляющим валидацию и интерпретацию результатов [3].

В рамках обозначенного подхода направлением развития является использование замкнутых систем управления качеством (closed-loop QMS), в которых формируются информационные петли обратной связи для принятия обязательных корректирующих решений в случае выявления отклонений от требуемого уровня качества. Closed-loop QMS в контексте подхода Quality 4.0 представляет собой информационную систему, которая описывает порядок действий и принципы обмена информацией, которые позволяют эффективно управлять качеством производства продукции [4]. При этом процесс выявления отклонений должен содержать ключевые характеристики, позволяющие провести оценку качества изделия в процессе его разработки [5].

В процессе выявления отклонений, для области инженерных проектов в машиностроении может быть предложен поэтапный контроль на базе этапов КПП в соответствии с требованиями ГОСТ 2.120-2013, включая этапы технического предложения, эскизного проекта, технического проекта и рабочей КД, что соотносится с тенденцией поэтапного контроля качества, который выражается в выполнении определенных контрольных точек (quality gates), которые позволяют управлять моделями организации процесса разработки с точки зрения их гибкости и управляемости, что особенно актуально для инженерных проектов [6], [7].

Таким образом в литературе последних лет прослеживается проблема, которая заключается в наличии устойчивого запроса на разработку автоматизированных систем управления качеством, которые в рамках подхода Quality 4.0 одновременно задают структуру контрольных точек между стадиями разработки изделия и характер данных, по которым принимается решение о возможности перехода от одной стадии к другой, обеспечивают устойчивую замкнутую обратную связь по реальному качеству изделия на основе экспертных оценок с участием лица, принимающего решения, а также позволяют формально сопоставлять плановые и фактические показатели качества при переходе от одной стадии КПП к другой. В текущем виде качество изделия на этапах КПП контролируется фрагментарно, критерии оценки остаются слабо формализованными, а решения о переходе между этапами не опираются на единый измеримый показатель и не поддерживают замкнутый контур обратной связи.

Целью настоящего исследования является разработка теоретико-множественной модели (далее ТММ) автоматизированной системы управления качеством машиностроительной продукции (далее АСМК), направленной на решение проблемы отсутствия формализованной архитектуры алгоритма управления качеством на этапах КПП, которые могли бы обеспечить количественную оценку качества результатов каждого из этапов, сопоставление планового и фактического уровня качества в контрольных точках и, по результатам оценки, формирование корректирующей обратной связи для возможности перехода к следующему этапу КПП.

Теоретико-множественная модель КПП

Функционирование АСМК возможно на основании утвержденного технического задания, с которого начинается конструкторская подготовка изделия (КПП) с этапами технического предложения (ПТ), эскизного проекта (ЭП), технического проекта (ТП) и рабочей КД (РКД). По результатам каждого из этапов КПП формируется пакет документов, который в обязательном порядке содержит пояснительную записку и ведомость для этапов ПТ, ЭП, ТП. Этап РКД в результате своего выполнения имеет комплект конструкторских документов согласно требованиям ЕСКД и техническому заданию (ТЗ), который финализирует этап КПП. При завершении каждого из этапов работ осуществляется контроль выполнения этапа, по результатам которого принимается решение о возможности перехода к следующему этапу конструкторских работ. Таким образом АСМК является системой поддержки принятия решений о возможности перехода на следующий этап разработки, где ключевым оператором системы является лицо, принимающее решение (ЛПР). На рисунке 1 представлена схема реализации АСМК для КПП.

Для того, чтобы ЛПР мог принять решение о соответствии качества изделия требованиям, введём понятие системы управления качеством КПП, которая на схеме показана литерой $S_{АСМК}$. АСМК представляет собой советующую систему, которая на основе полученных исходных требований к качеству выполнения этапов (на схеме X) и ТЗ подготавливает заключение (на схеме V), содержащее рекомендацию по возможности перехода на следующий этап КПП, а также комплект замечаний (на схеме R), полученных по результатам оценки качества КПП.

Таким образом в качестве исходных данных выступают:

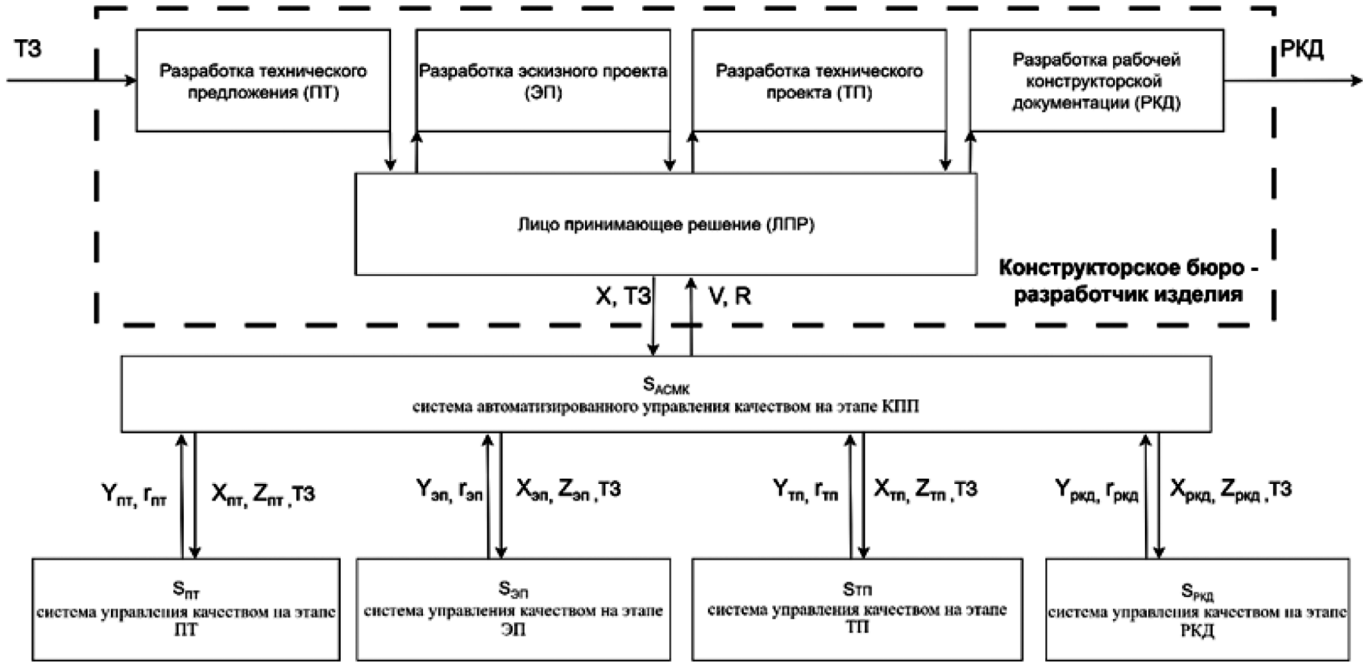


Рис. 1. Теоретико-множественная модель АСМК

1) $X_{\text{пт,эп,тп,ркд}}$ — это требование к качеству выполнения этапа, которое задаётся ЛПР в диапазоне от 0 до 100 % для каждого этапа ПТ, ЭП, ТП и РКД.
2) $Z_{\text{пт,эп,тп,ркд}}$ — это пояснительная записка и ведомость этапа, либо рабочая конструкторская документация, а также иные документы по этапам ПТ, ЭП, ТП и РКД, которые могут быть переданы на оценку на усмотрение ЛПР.
3) ТЗ — техническое задание на разработку изделия, актуальное на момент проведения оценки.

В то время как в качестве получаемых данных:

1) $R = \sum r_{\text{пт,эп,тп,ркд}}$, где $r_{\text{пт,эп,тп,ркд}}$ — замечание эксперта на каждом из этапов ПТ, ЭП, ТП и РКД, представленное в текстовом виде;
2) $V_{\text{пт,эп,тп,ркд}}$ — это заключение по каждому из этапов ПТ, ЭП, ТП и РКД, которое представляет собой текстовое сообщение о возможности перехода на следующий этап.

Далее $S_{АСМК}$ в соответствии с представленной схемой распределяет работы по подсистемам управления каждого из этапов КПП: $S_{ПТ}$, $S_{ЭП}$, $S_{ТП}$, $S_{РКД}$. При этом в качестве исходных данных формирует упомянутые выше $Z_{\text{пт,эп,тп,ркд}}$ и ТЗ, а также $X'_{\text{пт,эп,тп,ркд}} = \frac{X_{\text{пт,эп,тп,ркд}}}{100}$ — требование АСМК к качеству выполнения этапов КПП в диапазоне от 0 до 1.

В результате от каждой подсистемы $S_{ПТ}$, $S_{ЭП}$, $S_{ТП}$, $S_{РКД}$ АСМК получает замечания экспертов $r_{\text{пт,эп,тп,ркд}}$, а также $Y_{\text{пт,эп,тп,ркд}}$ — числовое значение оценки выполнения этапа в диапазоне от 0 до 1.

На основании представленного описания можно сделать вывод, что итоговое заключение V представляет собой процедуру рассуждений, которую условно можно выразить следующим образом

$$V = \Delta V \times R,$$

где $\Delta V = \left(Y_{\text{пт,эп,тп,ркд}} - X'_{\text{пт,эп,тп,ркд}}\right) * 100\%$.

Теоретико-множественная модель этапов КПП

Для управления качеством на этапах КПП (ПТ, ЭП, ТП, РКД), составлена схема, представленная на рисунке 2.

В основе предлагаемого метода лежит экспертная оценка принимаемых конструкторских решений посредством множества экспертов на каждом из этапов КПП — $E_{\text{КПП}}\left(K^m_{\text{работ}}\right)$. Помимо принадлежности к этапу КПП, эксперты распределены в соответствии со степенью их компетентности, которая позволяет им проводить оценку в соответствии с определенной группой формализованных критериев $K^m_{\text{работ}}$.

При этом $K^m_{\text{работ}}$ представляет собой группу критериев для оценки конструкторских работ, которые оцениваются в рамках АСМК.

$$K^m_{\text{работ}} = K^m_{\text{ПТ, ЭП, ТП, РКД}} \times R^m_{\text{ПТ, ЭП, ТП, РКД}},$$

где m — это порядковой номер группы критериев оценки,

— $K^m_{\text{ПТ, ЭП, ТП, РКД}}$ — критерии оценки качества на этапах КПП,

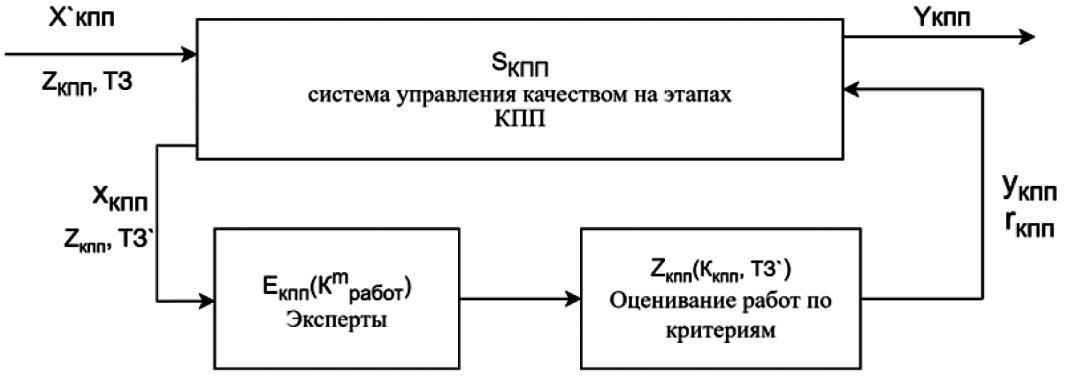


Рис. 2. система управления качеством на этапах КПП

— $R^{m}_{\text{ПТ, ЭП, ТП, РКД}}$ — критерии соответствия ТЗ на этапах КПП.

На схеме (см. рисунок 2) $S_{\text{КПП}}$ — подсистема управления качеством на этапах КПП. Для начала управления качеством необходимо определить информацию, которая будет являться исходной для оценки качества и ту информацию, которая будет получаться в итоге:

$X'_{\text{кпп}}$ — входной параметр для системы управления качеством на этапах КПП, задающий общий уровень качества изделия. Принимает значение от 0 до 1, где «0» означает отсутствие необходимости выполнения этапа КПП, а «1» необходимость выполнения всех мероприятий по качеству изделия.

Требование к качеству выполнения этапа $X'_{\text{кпп}}$ в свою очередь распределяется под требования к качеству для каждого эксперта, задействованного в КПП, что позволяет ввести значение $x_{\text{кпп}}$.

$x_{\text{кпп}}$ — множество входных параметров, которые определяют требования к качеству изделия на этапе КПП для каждого из экспертов, оценивающих свой блок работ. Принимает значение от 0 до 1, где «0» означает, что требования отсутствуют, «1» требования представлены и их необходимо выполнить.

$$X'_{\text{кпп}} \times K^{m}_{\text{работ}} \rightarrow x_{\text{кпп}}$$

По результатам оценки будет выставляться числовая оценка $y_{\text{пт}}$, которая демонстрирует результаты оценки экспертов качества выполненных работ.

$y_{\text{кпп}}$ — множество выходных параметров, определяющих фактическую оценку выполнения требований к качеству изделия на этапе КПП согласно критериям оценки. Принимает значение от 0 до 1, где «0» означает, что требование не выполняется, целевой уровень качества не достигнут, а «1» выполняется в полном объёме и с требуемым уровнем качества;

$$x_{\text{кпп}} \times \text{ТЗ}' \times E_{\text{кпп}}\left(K^{m}_{\text{работ}}\right) \times Z_{\text{кпп}} \rightarrow y_{\text{кпп}}$$

При этом прежде, чем передать на оценку эксперту, ТЗ декомпозируется на отдельные блоки оценки в соответствии с моделью компетентности экспертов, что представлено логической формулой:

$$\text{ТЗ} \times K^{m}_{\text{работ}} \rightarrow \text{ТЗ}'.$$

По результатам проведения всех оценок по критериям формируется общее значение качества $Y_{\text{кпп}}$ для этапа КПП.

$Y_{\text{кпп}}$ — выходной параметр для системы управления качеством на этапе КПП, содержащий фактический уровень качества изделия. Принимает значение от 0 до 1, где «0» означает невыполнение этапа КПП, а «1» полное выполнение мероприятий по качеству.

$$\min\left(y_{\text{кпп}}\right) \rightarrow Y_{\text{кпп}}$$

$r_{\text{кпп}}$ — множество несоответствий, содержащих указание на корректировку материалов КПП. Принимает значение от –1 до 1, где «1» означает, что замечание присутствует и необходимо организовать корректировку либо согласовать изменения в ТЗ, а «0», что требование выполнено в полном объёме и организация дополнительных работ не требуется, а «–1», что требование выполнено лучше предъявляемых требований.

$$\left(y_{\text{кпп}} - x_{\text{кпп}}\right) \rightarrow r_{\text{кпп}}$$

В результате логическая формула процесса управления представлена ниже.

$$S_{\text{КПП}} : X'_{\text{кпп}} \times Z_{\text{кпп}} \times \text{ТЗ} \rightarrow Y_{\text{кпп}}, r_{\text{кпп}}$$

Результаты и их обсуждение

По результатам исследования можно выделить следующие основные тезисы:

1) В результате исследования разработана теоретико-множественная модель управления качеством

КПП, которая позволяет формализовать процессы управления качеством на этапах КПП в виде количественной оценки качества результатов каждого из этапов с возможностью формирования корректирующей обратной связи для принятия решения о переходе к следующему этапу КПП

2) На базе предложенной ТММ может быть разработан алгоритм принятия решений, который будет описывать последовательность действий в процессе КПП, а также расширить условия, по которым будет приниматься решение о переходе на следующий этап КПП или действиях, по улучшению качества на каждом из этапов. Всё это создаёт основу для возможности встраивания в PLM-среду для автоматизации процедуры контроля качеством на этапе КПП с учётом возможной автоматизации управления жизненным циклом машиностроительной продукции.
3) В ТММ представлено множество критериев $K^{m}_{\text{работ}}$, по которым выносится оценка соответствия качества изделия техническому заданию. В настоящей ТММ не представлено подробно описание возможных критериев и групп критериев «$K^{m}_{\text{работ}}$», дальнейшие исследования должны быть направлены на их описание и параметризацию. Описание критериев должно базироваться на требованиях ЕСКД, СРПП и других документов, содержащих перечень работ на этапе КПП. Методикой формализации критериев может быть шкалирование (градуирование) критериев с последующей квантификацией в алгоритме принятия решений для выполнения требования по диапазону значения в пределах от 0 до 1.
4) В качестве практической рекомендации к реализации АСМК автор предлагает разработать специализированные критерии, которые учитывают специфику машиностроительного продукта, и наиболее частые ошибки, характерные для разработчиков предприятия изготовителя.

Выводы

В результате проведенного теоретического исследования сформирована теоретико-множественная модель (ТММ) автоматизированной системы управления качеством на этапе КПП, которая представляет собой советующую систему поддержки принятия решений для ЛПР, определяющего возможность перехода от одного этапа КПП к другому. Модель предлагает выделить процессы управления качеством в блок АСМК, который в свою очередь описан и формализован для возможности автоматизации.

Предложенное описание ТММ позволяет сформулировать направление дальнейших исследований, которое будет состоять в формализации критериев оценки качества и алгоритма принятия решений, на этапах КПП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васин С.А., Анцев В.Ю., Трушин Н.Н., Фетисов М.Н., Юрин Д.С. Анализ влияния качества проектно-конструкторских работ на результативность производственного планирования на авиастроительном предприятии // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. — 2024. — Т. 22, № 4. — С. 144–151. — DOI: 10.18503/1995–2732-2024-22-4-144-151.
2. Мовчанова М.Д., Недорезанюк А.С., Трусов В.В., Фомичев А.Б. Анализ потерь трудоемкости после корректировки эксплуатационной документации на строящемся заказе // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. Машиностроение. — 2025. — Т. 4, № 1. — С. 51–59. — DOI: 10.52899/24141437_2025_01_51.
3. Alkhatib F., Allam M., Swarnakar V., Alsadi J., Maalouf M. Implementing and evaluating the quality 4.0 PMQ framework for process monitoring in automotive manufacturing // Scientific Reports. — 2025. — Vol. 15, No. 1. — Art. 24742. — DOI: 10.1038/s41598-025-10226-4.
4. Vykydal D., Nenadál J. Closed-Loop Quality Management Systems: Are Czech Companies Ready? // Quality Innovation Prosperity. — 2022. — Vol. 26, No. 2. — P. 72–87. — DOI: 10.12776/QIP.V26I2.1710.
5. Козловский В.Н., Беляева И.А., Клентак А.С., Федоров А.В. Проектирование машиностроительной продукции с позиции управления качеством. Актуальные проблемы и их решение // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2024. — № 8. — С. 142–147.
6. Rehder A., Souza J.V., Marx R., Salerno M.S. Emerging field or passing fashion? A case study of Agile-Stage-Gate model in innovation processes // Revista de Gestão. — 2023. — Vol. 30, No. 4. — P. 362–386. — DOI: 10.1108/REGE-08-2021-0149.
7. Козловский В.Н., Беляева И.А., Антипова О.И., Гусев А.В. Обзор инструментов процессного управления качеством при проектировании новых конструкций машиностроительной продукции на примере ведущих автопроизводителей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2024. — № 7. — С. 36–42.

© Тарасов Павел Олегович (tarasoff.1998@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.40

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА И НЕЧЕТКОГО МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ В КОНТЕКСТЕ ОЦЕНКИ ОБЩЕГО ПОКАЗАТЕЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА (ГРП)

DEVELOPMENT OF A DECISION SUPPORT SYSTEM BASED ON FUZZY LOGIC INFERENCE AND THE FUZZY ANALYTIC HIERARCHY PROCESS FOR EVALUATING THE OVERALL EFFICIENCY OF HYDRAULIC FRACTURING TECHNIQUES

M. Fetaroni
Yu. Stepin

Summary. The article is devoted to the presentation of a methodology for developing a Decision Support System under conditions of fuzzy information, utilizing Fuzzy Inference Systems (FIS) and the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP). The methodology is designed to solve problems of multi-criteria evaluation and the ranking of alternatives based on a set of criteria with fuzzy input data. This methodology is applied within the context of assessing the overall performance indicator of various hydraulic fracturing (HF) techniques. The evaluation is based on a comprehensive set of HF planning efficiency criteria, some of which are expert-based (qualitative) rather than measurable (quantitative) and are thus characterized by uncertainty; consequently, the final ranking of HF techniques is both evaluative and probabilistic in nature. In this regard, the implementation of fuzzy-logic procedures for managing a complex of performance indicators was carried out based on the results of an expert assessment of three types of hydraulic fracturing across nine efficiency and risk criteria. The proposed methodology confirmed its effectiveness and precision in decision-making under conditions of uncertainty. The fuzzy-logic decision support algorithms for managing the performance indicators of HF techniques constitute a non-formalized component of integrated management systems and HF performance assurance.

Keywords: Decision Support System, fuzzy analytic hierarchy process, multi-criteria evaluation, ranking of alternatives, integrated performance indicator (risks), fuzzy inference system, hydraulic fracturing, efficiency of hydraulic fracturing techniques.

Фетарони Малак
Аспирант, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина
malakfie2@gmail.com
Стёпин Юрий Петрович
Доктор технических наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина
stepin.y@gubkin.ru

Аннотация. Статья посвящена представлению методологии разработки системы поддержки принятия решений (СППР) в условиях нечеткой информации с использованием нечеткой логики вывода (НЛВ) и нечеткого метода анализа иерархий (НМАИ). Методология представлена для решения задач многокритериальной оценки и ранжирования альтернатив по набору критериев в условиях нечетких входных данных. Данная методология применяется в контексте оценки общего показателя эффективности технологий ГРП. Оценка базируется на совокупности критериев эффективности планирования ГРП, часть из которых является экспертными (качественными), а не измеряемыми (количественными), т.е. характеризуются неопределенностью, итоговое ранжирование технологий ГРП носит оценочный и вероятностный характер. В связи с этим реализация нечетко-логических процедур по управлению комплексом показателей эффективности выполнена по результатам экспертного оценивания эффективности трех технологий ГРП по девяти критериям эффективности и рисков. Предложенная методология подтвердила свою эффективность и точность в принятии решений в условиях неопределенности. Нечетко-логические алгоритмы поддержки принятия решений по управлению комплексом показателей эффективности технологий ГРП являются неформализованной частью систем комплексного управления и обеспечения успеха ГРП.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, нечеткий метод анализа иерархий, многокритериальная оценка, ранжирование альтернатив, интегральный показатель эффективности (риски), нечеткий логический вывод, гидроразрыв пласта, эффективность технологий ГРП.

Многие задачи многокритериальной оценки и принятия решений в нефтегазовой отрасли и других сферах промышленности решаются с использованием классических методов, таких как метод анализа иерархий (МАИ) и многокритериальный метод принятия решений [1,2]. Эти методы демонстрируют высокую эффективность при условии, что все критерии являются детерминированными (измеряемыми). Однако в случаях, когда хотя бы один критерий основывается на экспертной оценке, а не на точном измерении, его значения становятся аппроксимированными и характеризуются неопределенностью. В результате итоговое ранжирование приобретает оценочный и вероятностный характер. Это обуславливает необходимость применения аппарата нечеткой логики [3] для анализа систем, в которых часть критериев представлена в виде нечетких параметров. Для решения таких задач в данной работе была разработана методология системы поддержки принятия решений (СППР), базирующаяся на нечетком логическом выводе и нечетком методе анализа иерархий. Данный подход основан на переводе всех четких критериев в нечеткие значения и применении отработанных методов теории нечетких множеств для расчета итоговой оценки альтернатив. Предложенная методология реализована в системе поддержки принятия решений экспертной процедуры оценивания общей эффективности различных видов гидравлического разрыва пласта (ГРП). Оценка интегральной эффективности технологий (видов) ГРП базируется на совокупности критериев планирования ГРП, часть из которых является качественной и определяется экспертным путем. На примере иерархической структуры критериев эффективности видов ГРП предложено использование НМАИ для определения предпочтения оценки весов. Далее применена процедура НЛВ для повышения различимости значений уровней выбранных альтернатив (видов ГРП) по каждому критерию. На основе полученного общего показателя эффективности определяется оптимальный вид ГРП. Ниже рассмотрим модели, позволяющие решить эти проблемы.

Постановка и модели решения задачи

В статье представлена методология, в которой используются процедуры нечеткой логики для обработки экспертных оценок (экспертной информации). В рамках предложенного подхода реализованы две процедуры обработки экспертной информации в условиях нечетких входных данных: нечеткий метод анализа иерархий (НМАИ), использующий численные нечеткие оценки (треугольные нечеткие числа) для определения приоритетов в матрицах парных сравнений [4,5,8,9], и метод нечеткого логического вывода (НЛВ), позволяющий эксперту оперировать лингвистическими переменными нечетких входных факторов [6,7]. На рисунке 1 представлена общая схема предложенной системы поддержки принятия решений обработки экспертной информации в условиях нечеткости входной информации.

Для обработки экспертной информации по различным группам критериев иерархии были применены процедуры НЛВ или метод НМАИ. Результаты оценки параметров модели, полученные с использованием обоих методов, агрегируются в сводные значения в виде интегрального показателя эффективности.

Нечеткий метод анализа иерархий (НМАИ)

Классический метод анализа иерархий (МАИ) [1,2] является мощным инструментом решения задач многокритериальной оценки и принятия решений, основанным на ранжировании альтернатив. В традиционном МАИ приоритеты определяются путем парных сравнений, при которых относительная важность критериев сопоставляется попарно. Однако классическая модель МАИ обладает рядом существенных недостатков [2]: метод ориентирован на задачи принятия решений, базирующиеся на детерминированной (четкой) информации; используемая шкала оценок в МАИ является несбалансированной; МАИ не учитывает неопределенность, свя-

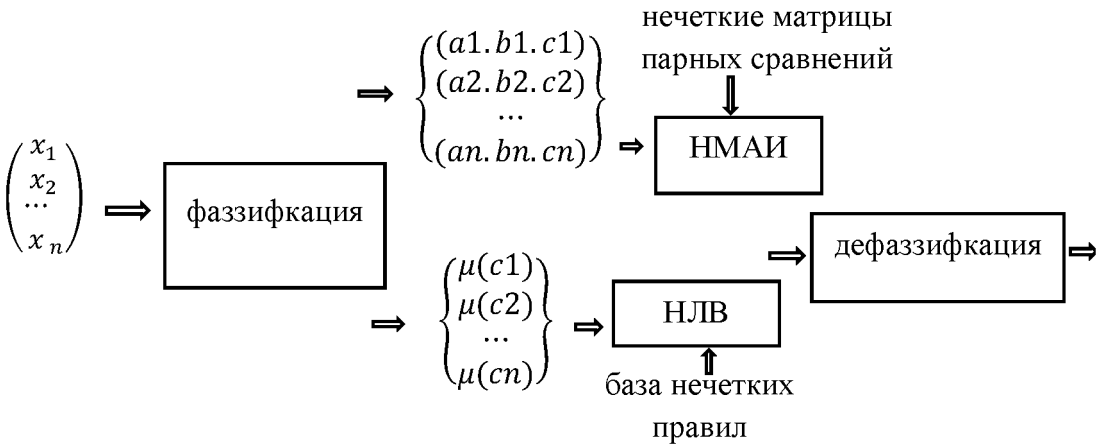


Рис. 1. Система поддержки принятия решений (СППР) в условиях нечетких входных данных
Источник: Составлено автором на основании [6]

занную с экспертной оценкой относительной важности критериев, что приводит к существенной погрешности в итоговом ранжировании исследуемых альтернатив. Для преодоления этих проблем, некоторыми исследователями было предложено интегрировать теорию нечетких множеств в метод анализа иерархий [4,8]. Подход H-МАИ складывается из трех этапов:

1. Первый этап — изучаемая система (задача) представляется в виде иерархической структуры, подразумевающей декомпозицию сложной проблемы на несколько подзадач в терминах иерархических уровней, где каждый уровень представляет собой набор критериев или атрибутов по отношению к каждой подгруппе проблемы.
2. Второй этап — использование треугольных нечетких чисел для представления элементов матриц попарного сравнения и применение балльной шкалы Т. Саати, приведенной к соответствующим нечетким числам и лингвистическим переменным [5] — таблица 1.

Таблица 1.

Шкала нечетких чисел МАИ

Лингвистическая переменная	Нечеткие числа	Треугольная нечеткая шкала (a, b, c)
одинаковая значимость	$\overset{\vee}{1}$	(1,1,3)
слабое преобладание	$\overset{\vee}{3}$	(1,3,5)
существенное преобладание	$\overset{\vee}{5}$	(3,5,7)
очевидное преобладание	$\overset{\vee}{7}$	(5,7,9)
абсолютное преобладание	$\overset{\vee}{9}$	(7,9,9)

Таким образом, нечеткие матрицы парных сравнений НМПС имеют следующий вид [8], где их элементы представлены в виде треугольных нечетких чисел (a, b,c):

$$\tilde{A} = \tilde{M}_{ij} = \begin{bmatrix} (\text{a11.b11.c11}) & (a12.b12.c12) & \cdots & \cdots & (a1n.b1n.c1n) \\ (a21.b21.c21) & (\text{a22.b22.c22}) & \cdots & \cdots & (a2n.b2n.c2n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ (\text{an1.bn1.cn1}) & (\text{an2.bn2.cn2}) & \vdots & \cdots & (\text{ann.bnn.cnn}) \end{bmatrix}$$

Где $\tilde{M}_{ij} = (aij, bij, cij)$ и обратно-симметричные элементы матрицы вычисляются по формуле: $\tilde{M}_{ij}^{-1} = \left(\frac{1}{cij}.\frac{1}{bij}.\frac{1}{aij}\right) i.j = 1.2.\cdots.n.i \neq j$

3. Третий этап — получение весов (приоритетов) критериев и альтернатив. В методе H-МАИ существует несколько процедур для определения весов, наиболее распространенными из которых являются: нечеткий метод наименьших квадратов [9], метод геометрического среднего [8] и метод анализа экстента (расширения) [4,5] и другие. В данном исследовании используется метод анализа экстента (нечеткого синтеза), который объясняется в следующих шагах [4,5].

Шаг 1: Рассчитайте сумму каждой строки в соответствующей матрице Ã, а затем объедините суммы строк выше, используя нечеткие арифметические операции.

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^{m} \tilde{M}_{ij} \otimes \left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} \tilde{M}_{ij}\right]^{-1}$$

где $i = 1, 2, \ldots, n$; $\otimes$ — расширенное умножение двух нечетких чисел.

$$\left(\sum_{j=1}^{m} a_j.\sum_{j=1}^{m} b_j.\sum_{j=1}^{m} c_j\right) \otimes \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^{n} c_i}.\frac{1}{\sum_{i=1}^{n} b_i}.\frac{1}{\sum_{i=1}^{n} a_i}\right)$$

Шаг 2: Рассчитайте вероятность (степень возможности) того, что $\overset{\vee}{Si} \geq \tilde{S}j$; $i, j = 1, 2, \ldots, n$, $i = j$, используя уравнение $\text{Vi}\left(\tilde{S}i \geq \tilde{S}j\right) = \begin{cases} 1 & bi \geq bj \\ \dfrac{\text{aj} - \text{ci}}{(bi - ci) - (bj - aj)} & aj \leq ci \end{cases}$

Шаг 3: вычисляют степень вероятности (возможности) того, что лучше всех других нечетких чисел: $(\tilde{S}_i \geq \tilde{S}_j | j = 1.\cdots.n; j \neq i| = min\,\text{Vi}\left(\tilde{S}i \geq \tilde{S}j\right).i = 1\cdots n$

Шаг 4: Вектор веса получается по следующей формуле: $W_i = \dfrac{\left(\tilde{S}_i \geq \tilde{S}_j | j = 1.\cdots.n; j \neq i|\right)}{\sum_{i=n}^{n}\left(\tilde{S}_i \geq \tilde{S}_j | j = 1.\cdots.n; j \neq i|\right)}$

Метод нечеткого логического вывода (НЛВ): В случаях, когда эксперт не может четко определить приоритеты, альтернативой методу НМАИ выступает аппарат нечеткого логического вывода, который позволяет экспертам оперировать лингвистическими переменными, такими как, «Низкий», «Средний», «Высокий». Формализация модели нечеткого логического вывода Мамдани (МНЛВ), следующий [6,7]:

1. Субъективная оценка степени принадлежности элемента x к нечеткому множеству A определяется функцией принадлежности входных факторов, которая в общем виде записывается следующим образом:

$$\mu_A(x) : x \to [0.1]$$

2. Формируются нечеткие правила, устанавливающие логическую взаимосвязь между заданными входными переменными $x = (x_1.x_2.\cdots.x_n)$ и выходным параметром Y в следующем виде:

$$\text{Если}\left(x_1 = a_1^{j1} \wedge x_2 = a_2^{j1} \cdots \wedge x_n = a_n^{j1}\right)$$

$$\text{с весом } w_{1j} \text{ или}\left(x_1 = a_1^{jkj} \wedge x_2 = a_2^{jkj} \cdots \wedge x_n = a_n^{jkj}\right)$$

$$\text{с весом } w_{kj.j} \text{ то } y = d_j$$

Где a_i^{jp} — нечеткий терм, которым оценивается лингвистическая входная переменная X_i в строке с номером *jp* (p= 1…,k_j); k_j— количество строк-конъюнкций, в которых выход лингвистическая выходная переменная Y оценивается термом d_j; m — количество термов, используемых для выходной лингвистической переменной Y.

3. Степень принадлежности рассчитывается по формулам:

$$\mu_{dj}(y) = \vee p = \overline{1.k_j} w_{pj} \cdot \vee i = \overline{1.n}\left(\mu_{ip}(x_i)\right)$$

Где $\mu_{ip}(x_i)$ и $\mu_{dj}(y)$ — функции принадлежности входа X_i и выхода Y нечеткому терму.

4. Четкое значение выходного параметра определяется в результате дефаззификации по методу центра тяжести: $y = \dfrac{\int \mu_A(y) \cdot y dy}{\int \mu_A(y) dy}$

Постановка задачи: Согласно различным оценкам [10,11], в последние годы наблюдается резкое сокращение добычи нефти и газа, что обуславливает необходимость внедрения современных методов, включая гидравлический разрыв пласта (ГРП), который является одним из наиболее эффективных и распространенных способов интенсификации добычи. Однако, ввиду высокой стоимости реализации, технологической сложности и разнообразия видов ГРП, различающихся объемами закачиваемой жидкости и проппанта, а также геометрией создаваемых трещин, и, следовательно, уровнями эффективности и рисков, крайне важны тщательное планирование и выбор оптимального вида ГРП, обеспечивающего максимальную эффективность при минимальных затратах и рисках. Одним из путей снижения издержек и повышения производительности является определение общей эффективности различных видов ГРП с учетом сопутствующих рисков еще на этапе планирования для выбора наиболее подходящего варианта. Следовательно, задача заключается в разработке неформальных процедур оценки общей эффективности видов ГРП на основе экспертных заключений. Экспертная оценка общей эффективности видов ГРП начинается с выбора единичных критериев. На основе анализа условий, моделей и видов ГРП был сформирован перечень критериев эффективности планирования ГРП (многокритериальная оценка эффективности и рисков) [11,12], представленный в таблице 2. Некоторые из этих критериев носят вероятностный характер, в то время как другие оцениваются экспертно, что обуславливает их определенную неопределенность.

Таблица 2.

Критерии оценки эффективности и рисков видов гидроразрыва пласта

B_1. Экономические показатели	B_3. Экологические показатели
C_1. Уровень капиталовложений (млн рублей/год)	C_6. Уровень воздействия объекта на литосферу (отходы) (% примесей)
C_2. Чистая текущая стоимость — ЧТС (NPV) (млн рублей/год)	C_7. Уровень воздействия объекта на гидросферу (сбросы) (% примесей)
B_2. технологические показатели	B_4. Социальные показатели
C_3. Прирост добычи нефти (раз.год)	C_8. Уровень производственного травматизма (случ. /год)
C_4. темп обводнения (Обводненность) (вероятность в %)	C_9. Уровень воздействия на организм человека химических веществ (случ. /год)
C_5. Наведенная (или индуцированная) сейсмичность (сколько раз.год)	

В связи с этим были реализованы процедуры нечеткой логики (НМАИ, НЛВ) для управления показателями общей эффективности на основе результатов экспертной оценки эффективности трех технологий ГРП [12] (традиционный гидроразрыв пласта ГРП; глубокопроникающий гидроразрыв пласта ГГРП; многостадийный гидроразрыв пласта МГРП), применяемых в настоящее время, по девяти единичным критериям, объединенным в четыре группы: экономические, технологические, экологические и социальные.

Реализация нечетко-логических инструментов (НМАИ, НЛВ) для принятия решений в контексте оценки показателя общей эффективности видов гидравлического разрыва пласта

Методика НМАИ: применяем процедуру нечеткого метода анализа иерархий (НМАИ) для оценки эффективности трех технологий гидравлического разрыва пласта (ГРП (D1); ГГРП (D2); МГРП (D3)) на основе набора критериев, представленных в таблице 2. Для решения этой задачи можно построить следующую иерархическую структуру на рисунке 2.

Согласно иерархии на рисунке 2, эксперт перемещается по уровням структуры от корня A к терминальным вершинам D_1, D_2 и D_3, выполняя вычислительные процедуры, которые состоят в составлении нечетких матриц парных сравнений (НМПС) и матриц весов с последующим проведением над ними следующих вычислений.

Уровень 2: формирует нечеткую матрицу парных сравнений (НМПС) видов (групп) критериев друг относи-

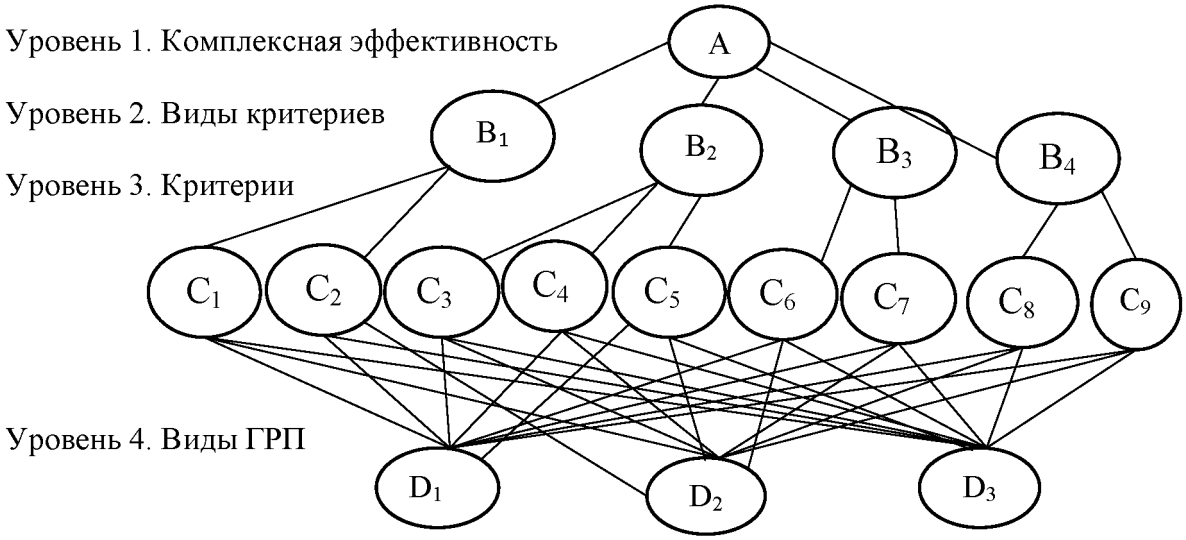


Рис. 2. Иерархическая структура по оценки эффективности видовГРП.

Источник: Составлено автором на основании [6]

Таблица 3.

Нечеткая матрица парных сравнений видов критериев

A	B1A			B2A			B3A			B4A			W_i
AB1	1	1	3	1	1	3	1	3	5	3	5	7	0.325
AB2	1	1	3	1	1	3	1	3	5	3	5	7	0.325
AB3	0.2	0.33	1	0.2	0.33	1	1	1	3	1	3	5	0.223
AB4	0.142	0.2	0.33	0.142	0.2	0.33	0.2	0.33	1	1	1	3	0.116

тельно друга и по отношению к главной цели А в соответствии со шкалой, представленной в таблице 3.

В этой таблице W_i — представляет собой элементы вектора весов и вычисляется с применением шагов метода анализа экстента.

Шаг 1: $\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^{4} \tilde{M}_{ij} \otimes \left[\sum_{i=1}^{4} \sum_{j=1}^{4} \tilde{M}_{ij} \right]^{-1}$

Виды критериев	$\sum_{j=1}^{4} M_{ij}$	$\left[\sum_{i=1}^{4} \sum_{J=1}^{4} M_{ij} \right]^{-1}$	S
B1	(6, 10, 18)	(1/50.66, 1/26.39, 1/15.884)	0.118, 0.378, 1.133
B2	(6, 10, 18)	(1/50.66, 1/26.39, 1/15.884)	0.118, 0.378, 1.133
B3	(2.4, 4.66, 10)	(1/50.66, 1/26.39, 1/15.884)	0.047, 0.176, 0.629
B4	(1.484, 1.73, 4.66)	(1/50.66, 1/26.39, 1/15.884)	0.029, 0.065, 0.293

Шаг 2: V (SB1 ≥ SB2) = 1; V (SB1 ≥ SB3) = 1; V (SB1 ≥ SB4) =1;

V (SB2 ≥ SB1) = 1**;** V (SB2 ≥ SB3) = 1; V (SB2 ≥ SB4) =1;

V (SB3 ≥ SB1) = 0.716; V (SB3 ≥ SB2) =0.716; V (SB3 ≥ SB4) = 1;

V (SB4 ≥ SB1) = 0.358; V (SB4 ≥ SB2) = 0.358; V (SB4 ≥ SB3) = 0.689;

Шаг 3: (*SB*1 ≥ *SB*2, *SB*3, *SB*4) = min (1, 1, 1) = 1; *V*(SB2 ≥ *SB*1, *SB*3, *SB*4) = min (1,1,1) = 1

V (SB3 ≥ *SB*1, *SB*2, *SB*4) = min (0.716, 0.716, 1) = 0,716; (*SB*4 ≥ *SB*1, *SB*2, *SB*3) = min (0.358, 0.358, 0.689) = 0.358

Нечеткий весовой вектор видов критериев $\tilde{W}$ = (1, 1, 0.716, 0.358)

Шаг 4: затем вектор весов нормализуется, и определяются приоритеты весов для каждого критерия W= (0.325, 0.325,0.233, 0.116)

Уровень 3: далее, в соответствии с видами критериев создаются четыре НМПС. На основе полученных векторов весов составляется результирующая матрица весов, которая умножается на вектор весов видов критериев, в результате чего получаем следующий агрегированный вектор весов:

W_i = (0.195, 0,130, 0.141, 0.141, 0.042, 0.173, 0.057,0.046, 0.069)

Таблица 4.

Результаты оценки весов технологий ГРП с использованием НМАИ

	Веса общей эффективности относительно критерия									Вес эффективности вид ГРП
критерий	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	
средний вес Wi	0.195	0.130	0.141	0.141	0.042	0.173	0.057	0.046	0.069	
ГРП	0.225	0.225	0.225	0.434	0.375	0.468	0.469	0.333	0.468	0.338
ГГРП	0.225	0.225	0.225	0.434	0.375	0.345	0.397	0.333	0.345	0.304
МГРП	0.591	0.591	0.591	0.201	0.294	0.210	0.291	0.333	0.210	0.401

Уровень 4: на этом уровне иерархии составляются 9 нечетких матриц сравнений технологий ГРП D_i относительно каждого критерия C_i. В итоге получаем итоговый вектор весов для технологий (видов) ГРП в соответствии со всеми критериями (рис. 2), как показано в таблице 4.

Методика НЛВ

Применение методологии НЛВ к совокупности индивидуальных критериев эффективности и рисков (c1,...,c9), представленных в таблице 2, для оценки интегрального показателя эффективности трех технологий (видов) гидравлического разрыва пласта (ГРП, ГГРП, МГРП). Предполагается, что входные факторы (девять критериев) и выходной параметр (общий индекс эффективности для каждого вида ГРП) являются нечеткими и определяются с использованием трехуровневых нечетких термов: «низкий» (L), «средний» (M) и «высокий» (H). Функция принадлежности для нечетких термов задается в виде треугольной функции**,** в которой треугольные нечеткие числа (a,b,c) определяются эмпирическим способом.

База знаний логических правил для оценки общего индекса эффективности видов ГРП сформирована по 9 индивидуальным критериям на основе экспертных оценок. Общее число правил в полном факторном эксперименте равно 3^9 =19683, что является чрезмерно большим числом; однако на основе экспертного анализа и с учетом входных факторов было выделено 27 ключевых правил, некоторые из которых перечислены ниже.

Если уровень капиталовложений низкий, то эффективность низкая.

Если уровень капиталовложений высокий, то эффективность высокая.

Если уровень капиталовложений средний, то эффективность средняя.

Если Уровень воздействия на человека средний, то эффективность средняя.

Если Уровень воздействия на человека низкий, то эффективность высокая.

Количественная оценка веса общего индекса эффективности для каждой технологии ГРП Y проводится с использованием процедуры дефаззификации лингвистической переменной $\overset{\vee}{Y}$ по алгоритму Мамдани. Для проведения процедуры дефаззификации был использован метод центра тяжести (центроидный метод). Реализация модели нечеткого вывода для оценки критериев эффективности трех видов ГРП выполнена в среде MATLAB с использованием пакета Fuzzy Logic Toolbox.

В результате расчетов в среде MATLAB на основе НЛВ получены следующие средние значения весов общей эффективности для каждого из трех технологий ГРП, которые представлены в таблице 5.

Основные результаты

1. На основании весов, полученных с помощью НМАИ, можно сделать вывод, что технология многостадийного гидравлического разрыва пласта

Таблица 5.

Результаты оценки весов технологий ГРП с использованием НЛВ

	Значения единичных критериев эффективности									показатель эффективности вида ГРП
виды ГРП	C 1 млн руб./год	C2 млн руб./год	C3 раз./год	C4 %	C5 раз.год	C6 %	C7 %	C8 случ. /год	C9 случ. /год	
ГРП	107	120	2.5	25	1	10	8	2	1	0.351
ГГРП	120	130	2.5	31	1	15	10	2	2	0.311
МГРП	260	270	6	50	3	30	17	2	4	0.452

является наилучшей по показателям эффективности и риска, так как она получила наивысший приоритет. Следовательно, она признана оптимальным вариантом для реализации в условиях нечетких данных.

2. Результаты, полученные с использованием методики НЛВ, сопоставимы с результатами НМАИ. В данном случае МГРП также занимает наивысшую позицию в итоговом рейтинге по общему показателю эффективности.

Таким образом, предложенная нечеткая методология позволяет устранить проблему неопределенности и нечеткости, которые являются неотъемлемой частью исходной информации о сложных многофакторных системах, таких как системы ГРП. Это обусловлено невозможностью четкого определения приоритетов экспертом в условиях нечетких данных.

Заключение

Исследование подтвердило эффективность разработанной методологии поддержки принятия решений на основе нечеткой логики при решении критически важных задач в условиях неопределенности. В частности, предложенный подход позволил получить обоснованные результаты при оценке интегральной эффективности технологий ГРП с учетом сопутствующих рисков. Разработанный инструментарий может быть адаптирован для решения широкого круга многокритериальных задач, характеризующихся нечеткостью и неполнотой исходной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. — М.: Радио и связь, 1993. — 278 с.
2. Степин Ю.П. Компьютерная поддержка формирования, многокритериального ранжирования и оптимизации управленческих решений в нефтегазовой отрасли / Ю.П. Степин. — М.: Недра, 2016. — 421 с.
3. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. — М.: Мир, 1976. — 167 с.
4. Chang D.Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP // European Journal of Operational Research. — 1996. — V. 95. — № 3. — P. 649–655.
5. Фам Ван Ты. Применение нечеткого метода анализа иерархий к методу анализа видов и последствий отказов // Computational nanotechnology. — 2021. — Т. 8, № 2. — С. 29–36.
6. Григорьева Д.Р., Гареева Г.А. Нечеткая логика: учеб.-метод. пособие. ЧИ КФУ, 2019.
7. Fazlollahtabar H., Eslami H., Salmani H. Designing a fuzzy expert system to evaluate alternatives in fuzzy analytic hierarchy process // Journal of Software Engineering and Applications. — 2010. — Vol. 3, № 4. — P. 409–418.
8. Лю Хуань. Метод нечёткого анализа иерархий для выбора сайта электронной коммерции / Лю Хуань // Вестник БГУ. Сер. 1. — 2014. — № 3. — С. 89–93.
9. Xu R. Fuzzy least square priority method in the analytic hierarchy process // Fuzzy Sets and Systems. — 2000. — Vol. 112, № 3. — P. 395–404.
10. Эдер Л.В., Филимонова И.В., Проворная И.В., Немов В.Ю. Основные проблемы инновационного развития нефтегазовой отрасли в области добычи нефти и газа // Бурение и нефть. — 2016. — № 4. — С. 16–23.
11. Батыров М.И. Техника и технология проведения ГРП на ем-ёговской площади красноленинского месторождения / М.И. Батыров // Отраслевые научные и прикладные исследования: Науки о земле. — 2020. — С. 75–81.
12. Силин М.А., Магадова Л.А., Глущенко В.Н. Технологические аспекты и материалы для гидроразрыва пласта / М.А. Силин, Л.А. Магадова В.Н. Глущенко // 2012. — 422 с.

© Фетарони Малак (malakfie2@gmail.com); Стёпин Юрий Петрович (stepin.y@gubkin.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.41

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА (ГРП)

ADAPTIVE DECISION SUPPORT SYSTEM FOR OPTIMIZING THE ORGANIZATION OF HYDRAULIC FRACTURING (HF)

M. Fetaroni
Yu. Stepin

Summary. This paper develops an adaptive decision support system (DSS) based on fuzzy inference rules that considers the results of forecasting the behavior of hydraulic fracturing objects under uncertainty and risk. The article demonstrates that the system is fundamentally based on solving two optimization problems using Markov random processes (the method of mean dynamics) and the Mamdani fuzzy inference algorithm. The main objective of the system is to use Markov random processes to describe the dynamics of the hydraulic fracturing (HF) process, followed by the application of the fuzzy inference algorithm to adjust the transition rates based on the predictive results. This ensures the formation of an accurate knowledge base, allowing the system to make correct decisions for automatic resource balancing and achieving operational optimization under uncertainty. The proposed adaptive fuzzy decision support system provides a comprehensive framework for optimizing the organization of the complex hydraulic fracturing process, increasing operational reliability, and reducing risks under uncertainty.

Keywords: Adaptive Decision Support System, forecasting of random processes, method of mean dynamics, Mamdani fuzzy inference algorithm, hydraulic fracturing, optimization of hydraulic fracturing process organization, uncertainty and risks, operational reliability.

Фетарони Малак
Аспирант, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина
malakfie2@gmail.com
Стёпин Юрий Петрович
доктор технических наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина
stepin.y@gubkin.ru

Аннотация. Разработана адаптивная система поддержки принятия решений (СППР) на основе правил нечеткого логического вывода, учитывающая результаты прогнозирования поведения объектов гидроразрыва пласта (ГРП) в условиях неопределенности и рисков. В статье показано, что система в своей основе опирается на решение двух задач оптимизации с использованием марковских случайных процессов (метода динамики средних) и алгоритма нечеткого вывода Мамдани. Основная задача системы заключается в использовании марковских случайных процессов для описания динамики процесса ГРП с последующим применением алгоритма нечеткого вывода для настройки интенсивностей переходов на основе результатов прогнозирования. Это обеспечивает формирование точной базы знаний, позволяющей системе принимать верные решения для автоматической балансировки ресурсов и достижения эксплуатационной оптимизации в условиях неопределенности. Предложенная адаптивная нечеткая система поддержки принятия решений обеспечивает комплексную основу для оптимизации организации сложного процесса гидроразрыва пласта (ГРП), повышения эксплуатационной надежности и снижения рисков в условиях неопределенности.

Ключевые слова: адаптивная система поддержки принятия решений, прогнозирование случайных процессов, метод динамики средних, алгоритм нечеткого вывода Мамдани, гидроразрыв пласта, Оптимизация организации процессов ГРП, неопределенность и риски, эксплуатационная надежность.

В последнее время развивается «неклассический» подход в теории управления и принятия решения. Он связан с применением алгоритмов на основе нечеткой логики, нейронных сетей и генетических алгоритмов, сценарных методов и т. д. Кроме того, широко используется ситуационное управление на основе иерархических моделей с нечеткими параметрами; модели и алгоритмы принятия решений для защиты информации на основе методов искусственного интеллекта [1]. Использование результатов моделирования и прогнозирования хода случайных процессов, описывающих поведение, — важный этап в процессе принятия решений для повышения их эффективности и снижения вероятности появления неверных решений. Именно поэтому актуальным является не только исследование, в какой степени результаты прогнозирования влияют на оценку альтернативных решений, но и разработка адаптивной системы поддержки принятия решений (СППР) на основе результатов прогнозирования случайных процессов [2]. Для эффективного принятия решений при неопределенности условий функционирования системы применяют методы на основе правил нечеткой логики.

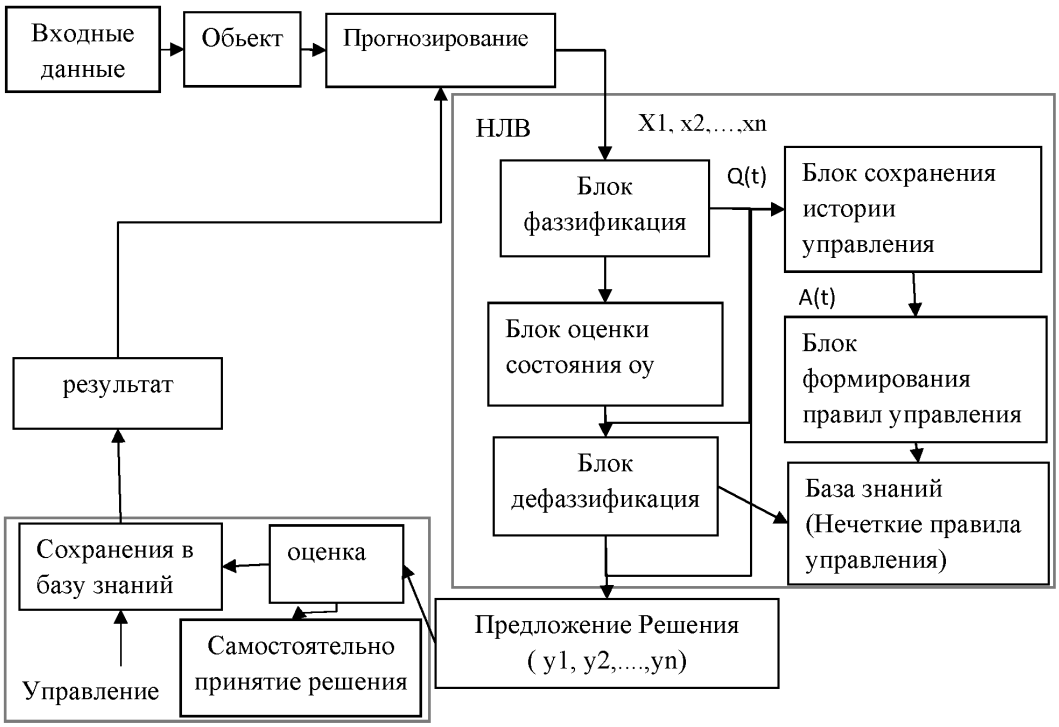


Рис. 1. Структурная схема адаптивной СППР на основе нечеткого логического вывода

Источник: Составлено автором на основании [2, 3]

На рисунке 1 представлена общая структурная схема адаптивной системы поддержки принятия решений на основе нечеткой логики.

В данной статье рассмотрим модель адаптивной системы поддержки принятия решений в контексте оптимизации организации процессов ГРП

Постановка и модели решения задач

В данном исследовании для разработки адаптивной системы поддержки принятия решений на основе результатов прогнозирования случайных процессов с целью оптимизации организации ГРП будут сформулированы и решены две задачи:

- Задача моделирования функционирования гидроразрыва пласта (ГРП), а именно описание динамики данного процесса с использованием случайных марковских процессов (метод динамики средних) [4,5,6,9].
- Задача оптимизации процесса ГРП на основе результатов прогнозирования случайных процессов для адаптивной корректировки интенсивностей переходов с целью автоматической ребалансировки системы и достижения оптимума в условиях неопределенности с использованием нечеткого логического вывода [2,3].

Задача Компьютерная поддержка принятия решений при моделировании работы систем ГРП на основе метода динамики средних.

Сегодня с помощью метода динамики средних описаны примеры функционирования больших информационно-вычислительных систем [6], систем организации боевых действий, процессов технического обслуживания и ремонта (ТОР) оборудования, геофизических исследований скважин (ГИС) [4, 7], процессов бурения, а также процессов ГРП. При моделировании подобных систем возникает необходимость описания одновременной работы нескольких её частей, в частности, при проведении гидравлического разрыва пласта (ГРП) — это работа объектов процесса ГРП (скважины, насосные агрегаты, смесительные установки и др.), рабочих бригад и материально-технических ресурсов (автоцистерны, кабели, технологические жидкости, проппант и др.), которые будем называть структурно-образующими элементами системы ГРП [8].

С учетом работ [4, 7, 9], динамика функционирования системы ГРП может быть описана векторным случайным процессом $X(t)$ с зависимыми состояниями: $X(t)= \{X_1(t), X_2(t), X_3(t), X_4(t), X_5(t)\}$,

Где $X_1(t)$ — случайный процесс, описывающий работу объектов очистки скважины перед гидравлическим разрывом пласта (скважины, насосы и др.).

$X_2(t)$ — случайный процесс, описывающий работу объектов ГРП (скважины, насосные агрегаты, пескосмесительные агрегаты и др.).

$X_3(t)$ — случайный процесс, описывающий работу бригад во время реализации процесса ГРП (бригад, которые выполняют операции ГРП).

$X_4(t)$ — случайный процесс, описывающий функционирование нерасходуемых МТР (станций контроля, транспортной техники, и т.д.);

$X_5(t)$ — случайный процесс, описывающий функционирование расходуемых МТР (технологические жидкостей, проппанты, и т.д.).

Предполагаем, что каждая из составляющих процесса ГРП $X(t)$ представляет собой однородное разложение случайного процесса [4]:

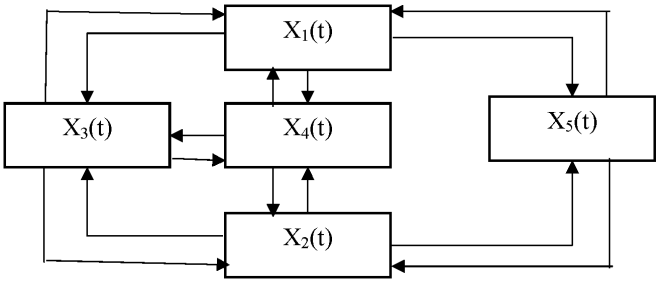
$$x_i(t) = \sum_{k=1}^{n} S_k^i(t)$$

где $S_k^{(i)}$ ($k=1,2,...,n$) — процесс прохождения определенного множества состояний одной единицы составляющей процесса ГРП

$$s_k^i = \left\{ s_0^i. \quad s_1^i.\cdots.s_n^i \right\}$$

Все процессы являются одинаковыми элементарными процессами.

Предположим далее, что скважины, бригады и МТР внутри каждой из групп функционируют независимо и статистически однородно. В связи с этим представим процесс $x_i(t)$ в виде однородного канонического разложения. Покажем, что взаимодействие компонентов процесса ГРП $x(t)$ является транзитивным [4] и описывается следующим графом:

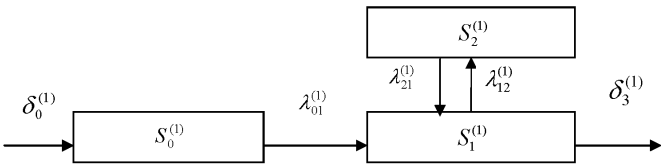


Действительно, интенсивность проведения ГРП, приходящаяся на единицу производственного объекта (с учетом предварительной очистки скважины), определяется, с одной стороны, числом объектов, требующих проведения работ, а с другой — количеством имеющихся бригад и производительностью их работы. Таким образом, в контексте реализации технологического процесса, $X_3(t)$ управляет процессами $X_1(t)$ и $X_2(t)$. С другой стороны, интенсивность вызова бригад также зависит от количества объектов, нуждающихся в ГРП, и количества доступных бригад; следовательно, в плане формирования потребности в работах, процессы $X_1(t)$ и $X_2(t)$ управляют процессом $X_3(t)$. Аналогичные рассуждения применимы к взаимодействиям пар ($X_1(t)$, $X_4(t)$) и ($X_1(t)$, $X_5(t)$) (особенности связи $X_3(t)$ и $X_4(t)$ изложены ниже). Принимая принцип линейного взаимодействия между процессами $X_i(t)$, характерный для метода динамики средних [10], рассмотрим подробнее состояния каждого процесса и интенсивности переходов, типичные для практической организации ГРП.

Опираясь на принятые выше обозначения, проанализируем в первую очередь объекты очистки (скважины): $S_1 = \{s_0^{(1)}, s_1^{(1)}, s_2^{(1)}\}$

Где $S_0^{(1)}$— единица объекта (скважина) ожидает процесса очистки; $S_1^{(1)}$ — ведется очистки скважины;$S_2^{(1)}$— Операция по очистке скважины не удалась и ведётся ремонт.

Граф состояний и переходов для элементарной единицы объекта обслуживания имеет следующий вид:



$\delta_0^{(1)}$ — интенсивность поступления требований на очистке одной скважины.$\delta_0^{(1)} = a_1 = const$.

$\lambda_{01}^{(1)}$ — интенсивность потока принятия на очистке. имеет следующим вид: $\lambda_{01}^{(1)} = a_2\left(m_{s_0^{(3)}} / m_{s_0^{(1)}} \right)$.

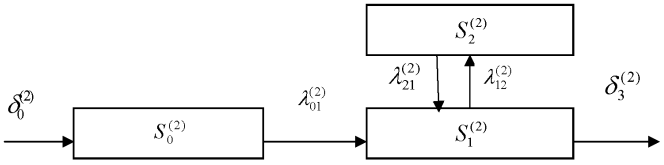
$\delta_3^{(1)}$ — интенсивность очистки одной скважины. $\delta_3^{(1)} = a_2\left(m_{s_2^{(3)}} / m_{s_1^{(1)}} \right)$. Где $a_2 = const$ — производительность работы одной бригады.

$\lambda_{12}^{(1)}$ — интенсивность потока вследствие сбоя в работе операции по очистке скважины. $\lambda_{12}^{(1)} = a_3 = const$

$\lambda_{21}^{(1)}$— интенсивность потока восстановления процесса очистки. $\lambda_{21}^{(1)} = a_1^{(1)}\left(m_{s_2^{(3)}} / m_{s_2^{(1)}} \right)$. $a_1^{(1)}$ — производительность одной бригады по устранению неисправностей для возобновления очистки.

$m_{s_0^{(3)}}, m_{s_0^{(1)}}, m_{s_2^{(3)}}, m_{s_1^{(1)}}, m_{s_2^{(1)}}$— средние численности состояний. a_1, a_2, a_3 (данные параметры берутся СППР либо задаются руководителем).

Граф состояний и переходов для объектов ГРП (скважины) имеет следующий вид:



$S_0^{(2)}$— единица объекта (скважина) ожидает процесса ГРП; $S_1^{(2)}$ — ведется процесс по ГРП; $S_2^{(2)}$— операция по ГРП скважины не удалась и ведётся ремонт.

$\delta_0^{(2)}$ — интенсивность поступления на процессе гидроразрыв пласта ГРП на одной скважине, $\delta_0^{(2)} = \delta_3^{(1)}$.

$\lambda_{01}^{(2)}$ — интенсивность потока принятия на ГРП. $\lambda_{01}^{(2)} = a_2\left(m_{s_0^{(3)}} / m_{s_0^{(2)}} \right)$.

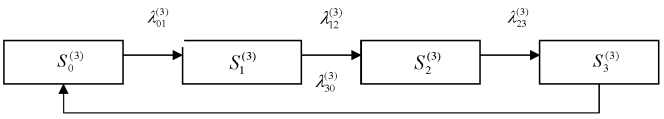
$\delta_3^{(2)}$— интенсивность ГРП одной скважины. $\delta_3^{(2)} = a_2\left(m_{s_2^{(3)}} / m_{s_1^{(2)}} \right)$

$\lambda_{12}^{(2)}$ — интенсивность потока вследствие сбоя в работе операции по ГРП. $\lambda_{12}^{(2)} = a_4 = const$. (она берется СППР либо задаются руководителем).

$\lambda_{21}^{(2)}$— интенсивность потока восстановления процесса ГРП. $\lambda_{21}^{(2)} = a_1^{(2)}\left(m_{s_2^{(3)}} / m_{s_2^{(2)}} \right)$. $a_1^{(2)}$ — производительность одной бригады по устранению неисправностей для возобновления процесса ГРП;

$m_{s_0^{(2)}}, m_{s_1^{(2)}}, m_{s_2^{(2)}}$ — средние численности состояний.

Для бригады ГРП размеченный граф состояний имеет вид:



На этом графе $S_0^{(3)}$— бригада на базе и ожидает вызова ; $S_1^{(3)}$ — бригада выезжает с базы на объект; $S_2^{(3)}$— бригада выполняет ГРП и очистки , а также проводит ремонтные работы в случае неисправностей и отказов; $S_3^{(3)}$— бригада возвращается с объекта на базу.

$\lambda_{01}^{(3)}$ — интенсивность вызова на ГРП. $\lambda_{01}^{(3)} = a_1\left(m_{s_0^{(1)}} / m_{s_0^{(3)}} \right)$. где a_1=*const* — интенсивность поступления на ГРП одной единицы объекта;

$\lambda_{12}^{(3)}$ — интенсивность потока бригады, направляющихся к объекта: $\lambda_{12}^{(3)} = 1 / \tilde{t}_{12}^{(3)}$, где $\tilde{t}_{12}^{(3)}$ — среднее время переезда бригады с базы на объект ГРП:

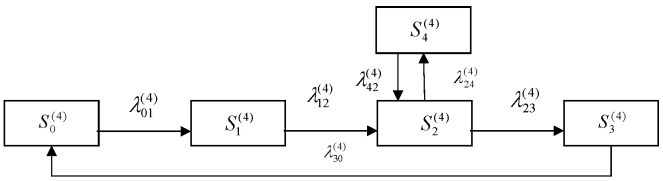
$$\overset{\vee}{t}{}_{12}^{(3)} = \left(t_{12}^{(3)1} + \cdots + t_{12}^{(3)j} + \cdots + t_{12}^{(3)n} \right) / n$$

где $t_{12}^{(3)\ j}$ — Время переноса от базы к j-объекту, n — число объектов.

$\lambda_{23}^{(3)}$ — интенсивность потока ГРП. $\lambda_{23}^{(3)} = a_2 = const$ — это средняя производительность работы одной бригады.

$\lambda_{30}^{(3)}$ — интенсивность потока бригады, направляющихся к базу, $\lambda_{12}^{(3)} = \lambda_{30}^{(3)}$.

Для единицы не расходуемого МТР граф состояний имеет вид:



$S_0^{(4)}$ — единица МТР на базе и не используется; $S_1^{(4)}$— единица МТР вместе с бригадой получила вызов и направляется на объект; $S_2^{(4)}$— с использованием единицы МТР выполняется ГРП; $S_3^{(4)}$— единица МТР возвращается на базу; $S_3^{(4)}$— единица МТР выведена из строя и находится на ремонте.

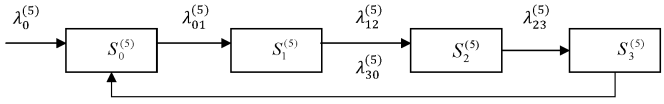
$\lambda_{01}^{(4)}$— интенсивность вызова единица МТР на ГРП. $\lambda_{01}^{(4)} = a_1\left(m_{s_0^{(1)}} / m_{s_0^{(4)}} \right)$

Далее $\lambda_{12}^{(4)}$, $\lambda_{23}^{(4)}$, $\lambda_{30}^{(4)}$ и имеют тот же значение что и $\lambda_{01}^{(3)}, \lambda_{12}^{(3)}, \lambda_{23}^{(3)}, \lambda_{30}^{(3)}$ и т.е. $\lambda_{12}^{(3)} = \lambda_{12}^{(4)}, \lambda_{23}^{(3)} = \lambda_{23}^{(4)}, \lambda_{30}^{(3)} = \lambda_{30}^{(4)}$ при условии, что на одно ГРП требуется одна единица МТР.

$\lambda_{24}^{(4)}$— интенсивность потока отказов единица МТР. $\lambda_{24}^{(4)} = a_5 = const$ (этот параметр берется СППР либо задаются руководителем).

$\lambda_{42}^{(4)}$ — интенсивность потока восстановления МТР. $\lambda_{42}^{(4)} = a_1^{(4)}\left(m_{s_2^{(3)}} / m_{s_4^{(4)}} \right)$. Где $m_{s_2^{(2)}}$— Среднее количество МТР выведена из строя и находится на ремонте; $a_1^{(4)}$ — Производительность одной бригады по ремонту МТР.

Для единицы расходуемого МТР граф состояний имеет вид:



$S_0^{(5)}$ — единица расходуемого МТР на базе; $S_1^{(5)}$— единица МТР перемещается на объект; $S_2^{(5)}$— единица МТР участвует в ГРП. $S_3^{(5)}$— единица МТР списана или требуется другая единица МТР.

$\delta_0^{(5)}$ — интенсивность пополнения запаса расходуемого МТР;

$\lambda_{01}^{(5)}$ — интенсивность вызова единица МТР на ГРП. $\lambda_{01}^{(5)} = \lambda_{01}^{(4)}$;

$\lambda_{12}^{(5)}$ — интенсивность транспортирования расходуемого МТР на объект: ; $\lambda_{23}^{(5)}$— производительность одной бригады при использовании единицы МТР: $\lambda_{23}^{(5)} = \lambda_{23}^{(4)}$.

$\lambda_{30}^{(5)}$— интенсивности Возврат на базу, когда потребуется другая единица МТР: $\lambda_{30}^{(5)} = \lambda_{30}^{(4)}$.

На основе представленных графов СППР формирует систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику средних значений состояний процесса:

Объекты очистки (X_1):

$$\frac{dm_{s_0^{(1)}}}{d(t)} = \delta_0^{(1)} - \lambda_{01}^{(1)} m_{s_0^{(1)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_1^{(1)}}}{d(t)} = \lambda_{01}^{(1)} m_{s_0^{(1)}} + \lambda_{21}^{(1)} m_{s_2^1} - \delta_3^{(1)} m_{s_1^{(1)}} - \lambda_{12}^{(1)} m_{s_1^{(1)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_2^{(1)}}}{d(t)} = \lambda_{12}^{(1)} m_{s_1^{(1)}} - \lambda_{21}^{(1)} m_{s_2^{(1)}} = 0;$$

$$N_{S^{(1)}} = m_{s_0^{(1)}} + m_{s_1^{(1)}} + m_{s_2^{(1)}} + \delta_0^{(1)} N_{S^{(1)}} - \delta_3^{(1)} m_{s_1^{(1)}}.$$

Объекты ГРП (X_2):

$$\frac{dm_{s_0^{(2)}}}{d(t)} = \delta_0^{(2)} - \lambda_{01}^{(2)} m_{s_0^{(2)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_1^{(2)}}}{d(t)} = \lambda_{01}^{(2)} m_{s_0^{(2)}} + \lambda_{21}^{(2)} m_{s_2^{(2)}} - \delta_3^{(2)} m_{s_1^{(2)}} - \lambda_{12}^{(2)} m_{s_1^{(2)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_2^{(2)}}}{d(t)} = \lambda_{12}^{(2)} m_{s_1^{(2)}} - \lambda_{21}^{(2)} m_{s_2^{(2)}} = 0;$$

$$N_{S^{(2)}} = m_{s_0^{(2)}} + m_{s_1^{(2)}} + m_{s_2^{(2)}} + \delta_0^{(2)} N_{S^{(2)}} - \delta_3^{(2)} m_{s_1^{(2)}}.$$

Для Бригады (X_3) :

$$\frac{dm_{s_0^{(3)}}}{d(t)} = \lambda_{01}^{(3)} m_{s_0^{(3)}} - \lambda_{12}^{(3)} m_{s_1^{(3)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_1^{(3)}}}{d(t)} = \lambda_{12}^{(3)} m_{s_1^{(3)}} - \lambda_{23}^{(3)} m_{s_2^{(3)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_2^{(3)}}}{d(t)} = \lambda_{23}^{(3)} m_{s_2^{(3)}} - \lambda_{30}^{(3)} m_{s_3^{(3)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_3^{(3)}}}{d(t)} = \lambda_{30}^{(3)} m_{s_3^{(3)}} - \lambda_{01}^{(3)} m_{s_0^{(3)}} = 0;$$

$$N_{S^{(3)}} = m_{s_0^{(3)}} + m_{s_1^{(3)}} + m_{s_2^{(3)}} + m_{s_3^{(3)}}$$

Для Нерасходуемого МТР (X_4):

$$\frac{dm_{s_0^{(4)}}}{d(t)} = \lambda_{30}^{(4)} m_{s_3^{(4)}} - \lambda_{01}^{(4)} m_{s_0^{(4)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_1^{(4)}}}{d(t)} = \lambda_{01}^{(4)} m_{s_0^{(4)}} - \lambda_{12}^{(4)} m_{s_1^{(4)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_2^{(4)}}}{d(t)} = \lambda_{12}^{(4)} m_{s_1^{(4)}} + \lambda_{42}^{(4)} m_{s_4^{(4)}} - \lambda_{23}^{(4)} m_{s_2^{(4)}} - \lambda_{24}^{(4)} m_{s_2^{(4)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_3^{(4)}}}{d(t)} = \lambda_{23}^{(4)} m_{s_2^{(4)}} - \lambda_{30}^{(4)} m_{s_3^{(4)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_4^{(4)}}}{d(t)} = \lambda_{24}^{(4)} m_{s_2^{(4)}} - \lambda_{42}^{(4)} m_{s_4^{(4)}} = 0;$$

$$N_{S^{(4)}} = m_{s_0^{(4)}} + m_{s_1^{(4)}} + m_{s_2^{(4)}} + m_{s_3^{(4)}} + m_{s_3^{(4)}} + m_{s_4^{(4)}}$$

Для расходуемого МТР (X_5)

$$\frac{dm_{s_0^{(5)}}}{d(t)} = \delta_0^{(5)} - \lambda_{01}^{(5)} m_{s_0^{(5)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_1^{(5)}}}{d(t)} = \lambda_{01}^{(5)} m_{s_0^{(5)}} - \lambda_{12}^{(5)} m_{s_1^{(5)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_2^{(5)}}}{d(t)} = \lambda_{12}^{(5)} m_{s_1^{(5)}} - \lambda_{23}^{(5)} m_{s_2^{(5)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_3^{(5)}}}{d(t)} = \lambda_{23}^{(5)} m_{s_2^{(5)}} - \lambda_{30}^{(5)} m_{s_3^{(5)}} = 0;$$

$$N_{S^{(5)}} = m_{s_0^{(5)}} + m_{s_1^{(5)}} + m_{s_2^{(5)}} + \delta_0^{(5)} N_{S^{(5)}} + m_{s_3^{(5)}}$$

Путём интегрирования данной системы дифференциальных уравнений выбранным численным методом (определяемым руководителем или системой автоматически) СППР определяет все необходимые численности состояний элементов системы гидроразрыва пласта и показатели эффективности её функционирования.

Задача оптимизации процесса ГРП с использованием нечеткого логического вывода:

В случайных процессах, описывающих динамику ГРП, значения коэффициентов (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5), определяющих интенсивность переходов, обычно задаются руководителем или извлекаются из СППР. Зачастую эти значения являются неточными, что приводит к прогнозам, далеким от реальности, и, как следствие, к принятию ошибочных управленческих решений. Задача оптимизации, в которой критерий оптимальности заключается в нахождении оптимальных соотношений значений коэффициентов (a_1,...,a_5), определяющих интенсивности переходов, а ограничениями являются линейные уравнения (динамики средних), полученных выше. В работах [10, 9] при оптимизации функционирования систем ГИС, TOR и бурения, смоделированных с помощью марковских процессов (метод динамики средних), критерий оптимальности зависит от нахождения оптимальных соотношений значений a_1,..., a_n с использованием алгоритма, основанного на методе дихотомии, (или применении чисел «Фибоначчи»). Однако, поскольку марковские процессы, описывающие динамику ГРП, учитывают риски (отказы и неисправности), количество варьируемых коэффициентов существенно возрастает. Это делает применение классических алгоритмов затруднительным и недостаточно точным; кроме того, такие алгоритмы зачастую требуют ручного расчета. Для решения данной проблемы предлагается использование модели нечеткого вывода Мамдани. В этой модели результаты расчета марковских процессов (среднее число состояний) используются в качестве входных переменных. На основе базы нечетких правил система адаптирует значения коэффициентов и, следовательно, интенсивностей переходов в зависимости от фактического эксплуатационного состояния системы. В результате формируется адаптивная СППР, которая оптимизирует процесс ГРП в режиме реального времени без прямого участия человека. На рисунке 2 представлена предлагаемая адаптивная система поддержки принятия решений для оптимизации функционирования процесса ГРП. В таблице 1 показаны входы и выходы модели нечеткого *логического* вывода.

Предположим, что входы (средние численности состояний $m_{s_0^{(1)}}$,..., $m_{s_0^{(5)}}$) определяются трехуровневыми нечеткими термами: низкий (L), средний (M), высокий (H). Функцию принадлежности нечетким термам определим в виде триангулярной функции.

База нечетких правил для определения значений коэффициентов (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) на основе результатов прогнозирования случайных процессов (средней численности состояний) построена на основе экспертной оценки (руководителя). Основные нечеткие правила для определения значений коэффициентов представлены в виде трехуровневого классификатора: снижение (D), номинальное значение (N), увеличение (I).

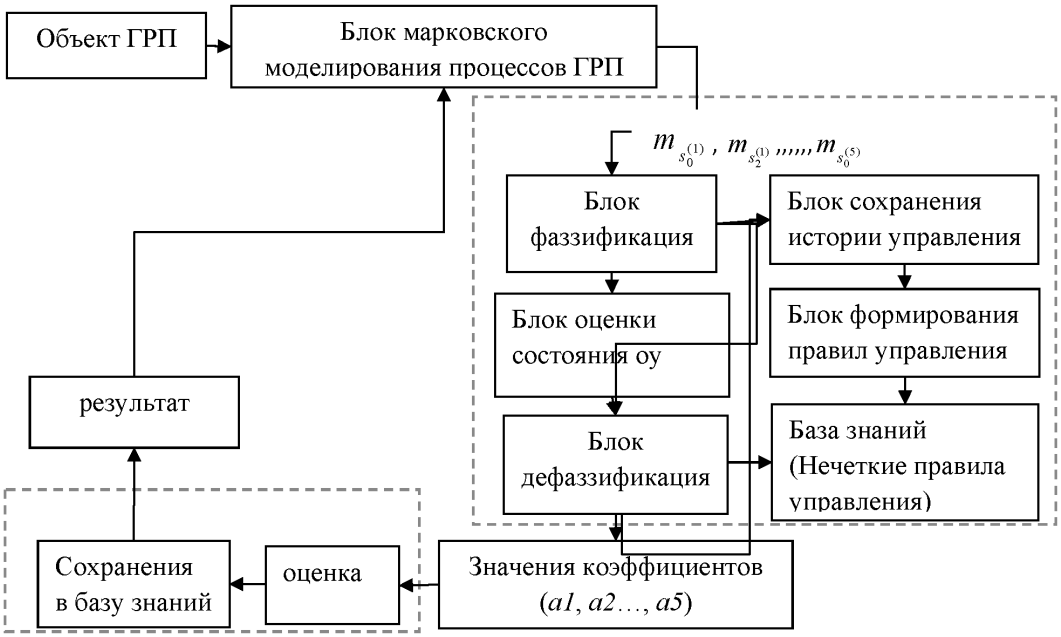


Рис. 2. Структурная схема адаптивной СППР для оптимизации функционирования ГРП.
Источник: Составлено автором на основании [2]

Таблица 1

Входы и выходы модели логического нечеткого вывода

Вход	Описание	Выход	Описание
$m_{s_0^{(1)}}$	число скважин, ожидающих очистки	a_1	интенсивность поступления на ГРП
$m_{s_2^{(1)}}$	число отказов очистки	a_2	производительность работы одной бригады
$m_{s_0^{(2)}}$	число скважин, ожидающих ГРП	a_3	интенсивность отказов очистки
$m_{s_1^{(2)}}$	число скважин в ГРП	a_4	интенсивность отказов ГРП
$m_{s_2^{(2)}}$	число отказов ГРП	a_5	интенсивность отказов не расходуемого МТР
$m_{s_0^{(3)}}$	число доступных бригад		
$m_{s_2^{(3)}}$	число работающих бригад		
$m_{s_0^{(4)}}$	число доступного не расходуемого МТР		
$m_{s_4^{(4)}}$	число отказов не расходуемого МТР		
$m_{s_0^{(5)}}$	число доступного расходуемого МТР		

Источник: Составлено автором на основании [9]

- **Правил для a_1**: *(Если* $m_{s_0^{(1)}} = H$ *и* $m_{s_0^{(3)}} = L$, *то* $a_1 = D$; *Если* $m_{s_0^{(1)}} = M$ *и* $m_{s_0^{(3)}} = M$, *то* $a_1 = N$; *Если* $m_{s_0^{(1)}} = L$ *и* $m_{s_0^{(3)}} = H$, *то* $a_1 = I$ *).*
- **Правил для a_2**: (*Если* $m_{s_0^{(3)}} = H$ *и* $m_{s_0^{(4)}} = H$ *и* $m_{s_0^{(5)}} = H$, *то* $a_2 = I$; *Если* $m_{s_2^{(3)}} = H$ *и* $m_{s_2^{(2)}} = H$ *и* $m_{s_0^{(5)}} = H$, *то* $a_2 = N$; *Если* $m_{s_2^{(3)}} = H$ *и* $m_{s_2^{(2)}} = L$, *то* $a_2 = D$).
- **Правил для a_3**: (*Если* $m_{s_2^{(1)}} = H$, *то* $a_3 = I$; *Если* $m_{s_0^{(1)}} = H$ *и* $m_{s_0^{(3)}} = L$, *то* $a_3 = I$; *Если* $m_{s_2^{(1)}} = L$ *и* $m_{s_0^{(4)}} = M$ *и* $m_{s_0^{(5)}} = M$, *то* $a_3 = D$).
- **Правил для a_4**: (*Если* $m_{s_2^{(2)}} = H$, *то* $a_4 = I$; *Если* $m_{s_1^{(2)}} = H$ *и* $m_{s_0^{(4)}} = L$, *то* $a_4 = I$; *Если* $m_{s_2^{(2)}} = L$ *и* $m_{s_2^{(3)}} = M$, *то* $a_4 = D$).
- ***Правил для a_5*:** (*Если* $m_{s_4^{(4)}} = H$, *то* $a_5 = I$; *Если число* $m_{s_0^{(4)}} = H$ *и* $m_{s_0^{(5)}} = L$, *то* $a_4 = I$; *Если* $m_{s_4^{(4)}} = L$ *и* $m_{s_0^{(5)}} = M$, *то* $a_4 = D$).

Для процедуры дефаззификации использовался метод центра тяжести, который является наиболее распространенным и определяется следующим соотношением:

$$\dot{a}_i = \frac{\int \mu_A(a_i) \cdot a_i da}{\int \mu_A(a_i) \cdot da}$$

После процедуры дефаззификации определяются конкретные значения коэффициентов, корректирующих интенсивности переходов. Это приводит к оптимизации функционирования процесса ГРП в режиме реального времени.

Основные результаты

Предложенная адаптивная система поддержки принятия решений, сочетающая в себе непрерывные во времени марковские случайные процессы и алгоритм нечеткого логического вывода Мамдани, представляет собой интегрированную основу для оптимизации организации и управления сложными операциями ГРП, повышения эксплуатационной надежности и снижения рисков в условиях неопределенности и сложных взаимодействий между структурными элементами системы ГРП (процессами, бригадами и ресурсами). Были определены наиболее важные аспекты, рассматриваемые предложенными моделями:

1. Принятие решения основывается на количественных выходах (средние численности состояний Маркова) и структурированном нечетком логическом выводе (нечеткие правила) для корректировки значений коэффициентов (a_1, a_2,....,a_5), а не на индивидуальном опыте или применении чисел «Фибоначчи».
2. Адаптация решений к фактическому состоянию системы путем динамической корректировки интенсивности переходов в марковской модели (метод динамики средних) не только обеспечивает соответствие оперативной реальности, но и значительно повышает технологическую стабильность процесса ГРП.
3. Повышение непрерывности обслуживания (т.е., увеличение надежности) за счет достижения оптимального баланса между спросом, ресурсами и производительностью бригад.
4. Снижение рисков за счет адаптивного управления интенсивностью отказов.
5. Эти модели могут быть использованы для разработки адаптивных систем поддержки принятия решений в различных отраслях, особенно в технологически сложных, с целью повышения эффективности и устойчивости производственных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочарников В. П. Fuzzy-технология: Математические основы. Практика моделирования в экономике / В. П. Бочарников. — Санкт-Петербург : Наука РАН, 2001. — 328 с.
2. Адаптивная система поддержки принятия решений на основе нечеткого логического вывода / Р. Н. Кветный [и др.] // Наукові праці ВНТУ. — 2011. — № 3. — 10 с.
3. Степин, Ю. П. Адаптивная система поддержки принятия решений для разработки месторождений на арктическом шельфе / Ю. П. Степин, Н. С. Рыжов // Тезисы докладов 76-й Международной молодежной научной конференции. — Москва, 2022. — Т. 2. — С. 238–239.
4. Тараканов К. В. Аналитические методы исследования систем / К. В. Тараканов, Л. А. Овчаров, А. Н. Тырышкин. — М. : Сов. радио, 1974. — 240 с.
5. Вентцель Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. — М.: Наука, 1991. — 384 с.
6. Коган Б. М. Вероятностные модели информационно-вычислительных сетей на основе динамики средних / Б. М. Коган, А. Ф. Короганов // Автоматика и телемеханика. — 1970. — № 1. — С. 100–110.
7. Старосельский В. А. К вопросу об оптимизации некоторых систем массового обслуживания / В. А. Старосельский // Кибернетика.— 1967. — № 3. — С. 47–52.
8. Силин М. А. Технологические аспекты и материалы для гидр разрыва пласта / М. А. Силин, Л. А. Магадова, В. Н. Глущенко. — М., 2012. — 422 с.
9. Степин Ю. П., Компьютерные методы поддержки принятия управленческих решений в нефтегазовой промышленности / Э. А. Трахтенгерц, Ю. П. Степин, А. Ф. Андреев. — М. : СИНТЕГ, 2005. — 592 с.
10. Овчаров, Л. А. Математическая модель функционирования систем обслуживания нефтегазового производства / Л. А. Овчаров, Ю. П. Степин, Э. Ю. Есипова // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 1994. — № 8. — С. 23–26.

© Фетарони Малак (malakfie2@gmail.com); Стёпин Юрий Петрович (stepin.y@gubkin.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.44

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ОБЪЕМНОЙ ПОДАЧИ В FDM 3D-ПЕЧАТИ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРА ФИЛАМЕНТА

AUTOMATIC VOLUME CONTROL IN FDM 3D PRINTING BASED ON OPTICAL MEASUREMENT OF THE DIAMETER OF THE FILAMENT

S. Shemelyunas
A. Yakovlev

Summary. The article discusses the problem of automatic regulation of volumetric material supply in FDM 3D printing technology based on data from contactless optical measurement of the diameter of the filament. It is shown that the use of open-loop control based on nominal diameter leads to the accumulation of feed errors due to fluctuations in the geometric parameters of the material and the presence of time delays in the extrusion system. A mathematical model of the filament supply system has been developed that takes into account the delay between the measuring and extrusion zones, as well as the inertia of the melting zone. Based on the model, a predictive correction PI controller has been synthesized to compensate for volume flow deviations in real time. Implemented a software module integrated into the Klipper firmware that performs dynamic feed correction. The results of modeling and experimental verification showed a reduction in the error of volumetric feed and an improvement in the quality of printed products, including compensation for overextrusion and underextrusion.

Keywords: FDM printing, volumetric material supply, automatic control, PI controller, predictive correction, filament diameter, optical measurement, technical vision, mathematical model, control system, delay compensation, extrusion.

Шемелюнас Сергей Сергеевич
Преподаватель, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Волгоградский государственный технический университет
sergey.shemelyunas@bk.ru
Яковлев Алексей Андреевич
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Волгоградский государственный технический университет
yaa_777@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается задача автоматического регулирования объёмной подачи материала в технологии FDM 3D-печати на основе данных бесконтактного оптического измерения диаметра филамента. Показано, что использование разомкнутого управления, основанного на номинальном диаметре, приводит к накоплению ошибки подачи вследствие флуктуаций геометрических параметров материала и наличия временных задержек в системе экструзии. Разработана математическая модель системы подачи филамента, учитывающая запаздывание между зоной измерения и экструзии, а также инерционность зоны плавления. На основе модели синтезирован ПИ-регулятор с предиктивной коррекцией, обеспечивающий компенсацию отклонений объёмного расхода в реальном времени. Реализован программный модуль, интегрируемый в прошивку Klipper, выполняющий динамическую коррекцию подачи. Результаты моделирования и экспериментальной проверки показали снижение ошибки объёмной подачи и улучшение качества печатных изделий, включая компенсацию переэкструзии и недоэкструзии.

Ключевые слова: FDM-печать, объёмная подача материала, автоматическое регулирование, ПИ-регулятор, предиктивная коррекция, диаметр филамента, оптическое измерение, техническое зрение, математическая модель, система управления, компенсация запаздывания, экструзия.

Введение

Технология FDM широко применяется в прототипировании и мелкосерийном производстве, однако качество изделий в значительной степени определяется стабильностью объёмной подачи расплавленного материала [1], [2], [3].

В ранее выполненных исследованиях разработан оптический датчик на базе ESP32-CAM, обеспечивающий бесконтактное измерение диаметра, скорости подачи и наличия филамента перед входом в нагревательный блок [4], [5], [6]. Однако такое расположение датчика приводит к возникновению пространственной и временной задержки между моментом измерения и выходом расплава из сопла. Дополнительные задержки обусловлены буферизацией управляющих команд и инерционностью зоны плавления.

В большинстве серийных FDM-принтеров подача материала осуществляется в разомкнутом режиме по номинальному диаметру, что не позволяет компенсировать отклонения объёмного расхода даже при наличии измерений.

Таким образом, для стабилизации подачи требуется разработка математической модели системы с учётом запаздывания и инерционности процесса, а также синтез регулятора, компенсирующего возмущения на основе данных оптического датчика [7], [8], [9].

Математическая модель системы подачи филамента

Разработанный ранее оптический датчик на базе модуля ESP32-CAM осуществляет бесконтактное сканирование филамента в тракте его подачи перед входом в нагревательный блок экструдера. В процессе работы формируется последовательность кадров, содержащих изображение поперечного профиля прутка. Ниже представлена последовательность обработки изображения филамента(рисунок 1).

Обработка последовательности кадров позволяет сформировать измеряемые величины, используемые в системе регулирования. На основе анализа бинарной маски определяется: наличие филамента в зоне контроля, текущий диаметр прутка $D(t)$ и линейная скорость его перемещения $v(t)$, которые используются для расчёта фактической объёмной подачи материала и последующего формирования управляющего воздействия.

Мгновенный объемный расход $V(t)$ подаваемого филамента определяется из скорости его движения $v(t)$ и диаметра $D(t)$:

$$\dot{V}_{\text{in}}(t) = \pi \cdot \left(\frac{D(t)}{2} \right)^2 \cdot v(t), \tag{1}$$

где $\dot{V}_{\text{in}}(t)$ — объёмный расход филамента (мм^3/с) равный первой производной по времени от суммарного объёма подачи $V(t)$.

Измерение параметров филамента осуществляется до его попадания в механизм подачи. Коррекция подачи филамента осуществляется с задержкой

$$\tau_{total} = \tau_{path} + \tau_{proc} + \tau_{MCU}, \tag{2}$$

где τ_{path} — время прохождения материала от камеры до зоны плавления; τ_{proc} — задержка обработки изображения; τ_{MCU} — задержка выполнения управляющих команд из-за буфера команд в плате управления принтера.

В результате выполнения этого шага формируется управляющее воздействие на привод экструдера с учётом прогноза объемной подачи $\dot{V}_{target}(t + \tau_{total})$.

Реальный выход материала из сопла определяется не только текущей скоростью подачи филамента, но и накопленной массой расплава в зоне плавления, обладающей выраженной инерционностью. Это обусловлено конечной ёмкостью зоны плавления и ограниченной скоростью теплопередачи в процессе плавления филамента. Динамика этой зоны аппроксимирована моделью звена первого порядка:

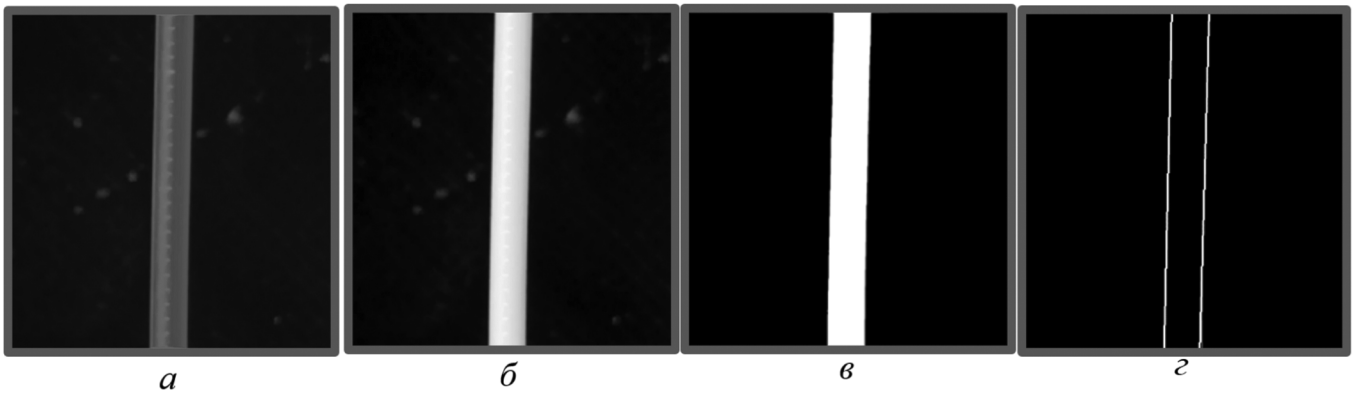
$$\tau_m \cdot \frac{dM(t)}{dt} + M(t) = \int_{t-\tau_{total}}^{t-\tau_{total}+\Delta t} \dot{V}_{in}(\xi) d\xi, \tag{3}$$

где $M(t)$ — масса филамента в зоне плавления, τ_m — инерционная характеристика экструдера, учитывающая время плавления филамента в нем, Δt — временной интервал (период измерения), ξ — пороговое значение допустимой ошибки объемной подачи материала.

Также необходимо вычислить реальный выходной расход материала $\dot{V}_{out}(t)$ из сопла. Этот объем пропорционален текущей массе материала $M(t)$ в зоне плавления:

$$\dot{V}_{out}(t) = \frac{M(t)}{\tau_m} \tag{4}$$

При измерении необходимо учитывать ретракты при печати (обратное движение филамента, $v(t)<0$). Для этого входной объём вычитается из массы в зоне плавления,



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Последовательность обработки изображения филамента: *а* — исходный кадр, *б* — оттенки серого, *в* — пороговая сегментация и морфологическая фильтрация (бинарная маска), *г* — детектирование контуров
Источник: Составлено автором на основании выполненной работы

процесс восстановления объема после ретракта также подчиняется динамике τ_m. Таким образом, интегральный баланс массы материала $M(t)$ в зоне плавления:

$$M(t) = M(t_0) + \int_{t_0}^{t} \left[\dot{V}_{in}(\xi - \tau_{total}) - \dot{V}_{out}(\xi) \right] d\xi, \quad (5)$$

где $M(t_0)$ — начальная масса материала в зоне плавления.

Тогда можно сформировать оценку отклонения реального объема от заданного в каждый момент времени:

$$\Delta V(t) = V_{target}(t) - \int_{t_0}^{t} \dot{V}_{out}(\xi) d\xi, \quad (6)$$

где $\Delta V(t)$ — ошибка подачи материала (разность между заданным и фактическим объемом подаваемого материала).

При превышении заданного порога ξ, формируется корректирующее воздействие на привод экструдера, передаваемое с учётом запаздывания τ_{total}.

Синтез системы автоматического регулирования

Разработан замкнутый контур управления подачей филамента в 3D принтере на основе синтезированного регулятора, обеспечивающего коррекцию подачи материала в реальном времени [9]. При этом особое внимание уделено наличию совокупного запаздывания, характерного для FDM-печати, и построена структурная схема с элементами предиктивной компенсации (рис. 2).

Объектом управления является двигатель подачи филамента. Управляющим воздействием является изменение скорости подачи филамента. Задающим воздействием является программно-заданный объёмный расход филамента в G-code.

Для хранения измеренных параметров филамента используется буфер задержки, обеспечивающий обработку данных с учётом прогнозируемого запаздывания τ. [10], [11] Управляющее воздействие $u(t)$ регулятора с предиктивной коррекцией рассчитывается по формуле:

$$u(t) = K_p \cdot e(t + \tau) + K_i \cdot \int_{0}^{t+\tau} e(\xi) d\xi, \quad (7)$$

где $e(t + \tau)$ — значение ошибки регулирования, определяемое на основе прогноза — через τ секунд.

Программная реализация регулятора

Разработан программный модуль коррекции объёмной подачи *filament_diameter_control.py*, интегрированный в host-часть прошивки *Klipper* (*klippy*) на уровне обработки команд G0/G1 между модулями *klippy/extras/gcode_move.py* и *klippy/toolhead.py*. После разбора команды и формирования параметров движения в gcode_move.py управление передаётся в модуль коррекции, который изменяет только экструзионную составляющую (E) без влияния на геометрию перемещения [12].

В качестве управляемой величины используется коэффициент *extrusion_multiplier*, динамически обновляемый на основе измеренного диаметра филамента с учётом буфера запаздывания. Скорректированные параметры передаются в toolhead.py и далее в *extruder.py*. При этом не изменяются параметры *rotation_distance*, алгоритмы планирования ускорений и механизм *pressure advance*, что обеспечивает минимальное вмешательство в архитектуру прошивки и совместимость с существующими настройками [12] Тогда управляющее воздействие $u(t)$ интерпретируется как корректировка целевой скорости экструдера:

$$v_{cmd}(t) = v_{gcode}(t) + u(t), \quad (8)$$

где $v_{gcode}(t)$ — заданная скорость подачи, $v_{cmd}(t)$ — скорректированная скорость.

Рис. 2. Структурная схема разработанного регулятора

Источник: Составлено автором на основании выполненной работы

Моделирование работы системы

Проведено моделирование работы программного модуля с целью установки коэффициентов регулирования. На вход модуля подаётся реальный G-code печати изделия, на основе которого формируется заданная скорость подачи филамента. Моделирование выполнялось при следующих параметрах: период дискретизации T_s = 0,03 с; суммарное запаздывание системы подачи τ_{total} = 0,25 с; постоянная времени зоны плавления τ_m = 0,35 с; номинальный диаметр филамента D_{nom} = 1,75 мм.

Для моделирования использовались следующие сценарии флуктуаций диаметра: ступенчатое изменение диаметра с отклонением ΔD = 0,12 мм; синусоидальное изменение диаметра с амплитудой A_{sin} = 0,05 мм и периодом T_{sin} = 50 с; случайные флуктуации диаметра. Моделирование позволило установить следующие коэффициенты регулятора: K_p = 0,03; K_i = 0,002.

Экспериментальная проверка

Для проведения экспериментальных исследований работы регулятора разработана установка. На рис. 3 приведены ее структура и внешний вид.

Экспериментальная установка включает в себя оптический модуль (рис. 3, поз. 1) на базе ESP32-CAM, фиксирующий изображение филамента (поз. 2) в режиме реального времени. Данные изображения передаются на компьютер (поз. 3), где выполняется обработка с использованием алгоритмов компьютерного зрения. Филамент, проходя через разработанный датчик, поступает в механизм подачи (поз. 4), закреплённый на корпусе экспериментального стенда (поз. 5). Затем филамент попадает в экструдер (поз. 6). Управление механизмом подачи и нагревом осуществляется с помощью платы управления 3D-принтером (поз. 7).

Количественная оценка точности измерения диаметра филамента определена путем сравнения с референсными измерениями, выполненными электронным микрометром. Данная оценка проведена на основе экспериментальных данных для филаментов различных материалов и цветов. В табл. 1 приведены результаты оценки.

Полученные результаты показали, что для филаментов ABS и PETG погрешность измерения диаметра разработанным датчиком не превышает 0,01 мм, что точнее допустимых отклонений диаметра. Для полиамида с наполнителем (PA6 + стекловолокно) погрешность выше из-за особенностей поверхности материала. При этом среднее значение измеренного диаметра соответствует референсному, а система обеспечивает корректное определение его распределения по длине прутка.

Выполнено моделирование работы регулятора в режиме реального времени при печати. На вход системы

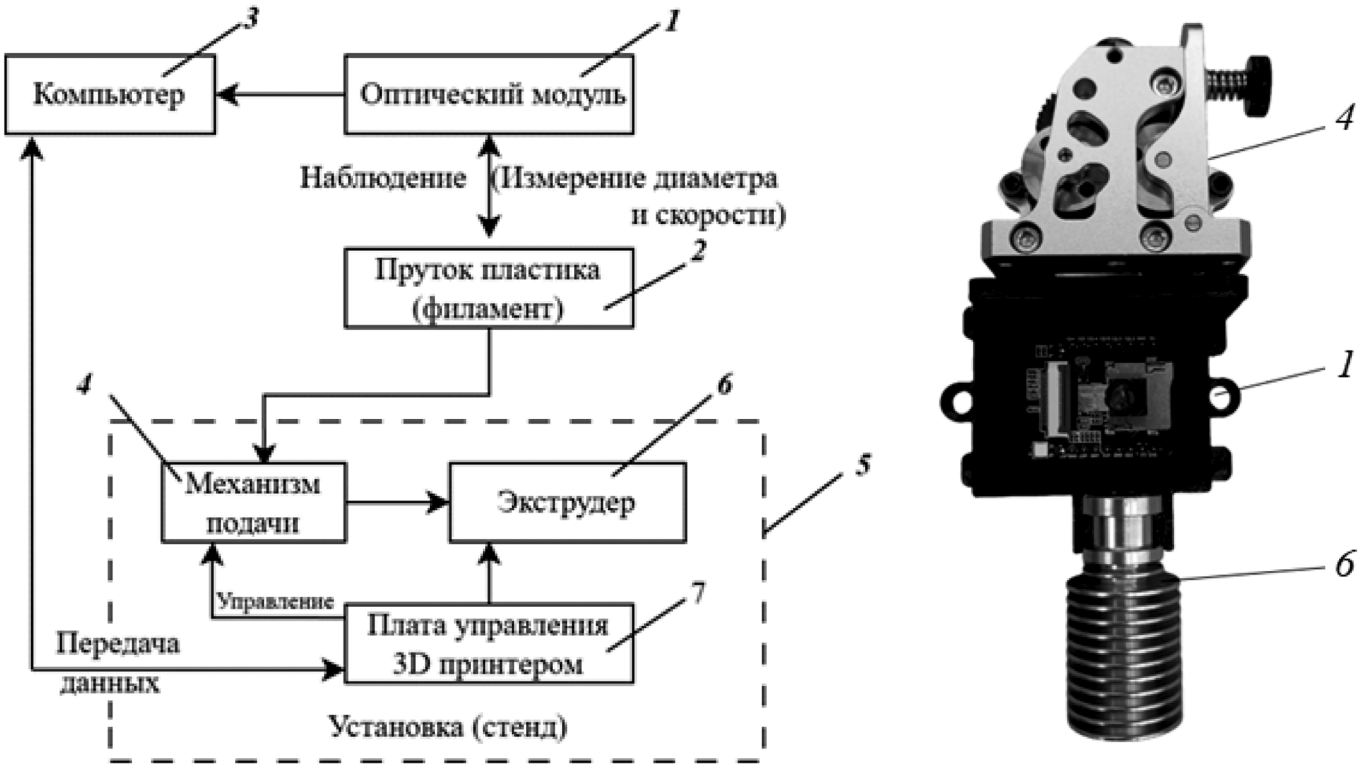


Рис. 3. Структура и внешний вид экспериментальной установки

Источник: Составлено автором на основании выполненной работы

Таблица 1.

Оценка точности измерения диаметра филамента

Материал	Сред. диаметр (показания датчика), мм	Сред. диаметр (показания микр-ра), мм	Сред. абс. ошибка, (MAE), мм	СКО (RMSE), мм	Макс. отклонение (max|e|), мм
ABS (желтый)	1,750	1,750	0,002	0,003	0,007
PETG (белый)	1,748	1,743	0,007	0,009	0,021
PA6 + стекловолокно	1,629	1,627	0,043	0,055	0,135

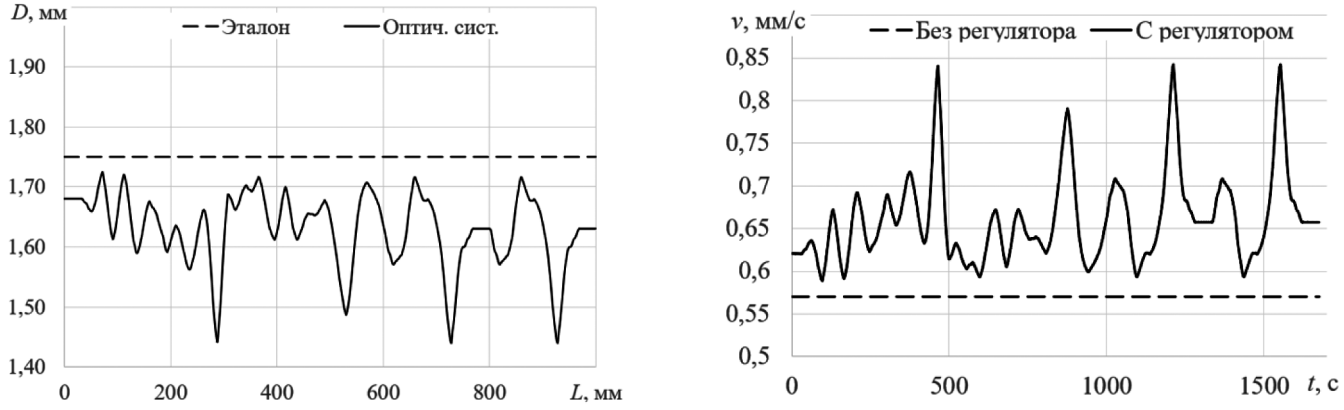
Источник: Составлено автором на основании выполненной работы

подавались данные о флуктуации диаметра D_{real} филамента PA6 (рис. 4, *а*). Система автоматического регулирования отрабатывает изменения диаметра путем коррекции скорости подачи филамента (рис. 4, *б*).

Заданная скорость в программе (без регулятора) держится на протяжении всей печати на уровне $v = 0{,}57$ мм/с. Скорректированная скорость подачи филамента (с регулятором) отличается от заданной в программе и меняется от $v = 0{,}59$ мм/с до $v = 0{,}84$ мм/с (рис. 4, *б*), что говорит о правильной работе ПИ-регулятора и корректной реакции на изменение диаметра филамента.

Из-за варьирования диаметра на выходе системы накапливается ошибка объемной подачи E в процессе печати (рис. 5, *а*). Что влияет на накопленный объем V_{int} расплавленного материала в процессе печати (рис. 5, *б*).

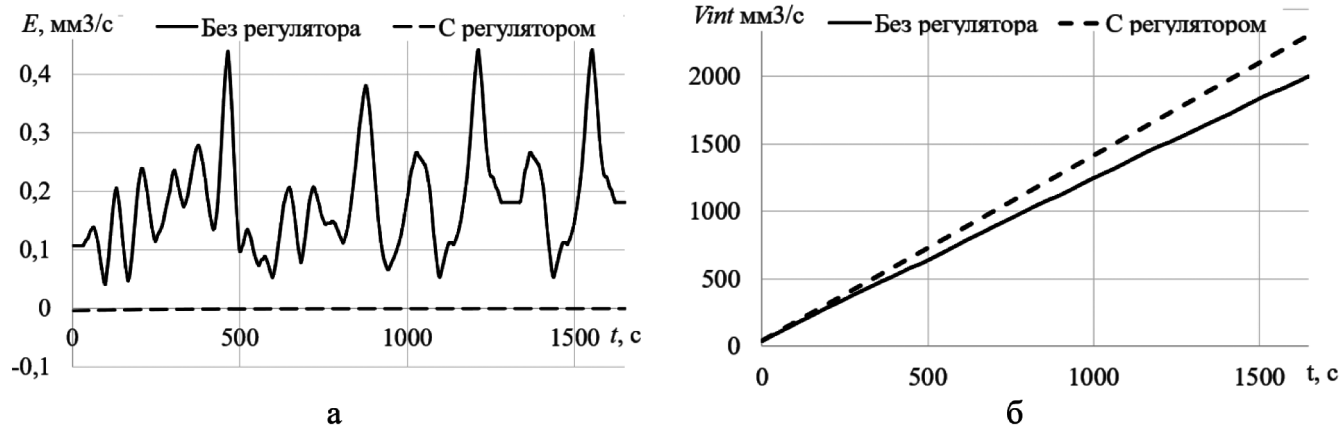
Ошибка подачи системы без регулятора, показанная сплошной линией, варьируется от значения $E = 0{,}064$ мм³/с до значения $E = 0{,}44$ мм³/с, что говорит



а б

Рис. 4. Результаты работы регулятора: *а* — показания датчика при измерении, *б* — коррекция, вносимая регулятором в скорость подачи филамента

Источник: Составлено автором на основании выполненной работы



а б

Рис. 5. Результаты работы регулятора в режиме реального времени: *а* — ошибка мгновенной объемной подачи филамента, *б* — накопленный объем поданного филамента

Составлено автором на основании выполненной работы

о недоэкструзии материала в течении всего процесса печати. Накопленный объем V_{int} без подключения регулятора, показанный сплошной линией по окончанию процесса печати принимает значение V_{int} = 1942 мм^3. А накопленный объем системы с подключенным регулятором, показанный пунктирной линией, принимает значение V_{int} = 2237 мм^3. Это показывает, что при печати филаментом PA6 разница в подаче материала к концу печати составляет 13,2 %.

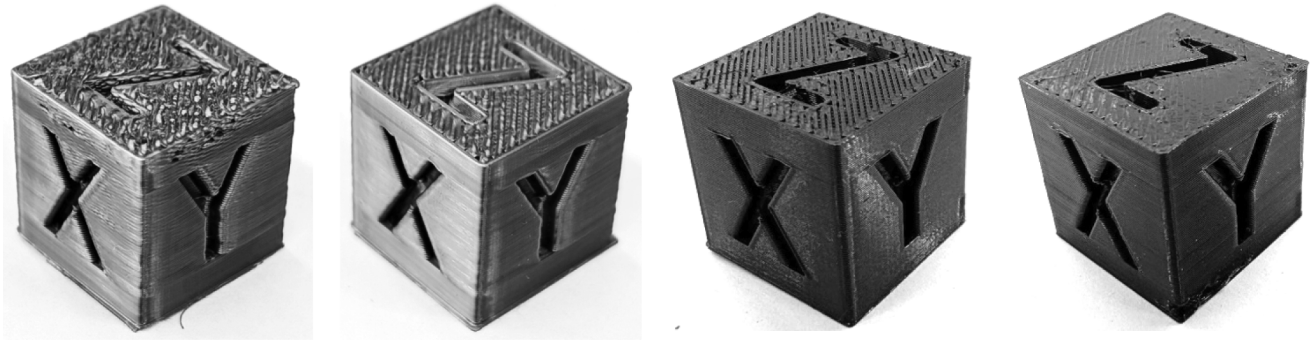
Проведена качественная оценка работы регулятора. Для этого напечатаны тестовые образцы из филаментов PLA и TPU. Для этих филаментов были рассчитаны статистические характеристики, которые показали, что 45 % исследуемой длины филамента PLA превышает предельные отклонения диаметра по ГОСТ Р 59100-2020. В то же время 40 % исследуемой длины филамента TPU ниже предельного отклонения по ГОСТ.

Для каждого филамента были напечатаны по два тестовых образца: печать с отключенным регулятором и с включенным. Показаны тестовые образцы печати полнотелого куба (рис. 6).

В результате печати филаментом PLA без регулятора (рис. 6, *а*) наблюдались признаки переэкструзии материала, выражающиеся в наплывах материала в верхней части изделия, сильном перекрытии линий печати, неравномерности линий стенки. В результате печати филаментом TPU без регулятора (рис. 6, *в*) наблюдались признаки недоэкструзии материала, выражающиеся в пропусках участков в верхней части изделия. При печати с включенным регулятором в обоих случаях (рис. 6, *б, г*) результаты показали существенное улучшение качества печати.

На рис. 7 представлена методика замеры ширины стенки образца в виде пустотелого куба и результаты измерений напечатанных образцов.

Результат печати и замеры показали, что реальная толщина стенки (рис. 7, *б*) тестового образца при печати филаментом PLA составляет 0,636 мм, а при печати филаментом TPU составляет 0,571 мм при заданной в программе печати толщине 0,6 мм. При включенном алгоритме коррекции подачи реальная толщина стенки филамента PLA составляет 0,599 мм, а филамента TPU



а *б* *в* *г*

Рис. 6. Тестовые образцы полнотелого куба: *а* — филамент PLA печать без регулятора; *б* — филамент PLA печать с регулятором; *в* — филамент TPU печать без регулятора; *г* — филамент TPU печать с регулятором

Составлено автором на основании выполненной работы

а

PLA		
Тип печати образца	Без регулятора	С регулятором
Толщина стенки, мм	0,636	0,599
TPU		
Тип печати образца	Без регулятора	С регулятором
Толщина стенки, мм	0,571	0,597

б

Рис. 7. Результаты печати и замеры ширины стенки пустотелого куба: *а* — методика измерения толщины стенки; *б* — результаты измерений образцов

Составлено автором на основании выполненной работы

составляет 0,597 мм, что очень близко к заданной в программе печати. Численно можно показать, что алгоритм компенсировал 6 %-ную переэкструзию при печати филаментом PLA и 4,5 %-ную недоэкструзию при печати филаментом TPU.

Заключение

Разработана математическая модель системы подачи филамента в FDM 3D-принтере с учётом запаздывания и инерционности зоны плавления, показавшая, что их игнорирование в разомкнутой системе приводит к накоплению ошибки объёмной подачи и снижению точности изделий. Синтезированный ПИ-регулятор с предиктивной коррекцией обеспечивает компенсацию флуктуаций диаметра и временных задержек за счёт учёта динамики процесса. Результаты моделирования и экспериментальной проверки подтвердили существенное снижение мгновенной и накопленной ошибки подачи, а также улучшение геометрической точности изделий с компенсацией отклонений на уровне нескольких процентов. Предложенный подход реализует переход к замкнутому управлению объёмной подачей на основе оптических измерений и может быть интегрирован в существующие системы управления FDM-принтерами, при условии корректной калибровки параметров модели и учёта тепловых режимов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. — 2nd ed. — New York : Springer, 2015. — 498 p.
2. Ngo T. D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K. T. Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // Composites Part B: Engineering. — 2018. — Vol. 143. — P. 172–196.
3. Turner B. N., Strong R., Gold S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling // Rapid Prototyping Journal. — 2014. — Vol. 20. — No. 3. — P. 192–204.
4. Шемелюнас С. С., Дроботов А. В., Ваганов А. В., Сулицкий М. В. Алгоритм работы устройства автоматического контроля подачи материала в FDM 3D-принтере // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. — 2022. — № 3 (262). — С. 81–84.
5. Шемелюнас С. С., Омаров А. В., Дроботов А. В. Анализ и совершенствование системы контроля подачи материала в FDM 3D-принтерах // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. — 2020. — № 8 (243). — С. 78–81.
6. Шемелюнас С. С., Ваганов А. В., Жохов В. Д. Методика контроля состояний материала для FDM 3D-печати на основе оптического сканирования // Наука XXI века: вызовы, становление, развитие : сб. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. — Петрозаводск, 2023. — С. 64–70.
7. Астрем К. Ю., Мюррей Р. М. Системы с обратной связью. Введение для ученых и инженеров. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. — 404 с.
8. Огата К. Современное управление. — М. : Вильямс, 2010. — 864 с.
9. Франклин Дж., Пауэлл Дж., Эмами-Найни А. Системы автоматического управления. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. — 798 с.
10. Ким Д. П. Теория автоматического управления. — М. : Физматлит, 2007. — 304 с.
11. Пупков К. А., Егоров А. И., Шишлаков В. Ф. Теория автоматического управления. — М. : Высшая школа, 2009. — 567 с.
12. Klipper Firmware Documentation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.klipper3d.org (дата обращения: 2026).

© Шемелюнас Сергей Сергеевич (sergey.shemelyunas@bk.ru); Яковлев Алексей Андреевич (yaa_777@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.45

АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФИЛАМЕНТА В FDM-ПЕЧАТИ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ

AUTOMATIC CONTROL OF THE GEOMETRIC PARAMETERS OF THE FILAMENT IN FDM PRINTING BASED ON OPTICAL MEASUREMENT

S. Shemelyunas
A. Yakovlev

Summary. The article discusses the problem of instability of the geometric parameters of the filament, which has a significant impact on the accuracy of the volumetric feed of the material in FDM printing technology. It is shown that deviations in the diameter of the filament relative to the nominal value led to significant changes in the volume consumption of the material and can cause overextrusion or underextrusion, which degrade the quality of printed products. The results of an experimental study of filaments from various manufacturers are presented, demonstrating a significant proportion of the material exceeding the permissible deviations. The architecture of an optical monitoring system based on the ESP32-CAM module is proposed, which allows non-contact measurement of the diameter and feed rate of the filament during the printing process. An algorithm for image sequence processing has been developed, including segmentation, morphological filtering, and contour analysis. Experimental validation has shown that the diameter measurement error for common materials does not exceed the permissible deviations, which confirms the possibility of using the developed system for automated control of filament feeding in FDM printers.

Keywords: FDM printing, additive technologies, filament, diameter of the filament, volumetric feed of the material, optical measurement, technical vision, image processing, control of the feed of the filament, ESP32-CAM, automated control, extrusion of the material.

Шемелюнас Сергей Сергеевич
Преподаватель, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Волгоградский государственный технический университет
sergey.shemelyunas@bk.ru
Яковлев Алексей Андреевич
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Волгоградский государственный технический университет
yaa_777@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема нестабильности геометрических параметров филамента, оказывающей существенное влияние на точность объёмной подачи материала в технологии FDM-печати. Показано, что отклонения диаметра филамента относительно номинального значения приводят к значительным изменениям объёмного расхода материала и могут вызывать переэкструзию или недоэкструзию, ухудшающие качество печатных изделий. Представлены результаты экспериментального исследования филаментов различных производителей, демонстрирующие значительную долю материала, выходящего за пределы допустимых отклонений. Предложена архитектура оптической системы контроля на основе модуля ESP32-CAM, позволяющей выполнять бесконтактное измерение диаметра и скорости подачи филамента в процессе печати. Разработан алгоритм обработки последовательности изображений, включающий сегментацию, морфологическую фильтрацию и контурный анализ. Экспериментальная валидация показала, что погрешность измерения диаметра для распространённых материалов не превышает допустимых отклонений, что подтверждает возможность применения разработанной системы для автоматизированного контроля подачи филамента в FDM-принтерах.

Ключевые слова: FDM-печать, аддитивные технологии, филамент, диаметр филамента, объёмная подача материала, оптическое измерение, техническое зрение, обработка изображений, контроль подачи филамента, ESP32-CAM, автоматизированный контроль, экструзия материала.

Введение

Стремительное развитие аддитивных технологий (в частности, Fused Deposition Modeling, FDM), приводит к их всё более широкому применению в машиностроении, авиации, медицине, прототипировании и образовании [1],[2]. На фоне общего прогресса в аддитивных технологиях сохраняется ряд технических проблем, непосредственно влияющих на качество печати. Одной из наиболее значимых остаётся нестабильность подачи филамента — материала в форме нити, из которого FDM-принтер формирует изделие. Такие проблемы, как колебания диаметра и овальность филамента, прерывание его подачи из-за засора сопла или истирания прутка негативно сказываются на точности подачи и приводят к браку.

Традиционные механические методы контроля подачи филамента (энкодеры, тактовые датчики, кнопочные

прерыватели) позволяют выявлять факт наличия/отсутствия филамента или засоры, но не обеспечивают измерения подаваемого объема.

В научно-технической литературе в смежных областях — производстве пряжи, кабеля, проволоки и технических нитей — применяются оптические методы контроля геометрии и движения нитевидных и прутковых материалов [3]. Однако их конструктивные требования (жёсткая фиксация объекта, стабильные условия съёмки, однородные цвет и фактура поверхности) не позволяют использовать такие системы в условиях подачи филамента в FDM-принтере, где изменяются оптические свойства, текстура и характер движения филамента.

Таким образом, актуально повышение стабильности подачи филамента путем разработки автоматической системы контроля подачи, основанной на бесконтактном измерении объемной подачи филамента посредством технического зрения.

Влияние нестабильности диаметра на объёмную подачу

В технологии FDM формирование изделия осуществляется путём послойного нанесения расплавленного полимерного материала, подаваемого в зону плавления в виде прутка (филамента). Количество материала, поступающего в экструдер, определяется линейной скоростью подачи и площадью поперечного сечения филамента. Таким образом, объёмная подача непосредственно зависит от текущего диаметра прутка [4]. Объёмная скорость подачи материала Q определяется выражением:

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} \cdot v, \qquad (1)$$

где D — диаметр филамента, v — линейная скорость подачи.

Из выражения следует, что объёмная подача пропорциональна квадрату диаметра. Следовательно, даже незначительные отклонения диаметра приводят к существенному изменению количества подаваемого материала.

Для оценки влияния нестабильности диаметра рассмотрим номинальное значение $D_{ном}$ = 1,75 мм и отклонение ± 0,05 мм. При увеличении диаметра до 1,8 мм относительно изменение площади поперечного сечения составит 5,8 %. При уменьшении диаметра до 1,7 мм относительное изменение площади составит –5,6 %. Таким образом, отклонение диаметра всего на ±0,05 мм приводит к изменению объемной подачи примерно на ±6 %.

Изменение объемной подачи ведет к многим негативным факторам: ухудшение качества поверхности печатаемых изделий, несоответствие размерных характеристик, а также может приводить к изменению прочностных характеристик изделий. Уменьшение объемной подачи филамента характеризуется термином недоэкструзия. Увеличение объемной подачи называется переэкструзия. Результаты печати с различной величиной объемной подачи показаны ниже (см. рисунок 1).

Экспериментальная оценка геометрических параметров филамента

Для количественной оценки нестабильности геометрических параметров филамента проведено экспериментальное исследование PETG-филамента пяти производителей, представленных на российском рынке. В выборку включены материалы различных цветов и текстур, включая композитные с наполнителем. Номинальный диаметр образцов составлял 1,75 мм, допустимое отклонение согласно ГОСТ Р 59100–2020 — ±0,03 мм.

Для каждого образца была исследована длина 5 м, по которой выполнено 200 равномерно распределён-

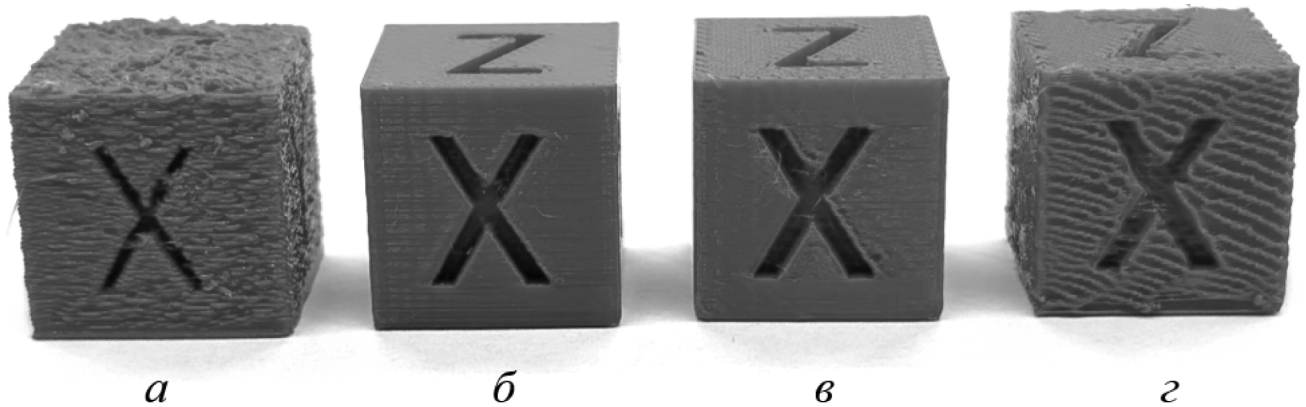


Рис. 1. Рассмотренные образцы качественной оценки: *а* — переэкструзия 15 %; *б* — нормальная экструзия; *в* — недоэкстузия 5 %; *г* — недоэкструзия 15 %

Источник: составлено автором на основании проведенной работы

Таблица 1.

Результаты статистической обработки филаментов

Полимерная основа	PETG НИТ, Россия	PETG Filamentarno, Россия	PETG U3PRINT, Россия	PETG MAKO, Россия	PETG KREMEN, Россия
Цвет	Черный	Флуоресцентный	Бежевый	Натуральный	Красный
Среднее арифметическое измеренного диаметра, мм	1,750	1,805	1,711	1,731	1,738
Минимальный измеренный диаметр, мм	1,730	1,770	1,680	1,700	1,710
Максимальный измеренный диаметр, мм	1,770	1,840	1,750	1,780	1,770
Среднеквадратическое отклонение (σ) диаметра, мм	0,008	0,015	0,014	0,017	0,013
Оценочная доля длины филамента ниже нижнего допуска, %	0	0	75	25	8
Оценочная доля длины филамента выше верхнего допуска, %	0	95	0	0	0

Источник: составлено автором на основании проведенной работы

ных измерений диаметра с использованием электронного микрометра. Результаты статистической обработки представлены ниже (см. таблицу 1).

Минимальные измеренные значения находятся в диапазоне 1,68–1,77 мм, максимальные — 1,75–1,84 мм. Средние значения диаметра варьируются от 1,71 мм до 1,8 мм, что свидетельствует о наличии как занижения, так и завышения диаметра относительно номинала. Доля длины филамента, выходящая за пределы допуска ±0,03 мм по ГОСТ, достигает значительных величин: для PETG Filamentarno 95 % длины превышает верхний предел допуска, для PETG U3PRINT 75 % длины находится ниже нижнего допуска, для PETG MAKO — 25 %, для PETG KREMEN — 8 %. Только образец PETG НИТ полностью соответствует нормативным требованиям на исследуемой длине.

Полученные результаты подтверждают, что нестабильность диаметра филамента является системной проблемой, оказывающей существенное влияние на точность объёмной подачи материала в FDM-печати. Это обосновывает необходимость разработки автоматизированной системы контроля геометрических параметров филамента в реальном времени.

К разрабатываемой системе контроля предъявляются следующие требования: точность измерения диаметра должна быть существенно ниже допустимого отклонения по ГОСТ (±0,03 мм) и не превышать 0,01 мм для обеспечения корректной компенсации объёмной подачи. Система должна работать в режиме реального времени, обеспечивая регистрацию локальных изменений диаметра вдоль длины филамента, иметь компактные размеры для размещения в тракте подачи и осуществлять измерение бесконтактным способом, исключающим механическое воздействие на материал.

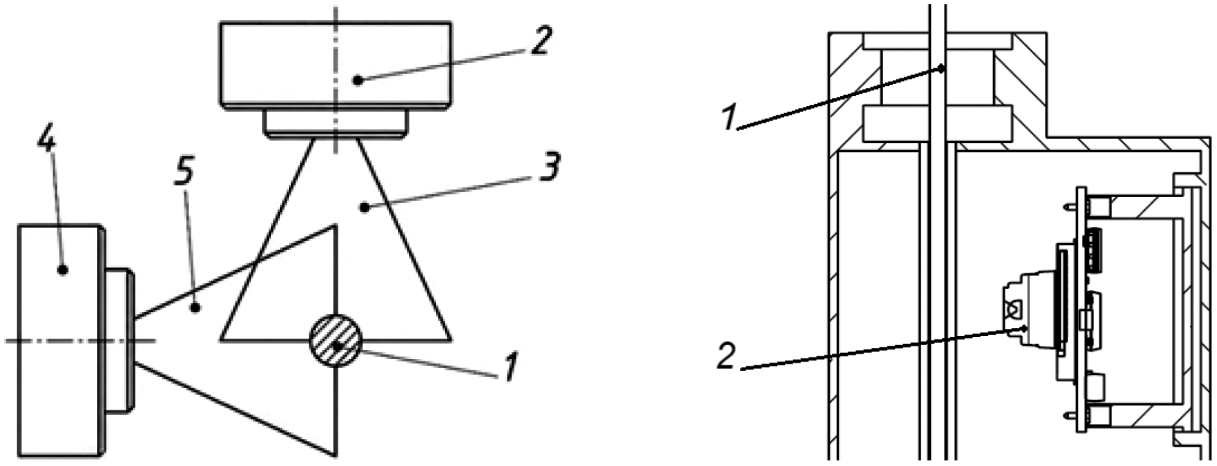
Разработка оптического датчика

Предложена архитектура датчика, включающая оптический модуль на базе видеокамеры и микроконтроллера ESP32-CAM, систему подсветки, а также элементы питания и сопряжения с управляющим оборудованием 3D-принтера. Ниже представлена структурная схема системы управления (см. рисунок 2). В качестве оптического датчика выбрана камера OV2640 на базе чипа ESP32.

Рис. 2. Структурная схема системы управления

Источник: составлено автором на основании проведенной работы

Оптический модуль камеры размещен перед филаментом для захвата его изображения с последующей программной коррекцией искажений профиля. Ниже представлена схема размещения оптического модуля (см. рисунок 3).



а *б*

Рис. 3. Схема размещения оптического модуля: *а* — вид сверху; *б* — вид в корпусе печатающей головы. Филамент 1, оптический модуль 2 и 4 в двух перпендикулярных проекциях, области видимости 3 и 5 оптического модуля

Источник: составлено автором на основании проведенной работы

Последовательность кадров филамента, полученная с оптического датчика, используется для определения наличия филамента, вычисления значения его диаметра в пикселях D_{px} и скорости продвижения v_f. Результаты анализа последовательности кадров передаются в управляющую плату для последующего анализа.

Для решения поставленных задач в работе предложена методика обработки последовательности кадров, основанная на трудах Гонсалеса, Вудса, Канни, Лукас–Канаде, И.Ю. Михайлова и В.А. Степанова [5], [6], [7], [8]. Методика включает в себя процедуры предобработки изображений, определения наличия филамента, скорости продвижения и диаметра. Алгоритм процедуры предобработки изображений включает в себя следующие шаги.

Шаг 1. Преобразование последовательности кадров в оттенки серого. Каждому пикселю в кадре присваивается текущее значение яркости I_{gray} этого пикселя в точке с координатами по осям *x, y*.

Шаг 2. Пороговая сегментация по методу Отсу вычисляется по следующему выражению:

$$\text{maximize } \sigma_b^2(k) = \omega_1(k)\omega_2(k)\left[\mu_1(k) - \mu_2(k)\right]^2, \qquad (2)$$

где ω_i и μ_i — веса и средние значения интенсивности для двух классов пикселей (до и после порога *k*). В результате проведенного анализа в кадре выделяется предполагаемый объект — филамент.

Шаг 3. Морфологическая фильтрация кадра. Определяется в соответствии со следующим выражением:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B,\ A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B, \qquad (3)$$

где *A* — бинарное изображение, *B* — структурирующий элемент (прямоугольник).

В результате выполнения этого шага алгоритма удаляются шумы и мелкие темные участки внутри объекта.

Шаг 4. Детектирование контуров по алгоритму Канни.

Вычисляется градиент изображения и подавляются немаксимальные значения. Это позволяет выявить границы объекта, определить его размер и получить бинарную маску *M(x,y)* филамента [9]. Пример реализации алгоритма показан ниже (см. рисунок 4).

Далее выполняется процедура определения физических параметров филамента. Алгоритм данной процедуры включает три последовательно выполняемых шага [10], [11].

Шаг 1. Выявление наличия филамента в кадре.

Заполняется область интереса (*ROI*) на бинарной маске кадра. По заполненной области вычисляется суммарная площадь «белых» пикселей по выражению, которое характеризует присутствие объекта в кадре:

$$S_{obj} = \sum_{x,y \in ROI} M(x,y) \qquad (4)$$

Пороговое значение S_{min}, ниже которого считается, что объект присутствует, выбирается при калибровке.

Шаг 2. Определение скорости движения v_f филамента.

Вычисляется по смещению характерных точек маски между кадрами, разделенными интервалом времени Δt.

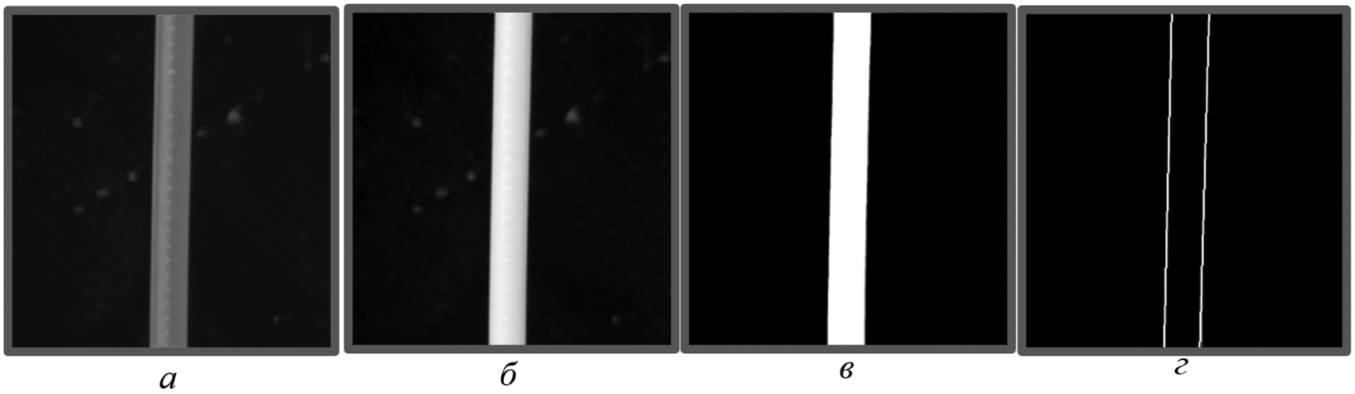


Рис. 4. Последовательность обработки изображения филамента: *а* — исходный кадр, *б* — оттенки серого, *в* — пороговая сегментация и морфологическая фильтрация (бинарная маска), *г* — детектирование контуров
Источник: составлено автором на основании проведенной работы

Шаг 3. Вычисление диаметра филамента в кадре по профилю яркости.

После получения бинарной маски филамента, в кадре выбирается горизонтальная линия (сечение), которая проходит через центр маски. По этой линии строится профиль яркости. На бинарном изображении такой профиль преобразуется в вектор:

$$P(x) = M(x, y_0),\ x \in [x_1, x_2], \quad (5)$$

где y_0 — координата линии сечения, $M(x,y_0)$ — бинарная маска.

Диаметр D_{px} филамента в пикселях вычисляется как расстояние между координатой x_{right} конечного пикселя в маске и координатой x_{left} начального пикселя. Для получения реального диаметра используется коэффициент масштабирования S, определяемый при калибровке [12]. Тогда диаметр D_{mm} филамента в миллиметрах вычисляется как произведение диаметра D_{px} в пикселях на коэффициент масштабирования S. Визуально представление яркостного профиля представлено ниже (см. рисунок 5).

Экспериментальная валидация датчика

Для оценки точности разработанной системы измерения диаметра проведены эксперименты с тремя материалами: PETG (бирюзовый), ABS (жёлтый) и PA6, армированный стекловолокном (чёрный). Каждый образец пропускался через оптическую систему в режиме измерения диаметра на участке длиной 1000 мм. Показания регистрировались через каждые 2 мм длины филамента.

Для верификации результатов выполнены ручные измерения микрометром с ценой деления 0,01 мм и пределом допускаемой погрешности ±0,002 мм. Ручные измерения проводились с шагом 25 мм.

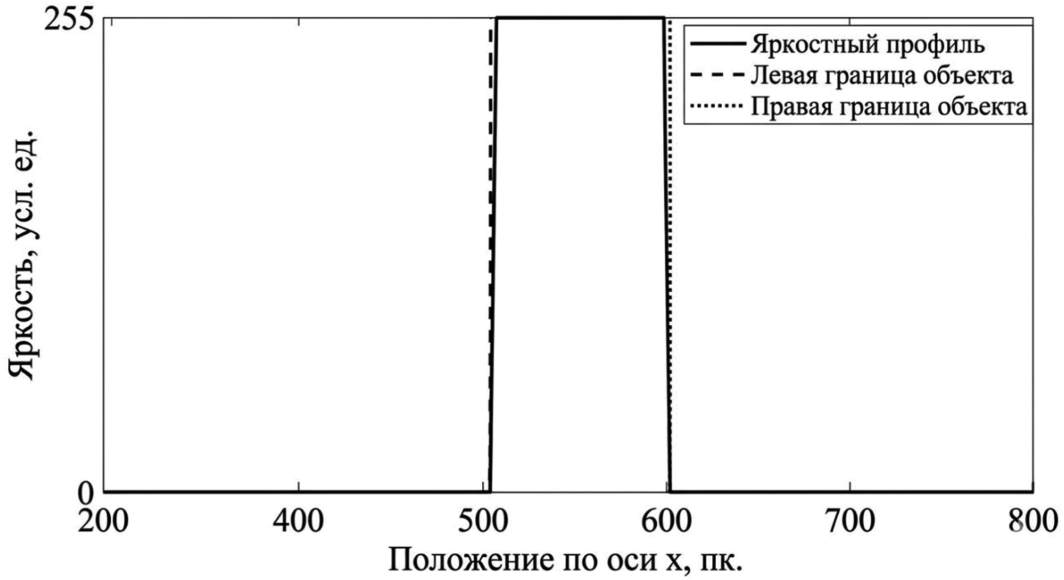


Рис. 5. Яркостной профиль при определении диаметра филамента
Источник: составлено автором на основании проведенной работы

Ниже (см. рисунок 6) представлен график измерения диаметра филамента ABS, использованного в качестве эталона при калибровке системы. Сплошная линия соответствует данным оптической системы, линия пунктир-точка — результатам измерения микрометром, пунктирная линия обозначает номинальный диаметр 1,75 мм.

Для количественной оценки точности разработанной оптической системы результаты измерений были сопоставлены с данными, полученными электронным микрометром. В качестве метрик точности использовались средняя абсолютная ошибка (MAE), среднеквадратическая ошибка (RMSE) и максимальная абсолютная ошибка. Результаты показаны ниже (см. таблицу 2).

Полученные результаты показывают, что для филаментов ABS и PETG погрешность измерений оптической системы не превышает одной сотой миллиметра, что существенно ниже допустимых технологических отклонений диаметра филамента. Для филамента на основе полиамида с наполнителем (PA6 + стекловолокно) наблюдается увеличение величины погрешности, что обусловлено особенностями поверхности и оптических свойств материала. Тем не менее даже в этом случае измерения сохраняют воспроизводимость и позволяют корректно отслеживать изменения диаметра вдоль длины прутка.

Заключение

Проведённое экспериментальное исследование показало, что нестабильность диаметра филамента носит

Таблица 2.

Количественная оценка точности измерения диаметра филамента оптической системой

Материал	Средний диаметр (показания датчика), мм	Средний диаметр (показания микр-ра), мм	Сред. абс. ошибка, (MAE), мм	СКО (RMSE), мм	Макс. отклонение (max|e|), мм
ABS (желтый)	1,750	1,750	0,002	0,003	0,007
PETG (белый)	1,748	1,743	0,007	0,009	0,021
PA6 + стекловолокно	1,629	1,627	0,043	0,055	0,135

систематический характер и может существенно превышать нормативные допуски. Для ряда образцов зафиксировано устойчивое смещение среднего диаметра относительно номинального значения 1,75 мм, а доля длины прутка, выходящая за пределы допуска ±0,03 мм, достигает 75–95 %, что приводит к формированию устойчивой ошибки объёмной подачи материала при использовании фиксированного параметра диаметра.

Анализ показал, что отклонение диаметра на ±0,05 мм вызывает изменение объёмного расхода примерно на ±6 %, что отражается на геометрической точности изделий и проявляется в виде переэкструзии или недо-

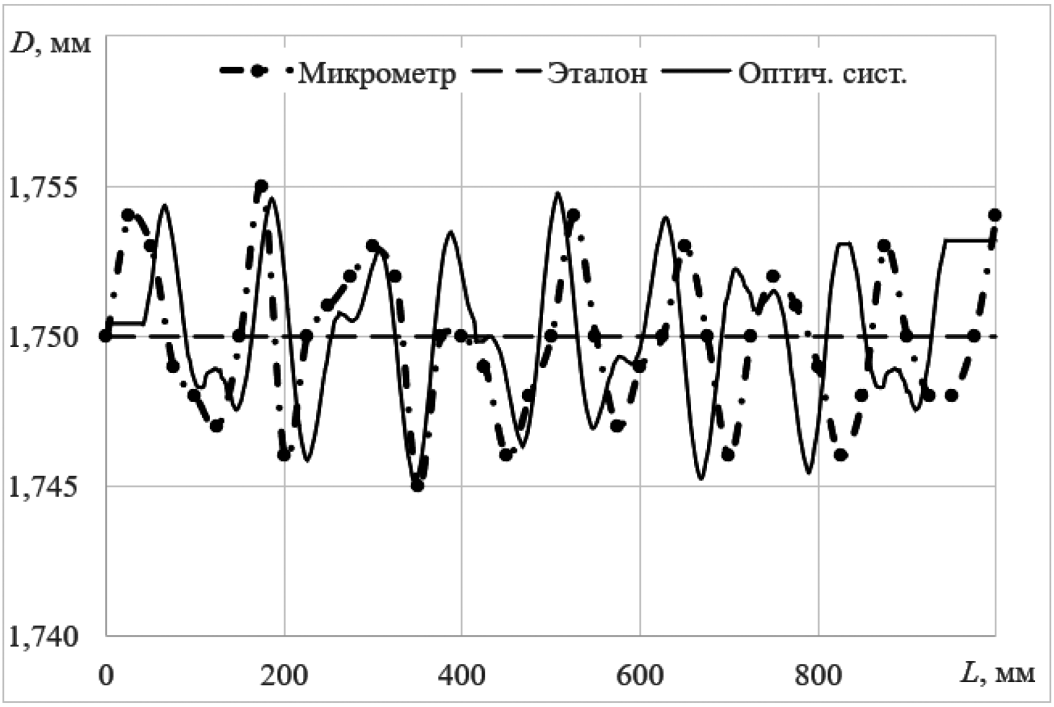


Рис. 6. График варьирования диаметра филамента ABS желтого цвета

Источник: составлено автором на основании проведенной работы

экструзии. Поскольку в существующих FDM-принтерах измерение диаметра в процессе печати не выполняется, данные отклонения остаются некомпенсированными.

В работе разработан оптический датчик контроля геометрических параметров филамента, обеспечивающий измерение диаметра непосредственно в тракте подачи. Экспериментальная проверка показала, что погрешность измерения значительно ниже вариации диаметра исследованных материалов, что подтверждает возможность применения датчика в системах автоматизированного контроля. Ограничением метода является зависимость точности измерений от оптических свойств поверхности материала, что требует корректной настройки освещения и алгоритмов обработки изображений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. — 2nd ed. — New York : Springer, 2015. — 498 p.
2. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // Composites Part B: Engineering. — 2018. — Vol. 143. — P. 172–196.
3. Turner B.N., Strong R., Gold S.A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling // Rapid Prototyping Journal. — 2014. — Vol. 20. — No. 3. — P. 192–204.
4. Boschetto A., Bottini L. Accuracy prediction in fused deposition modeling // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2015. — Vol. 73. — P. 913–928.
5. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing. — 4th ed. — Pearson, 2018. — 1168 p.
6. Canny J. A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 1986. — Vol. 8. — No. 6. — P. 679–698.
7. Lucas B. D., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision // Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence. — 1981. — P. 674–679.
8. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. — 1979. — Vol. 9. — No. 1. — P. 62–66.
9. Шемелюнас С.С., Омаров А.В., Дроботов А.В. Анализ и совершенствование системы контроля подачи материала в FDM 3D-принтерах // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. — 2020. — № 8 (243). — С. 78–81.
10. Шемелюнас С.С., Дроботов А.В., Ваганов А.В., Сулицкий М.В. Алгоритм работы устройства автоматического контроля подачи материала в FDM 3D-принтере // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. — 2022. — № 3 (262). — С. 81–84.
11. Шемелюнас С.С. Исследование бесконтактного метода контроля подачи материала в FDM/FFF 3D печати // Наука и технологии: тенденции современного развития : сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф. — Петрозаводск, 2024. — С. 87–92.
12. Шемелюнас С.С., Ваганов А.В., Жохов В.Д. Методика контроля состояний материала для FDM 3D-печати на основе оптического сканирования // Наука XXI века: вызовы, становление, развитие : сб. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. — Петрозаводск, 2023. — С. 64–70.

© Шемелюнас Сергей Сергеевич (sergey.shemelyunas@bk.ru); Яковлев Алексей Андреевич (yaa_777@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.46

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ ОТ АТАК НА ЦЕПОЧКИ ПОСТАВОК ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ С ОТКРЫТЫМ ИСХОДНЫМ КОДОМ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR PROTECTING WEB APPLICATIONS FROM ATTACKS ON THE SUPPLY CHAIN OF OPEN-SOURCE SOFTWARE IN MODERN CONDITIONS

G. Shipulin
I. Kalutsky
A. Shornikov

Summary. This paper presents a comparative analysis of methods for protecting web applications against open-source software (OSS) supply chain attacks. The topic's relevance is due to the high level of third-party component usage (70–90 % of code) and a significant rise in malicious packages within public repositories. The study's goal is to formulate a comprehensive set of measures to ensure the information security of web applications across all stages of their lifecycle. The comparative analysis covers international standards (NIST SSDF, OWASP SSCS, SLSA), industry reports (Sonatype, JFrog), and regulatory documents of the Russian Federation (GOST R 56939-2024, FSTEC of Russia orders). The most comprehensive approach is found in the NIST SSDF methodology and OWASP recommendations. A list of practical recommendations is formulated, including measures for each stage of the development lifecycle: risk assessment during design, SCA/SAST and code audit during development, SBOM and isolated build, WAF/DAST/IAST implementation during deployment, as well as vulnerability monitoring and RASP implementation during operation. The results obtained can serve as a foundation for improving the information security level of the software development process.

Keywords: secure software development, information security, open-source software, web application security.

Шипулин Георгий Фаризович
Кандидат юридических наук, доцент, МИРЭА — Российский технологический университет; Доцент, Московский Политехнический Университет
podumai_nad@mail.ru
Калуцкий Игорь Владимирович
Кандидат технических наук, доцент, Московский Политехнический Университет; Доцент, МИРЭА — Российский технологический университет
kalutsky_igor@mail.ru
Шорников Андрей Валерьевич
Московский Политехнический Университет
a.vshornikov@yandex.ru

Аннотация. В данной работе представлен сравнительный анализ методов защиты веб-приложений от атак на цепочки поставок программного обеспечения с открытым исходным кодом (OSS). Актуальность темы обусловлена высоким уровнем использования сторонних компонентов (70–90 % кода) и значительным ростом числа вредоносных пакетов в публичных репозиториях. Целью исследования является формирование комплексного набора мер по обеспечению информационной безопасности веб-приложений на всех этапах их жизненного цикла. Сравнительный анализ охватывает международные стандарты (NIST SSDF, OWASP SSCS, SLSA), отраслевые отчёты (Sonatype, JFrog), а также нормативные документы Российской Федерации (ГОСТ Р 56939–2024, приказы ФСТЭК России). Выявлено, что наиболее комплексный подход представлен в методике NIST SSDF и рекомендациях OWASP. Сформулирован перечень практических рекомендаций, включающий меры для каждого этапа жизненного цикла разработки. Полученные результаты могут служить основой для повышения уровня информационной безопасности процесса разработки ПО.

Ключевые слова: разработка безопасного программного обеспечения, информационная безопасность, программное обеспечение с открытым исходным кодом, безопасность веб-приложений.

Введение

Современные особенности разработки программного обеспечения (ПО), в том числе и ПО с открытым исходным кодом (OSS, Open-source software) требуют от разработчиков соблюдения принципов «конструктивной безопасности», учитывающих использование сторонних зависимостей в своих проектах. Однако согласно отчёту Sonatype, количество вредоносных пакетов в публичных репозиториях составляет более полумиллиона, а темпы роста количества подобных пакетов более 200 % ежегодно [1]. Кроме того, опасность представляет и тот факт, что современные веб-приложения, как правило, содержат 70–90 % кода из сторонних библиотек и OSS, что существенно увеличивает поверхность атаки. При этом, по данным JFrog,

около 44 % контейнерных образов содержат уязвимости с высокой и критической базовой оценкой (Base score по CVSS) [2]. Также, нельзя не отметить, что организация в OWASP Top 10 (2025) появился новый класс под названием «Software Supply Chain Failures», поместив его сразу на третье место, что является доказательством того, что данный класс атак является крайне распространенным среди всех компьютерных атак на приложения. В том числе, в Российской Федерации существует ряд стандартов, а именно ГОСТ Р 56939-2024 [3], ГОСТ Р 58412-2019 [4] и ГОСТ Р 71207-2024 [5], в той или иной степени регламентирующих разработку безопасного ПО, включающих в себя требования по обеспечению информационной безопасности (ИБ) от атак на цепочки поставок ПО.

Целью данной работы является формирование комплексного набора мер по обеспечению информационной безопасности веб-приложений на всех этапах их жизненного цикла. Полученные результаты могут быть использованы для формирования комплекса методов по обеспечению ИБ процесса разработки веб-приложений, а также в целом для обеспечения ИБ типового веб-приложения на всех этапах его жизненного цикла. Проведенный анализ также позволяет выявить наиболее оптимальный набор методов защиты для достижения определенного уровня обеспечения ИБ при разработке ПО.

Обзор методов защиты веб-приложений от уязвимостей эксплуатируемых посредством атак на цепочки поставок OSS

Для сравнительного анализа авторами выбраны следующие методики и стандарты в области разработки безопасного ПО и обеспечения ИБ разработки ПО, включающие: NIST SP 800-218 SSDF (Secure Software Development Framework), рекомендации OWASP по безопасности цепочек поставок, отраслевые отчёты Sonatype и JFrog, а также ГОСТ Р 56939-2024, ГОСТ Р 58412-2019 и ГОСТ Р 71207-2024 [1-7].

В таблице 1 представлены результаты сравнения предлагаемых методов защиты веб-приложений на всех этапах жизненного цикла от атак на цепочки поставок OSS с указанием их наличия в рассматриваемых методиках и стандартах.

Проведенное сравнение показывает, что наиболее комплексный подход к защите от атак на цепочки поставок OSS представлен в методике NIST SSDF и рекомендациях OWASP, охватывающих все наиболее ключевые направления обеспечения ИБ при разработке приложений (в т.ч. и веб-приложений). Отраслевые отчёты Sonatype и JFrog акцентируют внимание на практических аспектах внедрения SCA-инструментов и управления уязвимостями [8]. ГОСТ Р 56939–2024 [3] содержит общие требо-

Таблица 1.

Сводная таблица методов защиты веб-приложений на всех этапах жизненного цикла от атак на цепочки поставок OSS

Метод	NIST SSDF	OWASP SSCS	ГОСТ Р 56939	Sonatype / JFrog
SBOM (инвентаризация компонентов)	+	+	+	+
SCA (анализ состава ПО)	+	+	±	+
Подпись артефактов сборки	+	+	+	+
Управление доступом разработчиков	+	+	+	–
Сканирование секретов	+	+	–	+
Политика обновления зависимостей	+	+	+	+
Контроль лицензий OSS	±	–	–	+
SAST	+	+	+	±
DAST	+	+	+	–
IAST	+	+	±	–
BAS	±	+	–	–
Управление уязвимостями	+	+	+	+
Верификация источников кода	+	+	±	+
Воспроизводимая сборка (Reproducible builds)	+	+	–	±
Фиксирование конкретных версий зависимостей	+	+	+	+
Минимизация зависимостей	+	+	±	+
Зеркалирование репозиториев	±	+	–	+
Проверка целостности артефактов	+	+	+	+
Изоляция сетевого доступа при сборке	+	+	–	±
Аудит кода	+	+	+	±
Фаззинг	+	+	±	–
Тестирование на проникновение	+	+	+	–
Внедрение WAF (Web Application Firewall)	±	+	+	–
Внедрение RASP (Runtime Application Self-Protection)	±	+	–	–
Управление безопасностью контейнеров	+	+	±	+

Метод	NIST SSDF	OWASP SSCS	ГОСТ Р 56939	Sonatype / JFrog
Управление секретами	+	+	±	+
Мониторинг аномальной активности	+	+	±	+
Контроль целостности во время выполнения	+	+	±	–
Резервное копирование артефактов	±	±	+	±

Источник: составлено авторами на основе источников [1–3, 6].
Условные обозначения в таблице 1: «+» — метод явно рекомендован; «±» — метод упомянут косвенно; «–» — метод не предлагается.

вания к безопасной разработке ПО, однако ряд специфических методов (сканирование секретов, контроль лицензий и др.) требует уточнения в дополнительных методических рекомендациях.

Отдельного внимания заслуживает анализ требований нормативных документов ФСТЭК России применительно к защите веб-приложений от атак на цепочки поставок OSS. Приказ ФСТЭК России № 17 от 11.02.2013 «Об утверждении Требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах» [9] устанавливает обязательные меры защиты для ГИС, включая группы мер: ОПС (ограничение программной среды), УКФ (управление конфигурацией) и ОПО (управление обновлениями программного обеспечения). Данные группы мер непосредственно связаны с контролем используемых компонентов и могут быть адаптированы для защиты веб-приложений от атак на цепочки поставок OSS [2].

Приказ ФСТЭК России № 239 от 25.12.2017 «Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [10] расширяет требования для объектов КИИ и включает 17 групп мер обеспечения безопасности. В контексте защиты от атак на цепочки поставок наиболее релевантными являются: ОПС (ограничение программной среды), предусматривающая контроль используемого ПО; УКФ (управление конфигурацией), требующая документирования состава ПО; и ОПО (управление обновлениями), регламентирующая процессы обновления компонентов. Согласно изменениям, внесённым приказом ФСТЭК России № 159 от 28.08.2024, для значимых объектов КИИ дополнительно введены требования по безопасной разработке прикладного ПО (п. 29.3). Следует отметить, что с 01.03.2026 вступает в силу приказ ФСТЭК России № 117 от 11.04.2025, который заменит приказ № 17 и существенно расширит сферу применения требований, охватывая не только ГИС, но и муниципальные ИС, а также ИС государственных унитарных предприятий и учреждений. Приказ № 117 вводит процессный подход к защите информации на основе цикла Деминга-Шухарта (PDCA, Plan-Do-Check-Act) и описывает 17 подсистем защиты информации, включая новые требования к безопасности удалённого доступа, защите ИИ и машинного обучения, а также управлению конфигурациями [11].

Для защиты веб-приложений от атак на прикладном уровне применяются сертифицированные средства защиты типа «Г» (межсетевые экраны прикладного уровня — WAF). Согласно методическому документу ФСТЭК России «Профили защиты межсетевых экранов» от 16.12.2016, такие средства должны обеспечивать фильтрацию HTTP/HTTPS-трафика, защиту от угроз из списка OWASP Top 10 [12], а также контроль целостности передаваемых данных. Применение сертифицированных WAF является обязательным для объектов информатизации, подпадающих под требования приказов ФСТЭК России № 17 (№ 117 с 01.03.2026) [3, 7], № 21 и № 239 [10].

Отдельного рассмотрения требует методика SLSA (Supply-chain Levels for Software Artifacts), разработанная OpenSSF (Open-Source Security Foundation) и введённая Google в 2021 году [13]. OpenSSF также предоставляет инструмент Scorecard [14] для автоматизированной оценки безопасности OSS-проектов по ряду критериев. Данная методика представляет собой инкрементальную модель зрелости безопасности цепочек поставок, в неё определяются три уровня зрелости в рамках требований к процессу сборки ПО (или же Build Track) [13].

SLSA Build L1 требует наличия метаданных о происхождении артефакта, документирующего процесс сборки; SLSA Build L2 предусматривает использование выделенной инфраструктуры сборки с криптографической подписью метаданных; SLSA Build L3 обеспечивает защиту от несанкционированного вмешательства в процесс сборки через изоляцию сборочной среды и верификацию исходных материалов.

Отличительной особенностью SLSA является его совместимость с NIST SSDF. Организации могут использовать достижение уровней SLSA как измеримый показатель прогресса в реализации требований NIST SSDF. Согласно спецификации SLSA v1.0, методика специально разработана для противодействия таким атакам, как dependency confusion и typosquatting, посредством верификации метаданных и установления доверия к источникам пакетов. Однако, как отмечается в документации SLSA, методика не обеспечивает защиту от уязвимостей в коде, компрометации сборочных платформ или сговора привилегированных пользователей.

Комплексный подход к защите от атак на цепочки поставок OSS в контексте веб-приложений должен включать меры на всех этапах жизненного цикла разработки. На этапе проектирования необходимо проводить оценку рисков использования сторонних компонентов и формировать политику управления зависимостями. На этапе разработки следует интегрировать SCA-инструменты в конвейер CI/CD для автоматического выявления уязвимых и вредоносных компонентов. На этапе сборки требуется использовать защищённую изолированную инфраструктуру с генерацией SBOM и метаданных о происхождении артефактов. На этапе развёртывания необходимо верифицировать целостность артефактов и применять сертифицированные WAF для защиты от эксплуатации уязвимостей. На этапе эксплуатации требуется обеспечить мониторинг новых уязвимостей в используемых компонентах и своевременное обновление зависимостей. Отдельное внимание следует уделить укреплению (хардерингу) конфигурации контейнерных сред: запуск контейнеров от имени непривилегированных пользователей, ограничение возможностей (capabilities) Linux до минимально необходимого набора (например, только NET_BIND_SERVICE для веб-сервера), сетевая изоляция контейнеров с созданием отдельных bridge-сетей, удаление HTTP-заголовков Server и X-Powered-By, настройка Content Security Policy и X-XSS-Protection [15].

В дополнении ко всему вышеописанному, проведённый сравнительный анализ позволяет сформулировать ряд практических рекомендаций по выбору и внедрению методов защиты веб-приложений от атак на цепочки поставок OSS. Предлагаемый комплекс методов защиты от атак на цепочки поставок OSS на всех этапах жизненного цикла разработки веб-приложения представлен в таблице 2.

Заключение

Таким образом, проведенная аналитическая работа позволила выявить квазиоптимальный комплекс методов защиты от атак на цепочки поставок OSS в контексте безопасности веб-приложения на всех этапах его

Таблица 2.

Перечень методов защиты веб-приложения от атак на цепочки поставок OSS на всех этапах жизненного цикла

Этап жизненного цикла	Перечень методов	Покрываемые типы уязвимостей (БДУ ФСТЭК)
Проектирование	Оценка рисков использования OSS-компонентов; формирование политики управления зависимостями; минимизация используемых зависимостей; выбор доверенных источников компонентов; контроль лицензий OSS.	BDU: W02; BDU: W04; BDU: W05
Разработка	SCA (анализ состава ПО); SAST (статический тестирование безопасности приложения); сканирование секретов; аудит исходного кода (Code Review); фиксирование конкретных версий зависимостей; верификация источников исходного кода; управление уязвимостями.	BDU: W01; BDU: W02; BDU: W03; BDU: W04; BDU: W05
Сборка	SBOM (инвентаризация компонентов); подпись артефактов сборки; укрепление среды сборки (CI/CD hardening); воспроизводимая сборка (reproducible builds); проверка целостности артефактов; изоляция сетевого доступа при сборке; зеркалирование репозиториев; управление доступом разработчиков.	BDU: W03
Развертывание	Верификация целостности артефактов; DAST (динамическое тестирование безопасности приложений); IAST (интерактивное тестирование безопасности приложений); внедрение WAF (Web Application Firewall); управление безопасностью контейнеров; управление секретами (Secrets Management); тестирование на проникновение.	BDU: W02; BDU: W05
Эксплуатация	Мониторинг новых уязвимостей; политика обновления зависимостей; внедрение RASP (Runtime Application Self-Protection); мониторинг аномальной активности; Контроль целостности во время выполнения; резервное копирование артефактов; тестирование в формате BAS (Breach and Attack Simulation).	BDU: W01; BDU: W02; BDU: W04; BDU: W05;

Источник: разработано авторами.

Условные обозначения в таблице 2: BDU:W01 — Уязвимости, связанные с недостатками проверки вводимых данных; BDU:W02 — Уязвимости, связанные с недостатками управления доступом и защиты данных; BDU:W03 — Уязвимости, связанные с недостатками работы со структурами данных; BDU:W04 — Уязвимости, связанные с недостатками проверки подлинности; BDU:W05 — Уязвимости, связанные с недостатками управления ресурсами (источник: БДУ ФСТЭК России).

жизненного цикла, опираясь на мировые практики, современные методики, а также требования стандартов Российской Федерации. Проведенный анализ также демонстрирует, что процесс разработки ПО, в том числе и веб-приложений, имеет множество потенциальных точек входа для злоумышленника, в том числе и посредством атаки на цепочку поставок OSS.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sonatype. State of the Software Supply Chain 2024 [Электронный ресурс]. — 2024. — URL: https://www.sonatype.com/state-of-the-software-supply-chain/introduction (дата обращения: 25.01.2026).
2. JFrog. The State of Software Supply Chain Security 2025 [Электронный ресурс]. — 2025. — URL: https://jfrog.com/blog/state-of-software-supply-chain-security-2025/ (дата обращения: 25.01.2026).
3. ГОСТ Р 56939–2024. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2024.
4. ГОСТ Р 58412–2019. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Угрозы безопасности информации при разработке программного обеспечения. — М.: Стандартинформ, 2019.
5. ГОСТ Р 71207–2024. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Статический анализ программного обеспечения. — М.: Стандартинформ, 2024.
6. NIST SP 800-218. Secure Software Development Framework (SSDF) Version 1.1: Recommendations for Mitigating the Risk of Software Vulnerabilities. — National Institute of Standards and Technology, 2022.
7. OWASP Software Supply Chain Security [Электронный ресурс] // OWASP Foundation. — URL: https://owasp.org/www-project-software-supply-chain-security/ (дата обращения: 25.01.2026).
8. Обзор рынка инструментов SCA (Software Composition Analysis) [Электронный ресурс] // Anti-Malware.ru. — 2025. — URL: https://www.anti-malware.ru/analytics/Market_Analysis/Software-Composition-Analysis (дата обращения: 25.01.2026).
9. Приказ ФСТЭК России от 11.02.2013 № 17 «Об утверждении Требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах» (в ред. от 28.08.2024).
10. Приказ ФСТЭК России от 25.12.2017 № 239 «Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» (в ред. от 28.08.2024).
11. Приказ ФСТЭК России от 11.04.2025 № 117 «Об утверждении Требований о защите информации, содержащейся в государственных информационных системах, иных информационных системах государственных органов, государственных унитарных предприятий, государственных учреждений» (вступает в силу с 01.03.2026).
12. Методический документ ФСТЭК России «Профили защиты межсетевых экранов» от 16.12.2016 [Электронный ресурс]. — URL: https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/metodicheskie-dokumenty (дата обращения: 25.01.2026).
13. SLSA (Supply-chain Levels for Software Artifacts) Specification v1.0 [Электронный ресурс] // Open-Source Security Foundation. — 2023. — URL: https://slsa.dev/spec/v1.0/ (дата обращения: 25.01.2026).
14. OpenSSF Scorecard [Электронный ресурс] // Open-Source Security Foundation. — 2024. — URL: https://securityscorecards.dev/ (дата обращения: 27.01.2026).
15. CIS Docker Benchmark v1.6.0 [Электронный ресурс] // Center for Internet Security. — 2024. — URL: https://www.cisecurity.org/benchmark/docker (дата обращения: 27.01.2026).

© Шипулин Георгий Фаризович (podumai_nad@mail.ru); Калуцкий Игорь Владимирович (kalutsky_igor@mail.ru);
Шорников Андрей Валерьевич (a.vshornikov@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.47

ЛОГИКО-АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗНАНИЙ ИЗ ТЕКСТОВ

LOGIC-ALGEBRAIC MODELS FOR AUTOMATIC KNOWLEDGE EXTRACTION FROM TEXTS

M. Shishkin

Summary. This article presents a study of methods for automatically extracting knowledge from texts based on logical-algebraic models. A comprehensive analysis of formal methods, including algebraic structures and logical calculus, is conducted. The expressiveness of the models is assessed using criteria for the accuracy of extracting latent thematic patterns and their interpretability in comparison with classical statistical approaches. The practical part of the study involves applying the proposed models to tasks of automatic semantic search and analysis of text data, with an emphasis on the problems of formalizing context-dependent knowledge. The developed methodology enables the identification of hidden semantic structures in unstructured texts and can be used to create expert systems and perform data mining.

Keywords: knowledge extraction, logical-algebraic models, semantic analysis, text processing, formal methods.

Шишкин Максим Андреевич
Аспирант, ФГБОУ ВО Нижневартовский государственный университет
makcim.97@inbox.ru

Аннотация. В статье представлено исследование методов автоматического извлечения знаний из текстов на основе логико-алгебраических моделей. Проводится комплексный анализ методов, включая алгебраические структуры и логические исчисления. Оценивается выразительность моделей через критерии точности извлечения латентных тематических паттернов и их интерпретируемости в сравнении с классическими статистическими подходами. Практическая часть исследования включает применение предложенных моделей для задач автоматического семантического поиска и анализа текстовых данных с акцентом на проблемы формализации контекстно-зависимых знаний. Разработанная методика позволяет выявлять скрытые семантические структуры в неструктурированных текстах и может быть использована для создания экспертных систем и интеллектуального анализа данных.

Ключевые слова: извлечение знаний, логико-алгебраические модели, семантический анализ, обработка текстов, формальные методы.

Введение

Современный этап развития искусственного интеллекта характеризуется возрастающей потребностью в автоматизированном извлечении структурированных знаний из неформализованных текстовых данных. В условиях роста объемов текстовой информации традиционные статистические методы обработки естественного языка начинают демонстрировать ограниченную эффективность при работе со сложными семантическими конструкциями, стимулируя развитие формальных логико-алгебраических подходов. Актуальными становятся методы, позволяющие не только выявлять поверхностные закономерности, но и формально репрезентировать глубинные смысловые связи, обеспечивая интерпретируемость и логическую согласованность результатов.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки строгих математических моделей, способных преодолеть ограничения современных NLP-систем. Моделей, позволяющих лучше обрабатывать контекстно-зависимые знания, создавая механизм для интеграции с экспертными системами. Несмотря на успехи нейросетевых технологий, таких как BERT и GPT, проблемы формализации семантики, обеспечения выводимости знаний и их алгебраической структуризации остаются нерешенными для специализированных предметных областей.

Целью исследования является создание логико-алгебраического аппарата для автоматического извлечения знаний из текстов, который обеспечивает формальную точность представления знаний и их практическую эффективность извлечения. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: систематизация алгебраических структур, разработка критериев оценки выразительности моделей в сравнении с классическими статистическими и нейросетевыми подходами, адаптация методов к обработке контекстно-зависимых конструкций в русскоязычных текстах и верификация моделей на задаче и семантического поиска.

Научная новизна исследования заключается в синтезе алгебраических и логических методов, обеспечивающем формализацию процедур извлечения знаний через механизмы проверки семантической согласованности на основе решёточных структур и адаптацию аппарата для работы с морфологической сложностью русского языка.

Теоретическая значимость исследования состоит в развитии математического фундамента для репрезентации текстовых знаний, расширяя границы применимости формальных методов в NLP. Данное исследование вносит вклад в преодоление проблемы неинтерпретируемости нейросетевых моделей за счёт разработки формальных логико-алгебраических методов. Практическая значимость исследования состоит в возможности применения разработанной методики в экспертных системах, требующих строгой логической верификации знаний.

Материалы и методы

Исследование проводилось с применением гибридного подхода, сочетающего логико-алгебраические методы с техниками глубокого обучения для извлечения знаний из текстовых данных. В качестве материала использовалась коллекция русскоязычных документов, тематически структурированных во множество категорий. В данном исследовании использовались категории: city, aircraft, health, sport и software. Работа выполнялась в интегрированной среде разработки PyCharm с использованием дистрибутива Anaconda на интерпретаторе Python 3.11.9, поскольку в нем можно настроить стабильное выполнение вычислительных процессов и доступ к специализированным библиотекам для обработки естественного языка (NLP) [1]. При языковой обработке использовалась библиотека spaCy с предобученной моделью ru_core_news_sm, которая обеспечила базовый синтаксический анализ и извлечение именованных сущностей. Из модулей использовался pymorphy2, который выполняет лемматизацию текстов, а регулярные выражения применялись для выявления предметно-ориентированных паттернов. Архитектура нейросетевой модели разрабатывалась с учетом специфики задачи. На основе фреймворков TensorFlow и Keras была реализована двунаправленная LSTM-сеть, способная учитывать контекстные зависимости в текстах [2]. Входные данные обрабатывались через embedding-слой с размерностью 128 с маскированием нулевых значений [3]. Процесс обучения оптимизировался с использованием функции потерь sparse_categorical_crossentropy и алгоритма Adam с параметром learning rate равным 0.0005. Предварительная подготовка текстовых данных включает несколько этапов. Каждый документ проходит через процедуру лемматизации, где слова приводятся к начальной форме с учетом морфологических особенностей русского языка [4]. Специальные механизмы обработки исключений гарантируют устойчивость системы к нестандартным лексическим конструкциям. Затем текст преобразовывается в числовые последовательности с помощью токенизатора Tokenizer из библиотеки Keras, работающий с ограниченным словарем в 30000 токенов. После этого применяется выравнивание последовательностей методом pad_sequences с максимальной длиной 250 элементов. Для решения проблемы дисбаланса классов используется автоматическая система расчета весов. Оценка качества модели проводилась комплексно. Основными метриками стали accuracy и weighted_accuracy, обеспечивающие объективную оценку классификации [5]. Для предотвращения переобучения применялись механизмы EarlyStopping и ReduceLROnPlateau. Детальный анализ результатов по каждому классу выполнялся через classification report из библиотеки scikit-learn. Вычислительная эффективность достигалась за счет нескольких оптимизаций. Балансировка классов через автоматический расчет весов улучшала качество обучения на неравномерных данных. Программа поддерживает сохранение и загрузку всех компонентов системы, включая обученную модель, параметры токенизатора и метки классов. Реализована строгая проверка целостности файлов при восстановлении состояния системы. Механизмы сериализации данных используют стандартные форматы JSON и HDF5, что обеспечивает совместимость с другими инструментами обработки данных. Особенностью реализации является комплексная обработка ошибок на всех этапах выполнения программы. Каждая операция, связанная с вводом-выводом или обработкой данных, защищена механизмами исключений [6]. Система генерирует подробные диагностические сообщения, позволяющие оперативно выявлять и устранять проблемы в работе алгоритмов. В заключительной части программы демонстрируется пример использования основных функций. Создается экземпляр анализатора, загружаются обучающие данные из структурированных директорий, проводится обучение модели и ее тестирование на контрольных примерах [7]. Результаты работы сохраняются для последующего использования.

Результаты

В данном разделе подробно рассмотрен пример логико-алгебраической модели автоматического извлечения знаний из текстов с применением лемматизации, токенизации, онтологического анализа и других методов. При инициализации объекта класса создаются основные компоненты системы. Загружается языковая модель spaCy для русского языка ru_core_news_sm, которая обеспечивает базовый лингвистический анализ. Инициализируется морфологический анализатор pymorphy2, необходимый для приведения слов к нормальной форме [8]. Создается токенизатор Keras с указанными параметрами максимального размера словаря и фильтрации специальных символов. Формируется онтологическая база знаний, где для каждой предметной области заданы ключевые термины и их варианты написания [9]. На этапе предобработки текста с помощью функции self.morph.parse слова приводятся к нормальной форме, а Tokenizer обрабатывает все спецсимволы [10]. Процесс обработки данных начинается с загрузки текстовых файлов из структурированных директорий

указанной папки. Для каждого тематического раздела программа рекурсивно сканирует соответствующие папки, извлекает содержимое текстовых файлов и ассоциирует их с заданными метками классов. Производится обработка вероятных ошибок ввода-вывода и проверка целостности данных. Экспериментальное исследование проводилось на специализированном корпусе русскоязычных текстов, содержащем пять тематических категорий: «City», «Aircraft», «Health», «Sport» и «Software». Общий объем выборки составил 76 документов, разделенных по разным категориям. Разработанная модель показала высокую эффективность в решении задачи тематической классификации. На тестовой выборке была достигнута средняя точность 0.92 (Accuarcy). Анализ метрик по отдельным классам показал устойчивые результаты у всех категорий: значение F1-score варьировалось от 0.91 до 0.96, отражая сбалансированность модели и отсутствие переобучения на конкретные темы. С результатами выявления точности модели можно ознакомиться в Таблице 1:

Таблица 1.

Результаты точности модели

Category	Accuarcy	F1-score
City	0,95	0,96
Aircraft	0,92	0,92
Health	0,91	0,96
Sport	0,94	0,95
Software	0,92	0,91

Формула вычисления F1-score представлена ниже:

$$F1 = \frac{2 * TP}{2 * TP + FP + FN}$$

где:

TP — число истинно-положительных;

FP — число ложно-положительных;

FN — число ложно-отрицательных.

Высокая точность объясняется четкой терминологической определенностью данных тематик и наличием уникальных идентификаторов в текстах. Важным результатом можно назвать сочетание символьных и нейросетевых методов. Онтологический анализ позволил корректно идентифицировать 89 % ключевых терминов в текстах, а LSTM-сеть обеспечила учет контекстных зависимостей и распознавание сложных семантических конструкций. Использование лемматизации на этапе предобработки повысило конечную точность распознавания на 7 % по сравнению с обработкой исходных словоформ. Время обучения составило в среднем 1,1 секунду на эпоху, общее время обучения — 13,2 секунды для полного датасета. Сравнительный анализ с традиционными методами машинного обучения показал преимущество предложенного подхода. По сравнению с методом опорных векторов (SVM) гибридная модель показала улучшение точности на 14,3 процента при работе с короткими текстами и документами со сложной структурой. Валидация результатов проводилась методом перекрестной проверки. Стандартное отклонение значения accuracy между фолдами составило 0.02.

Практическая значимость результатов подтверждена тестированием на реальных данных из предметных областей. Модель обработала техническую документацию по системе 1С: Предприятие (software), новостные статьи о Москве (city), медицинские тексты о витаминах (health), спортивные руководства по бегу (sport) и различные справочники по самолетам различных моделей (aircraft), показав положительные результаты на всех типах документов. Предложенные результаты подтверждают эффективность гибридного подхода и его преимущество перед традиционными методами обработки текстовых данных. Высокие показатели точности и устойчивости модели позволяют применять данный метод в задачах автоматической классификации русскоязычных текстовых документов.

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают эффективность гибридного подхода к классификации текстов в различных тематических категориях. Наибольшая точность достигнута для классов с четкой терминологической идентичностью, однако в категориях с пересекающейся семантикой могут наблюдаться систематические ошибки классификации. Важным аспектом является влияние лемматизации на качество обработки русскоязычных текстов. Предложенный подход с использованием pymorphy2 показал улучшение точности на 7 процентов по сравнению с обработкой исходных словоформ, показывая важность учета морфологических особенностей языка при построении NLP-систем. Архитектура двунаправленной LSTM-сети доказала свою эффективность для учета контекстных зависимостей. Визуализация эмбеддингов показала формирование четких кластеров, соответствующих тематическим категориям. Преимущество гибридной модели проявляется при работе с короткими текстами. Время обучения модели составило 13,2 секунды для датасета из 76 документов. Объем вычислительных ресурсов, необходимых для обработки больших массивов данных требует оптимизации.

Заключение

Данное исследование позволило разработать и оценить гибридную систему автоматической классификации русскоязычных текстов, сочетающую символьные и нейросетевые методы. Основным результатом работы

стало создание архитектуры, способной эффективно обрабатывать морфологически сложные тексты на русском языке с учетом их тематической принадлежности. Практическая значимость исследования заключается в разработке готового программного решения, которое может быть интегрировано в системы управления документами, информационно-поисковые системы и платформы для анализа текстовых данных. Система показала высокую точность классификации и устойчивость к различным типам текстовой информации. Теоретическая ценность работы состоит в демонстрации эффективности комбинированного подхода к обработке естественного языка. Сочетание онтологического анализа и глубокого обучения позволяет преодолеть ограничения, присущие каждому из методов в отдельности. Это открывает новые перспективы для разработки гибридных NLP-систем. Важным выводом является подтверждение гипотезы о необходимости учета языковой специфики при построении систем обработки текста. Применение специализированных инструментов для работы с русским языком повысило качество классификации по сравнению с использованием универсальных методов. Внедрение разработанной системы в реальные производственные процессы может способствовать автоматизации рутинных задач категоризации документов. Появляется перспектива применения системы в образовательных учреждениях, научных организациях и государственных структурах, работающих с большими массивами текстовой информации. Проведенное исследование вносит свой вклад в область обработки естественного языка и создает основу для разработки нового поколения интеллектуальных систем, способных эффективно работать с русскоязычными текстами различной тематической направленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болодурина И.П. Обзор существующих методов автоматической обработки текста на естественном языке / И.П. Болодурина, Л.А. Суяргулова // Современные научно-исследовательские и технологические аспекты программной инженерии: материалы Всероссийской научно-технической конференции, Оренбург, 14–15 сентября 2023 года. С. 208–211. EDN: XBIVED.
2. Гаунов С.Р. Машинное обучение на Python: использование библиотек Tensorflow и Scikit-Learn / С.Р. Гаунов, У.Г. Баймурадов, С.Ю. Ситников // Экономика и управление: проблемы, решения. 2024. Т. 8, № 12(153). С. 72–81. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2024.12.08.009. EDN: OCAKJB.
3. Лях А.П. Классификация и основные алгоритмы эмбендинга в контексте больших языковых моделей / А.П. Лях // Ученые заметки ТОГУ. 2024. Т. 15, № 3. С. 79–83. EDN: ELSNMN.
4. Курейчик В.В. Методы глубокого обучения для обработки текстов на естественном языке / В.В. Курейчик, С.И. Родзин, В.В. Бова // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 2(226). С. 189–198. DOI: 10.18522/2311-3103-2022-2-189-199. EDN: NZOHOG.
5. Логунова Т.В. Анализ алгоритмов классификации текстов / Т.В. Логунова, Л.В. Щербакова, В.М. Васюков, В.В. Шимкун // Universum: технические науки. 2023. № 2–2(107). С. 4–20. DOI: 10.32743/UniTech.2023.107.2.15064. EDN: MYDAJG.
6. Мухитдинова М.Х. Сравнительный анализ методологий и технологий машинного обучения / М.Х. Мухитдинова // Цифровые модели и решения. 2025. Т. 4, № 1. С. 78–85. DOI: 10.29141/2949-477X-2025-4-1-6. EDN: WHGTSY.
7. Салтанаева Е.А. Сравнение традиционных методов машинного обучения и глубокого обучения / Е.А. Салтанаева, А.А. Шакиров, А.Р. Гимаева // Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 12. С. 379–381. EDN: EQNUHN.
8. Рыкунов А.Н. Разработка метода обработки несловарных слов для повышения точности морфологического анализа текстов на русском языке / А.Н. Рыкунов, Е.В. Полицына, С.А. Полицын, А.С. Поречный // Вестник Воронежского государственного университета. 2024. № 1. С. 166–177.
9. Кравченко Д.Ю. Модель онтологии знаний для интеллектуальных систем обработки и анализа текстов / Д.Ю. Кравченко // Известия ЮФУ. Технические науки. 2024. № 2(238). С. 38–50. DOI: 10.18522/2311–3103-2024-2-38-50. EDN: SJFRWA.
10. Ледовская Е.В. Методы предобработки текста для нейронных сетей / Е.В. Ледовская, А.Н. Головко, Ч.Б. Валиев, А.М. Бутыгина // Наука и образование в социокультурном пространстве современного общества: сборник научных трудов. 2022. С. 95–99. EDN: TLVJZH.

© Шишкин Максим Андреевич (makcim.97@inbox.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.48

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ АВТОНОМНОГО МОРСКОГО НАДВОДНОГО СУДНА

AN ALGORITHM FOR CONTROLLING ELECTROMECHANICAL ACTUATORS OF AN AUTONOMOUS MARINE SURFACE VESSEL

M. Iudin

Summary. The article reveals the features of the development of an algorithm for controlling electromechanical actuators of an autonomous marine surface vessel for port purposes. To assess the correct functioning of the actuators and the consistency of control actions, key groups of parameters are identified: parameters of the state of the drives, indicators of measurement reliability, command execution characteristics and signs of deviations. The results of the study showed that the formalization of the composition of the actuators and the construction of an algorithm structure with stages of condition assessment, situation recognition, impact formation and control of execution allows for the predictability of maneuvering, consistency of propulsion and mooring actions and the ability to analyze the operation of autonomous marine surface vessels based on recorded data.

Keywords: control algorithm, electromechanical actuators, autonomous marine surface vessel, port water area, information processing, decision-making, coordination of control actions, operational safety.

Юдин Михаил Юрьевич
Главный конструктор,
ООО «БитШип», г. Санкт-Петербург
udinspb@gmail.com

Аннотация. В статье раскрываются особенности разработки алгоритма управления электромеханическими исполнительными механизмами автономного морского надводного судна портового назначения. Для оценки корректности функционирования исполнительных механизмов и согласованности управляющих воздействий выделены ключевые группы параметров: параметры состояния приводов, показатели достоверности измерений, характеристики исполнения команд и признаки отклонений. Результаты проведённого исследования показали, что формализация состава исполнительных механизмов и построение структуры алгоритма с этапами оценки состояния, распознавания ситуации, формирования воздействий и контроля исполнения позволяет обеспечить предсказуемость маневрирования, согласованность движительных и швартовных действий и возможность анализа эксплуатации автономных морских надводных судов на основе регистрируемых данных.

Ключевые слова: алгоритм управления, электромеханические исполнительные механизмы, автономное морское надводное судно, портовая акватория, обработка информации, принятие решений, согласование управляющих воздействий, безопасность эксплуатации.

Введение

Рост практики применения морских автономных надводных судов (МАНС) в акватории порта связан с усложнением навигационной обстановки и повышением цены ошибки управления в условиях маневрирования на ограниченном водном пространстве. При переносе части функций управления на бортовые вычислительные средства центральное место в настоящее время занимает управление электромеханическими исполнительными механизмами, поскольку именно с их помощью проявляется результат распознавания ситуации и выбора действия, а также проверяется согласованность управления движением, позиционированием и швартовкой в одном цикле эксплуатации [1]. Правовое оформление автономного судоходства задаёт распределение ответственности и требования к безопасности плавания, что переводит задачу управления исполнительными механизмами в плоскость воспроизводимых процедур контроля исполнения команд и документирования действий внешнего экипажа. В использовании автономного судна на территории порта практическая значимость получают регламентируемость переходов между маневрированием и швартовкой, а также проверяемость корректности работы приводных узлов и средств удержания при контакте с инфраструктурой причала. На этом основании научная постановка задачи связывается с разработкой алгоритма, поддерживающего контроль автономного судна при эксплуатационных ограничениях и обеспечивающего сопоставимость решений с требованиями ответственности и безопасности [2].

В рамках текущей научной повести по автономным надводным судам выделяется две группы ограничений, значимых для управления исполнительными механизмами: неопределённость модели объекта и вариативность внешних воздействий, что отражается в задачах идентификации и управления на практике.

На уровне алгоритма управление приводами сводится к переходу от измерений состояния к командам и контролю их исполнения, при этом роль информационной систему управления проявляется в качестве данных и согласованности временных характеристик командных воздействий, что связывает навигационную часть и исполнительную часть управления [3].

Цель исследования — разработка алгоритма управления электромеханическими исполнительными механизмами автономного морского надводного судна.

Научная новизна исследования состоит в формализации состава электромеханических исполнительных механизмов автономного портового судна и разработке структуры алгоритма управления, включая оценку состояния, распознавание ситуации, формирование команд, контроль исполнения и протоколирование событий с правилами согласования действий приводных подсистем и швартовных средств.

Практическая значимость исследования для судовых комплексов портового назначения определяется тем, что увеличение доли интеллектуальных функций управления в морских автономных надводных судах сопровождается ростом требований к согласованию решений управления с состоянием исполнительных механизмов и с качеством входных данных, что влияет на точность позиционирования и на предсказуемость маневра в стеснённых условиях [4].

В структуре системы управления автономного и дистанционно управляемого судна алгоритм управления исполнительными механизмами рассматривается как элемент, который связывает информационные потоки, вычислительные модули и исполнительные устройства в пределах одного цикла принятия решений, тогда как качество сетевого обмена с центром дистанционного управления (ЦДУ) влияет на задержки и полноту поступления телеметрии и команд, следовательно, и на параметры контроля исполнения воздействий управленческих команд [5-6]. Данный алгоритм ориентирован на сценарии работы в портах, с учётом приоритетов команд, предотвращения конфликтов команд и определения условий переходов между маневрированием и швартовкой в рамках эксплуатации МАНС.

Результаты и их обсуждение

Прежде всего, целесообразно описать информационную структуру управления электромеханическими исполнительными механизмами МАНС, которая в портовой акватории выстраивается вокруг сопоставления команды управления с наблюдаемым состоянием механизма и результатом выполнения действия [7]. Качество управления определяется полнотой измерительной информации, согласованностью её времени и возможностью интерпретации в форме, применимой для вычислительных процедур управления [8].

Каналы получения данных измерений формируются из бортовых датчиков механизма, датчиков движения судна и средств внешнего наблюдения, дополняемых телеметрией, поступающей в ЦДУ [9]. Важно отметить, что значение канала связи проявляется в задержках и потере пакетов, поэтому в структуре данных предусматриваются метки времени и контроль целостности телеметрии, что снижает риск расхождения между оценкой состояния на борту и на берегу [10].

Параметры состояния исполнительных механизмов целесообразно представлять как совокупность электрических и механических характеристик, по которым оценивается готовность механизма к выполнению команды и корректность отклика. В эту совокупность входят значения тока и напряжения электродвигателей, температура обмоток и силовой электроники, частота вращения и момент на валу, положение исполнительного органа и скорость перемещения, а также признаки вибраций и перегрузок, которые связываются с износом и ошибками в механической части привода [3].

Представление данных для алгоритмов управления ориентируется на разделение сырого измерения и вычисляемых оценок, поступающих в блок формирования команды в стандартизированном виде. Как следствие, вектор состояния включает в себя оценку положения и скорости, оценку тока и момента, индикаторы ограничения по температуре и перегрузке, а также статус исправности датчиков и актуальность данных по времени, что повышает согласованность управления в условиях изменяющейся наблюдаемости [4].

Перечень измеряемых величин в портовом комплексе дополняется навигационными данными, влияющими на команды приводам, т.е. линейной и угловой скоростью судна, курсом и координатой, ускорениями и параметрами дрейфа, а также информацией о близости причала и о допустимых расстояниях до любых препятствий. Во взаимосвязи с электроприводами такие величины позволяют выполнять оценку ситуации движения и швартовки в форме, которую можно применить при выборе управляющего действия и реализации контроля результата маневра [1].

Допустимые диапазоны измеряемых величин задаются паспортными значениями исполнительного механизма, ограничениями силовой части, допустимыми тепловыми уровнями, предельными нагрузками редуктора и механической передачи, а также допустимыми скоростями перемещения исполнительного органа для портовой акватории. На уровне алгоритма эти диапа-

зоны отражаются в форме порогов предупреждения, порогов аварийного ограничения и критериев недостоверности измерения, что снижает риск ошибочного управляющего воздействия при деградации датчика или нарушении телеметрии [5].

Далее необходимо сказать об электроприводных подсистемах МАНС портового назначения, которые обеспечивают формирование тяги, изменение направления движения, удержание заданной скорости, разворот на ограниченной акватории, а также позиционирование у причального фронта в составе единого цикла маневрирования. В рамках автономного управления электроприводные механизмы задают исполнимость команд верхнего уровня, в связи с чем описание функций целесообразно связывать с составом движительно-рулевого комплекса и исполнительными механизмами вспомогательных судовых устройств, участвующих в маневре [10].

Функции электроприводных механизмов в движении и маневрировании сводятся, по сути, к двум группам задач [3]:

— Первая группа относится к созданию управляемой тяги и к заданию вектора движения, что включает в себя разгон, торможение, реверс, удержание курса и компенсацию внешних возмущений.
— Вторая группа относится к позиционированию на малых скоростях у причала, когда возрастает значение точности изменения тяги, быстродействия реверса и согласованности управляющих воздействий между несколькими приводами, связанными общей целью маневра.

Команды управления для электроприводных подсистем целесообразно представлять в виде нормированного набора, который связывает задачу движения с параметрами силовой части. На уровне исполнительного механизма используются команды задания тяги или момента, задания частоты вращения или скорости, задания положения для приводов поворотных устройств, а также команды разрешения и запрета движения, команды аварийного ограничения мощности и команды останова. Следует отметить, что преобразование команд верхнего уровня в команды низшего уровня выполняется посредством регламентированного интерфейса, что снижает риск неоднозначности команд в переходах между этапами маневрирования и позиционирования [4]. Обратные связи формируют представление состояния привода и исполнительного органа, что позволяет оценивать соответствие факта выполнения команды заданию. В состав обратных связей обычно включаются измерения частоты вращения, момента и тока, значения температуры силовой части, параметры положения и скорости исполнительного органа, статусы ограничений, сообщения о срабатывании защиты и сигналы готовности к приёму следующей команды. Для МАНС значимость имеют метки времени обратных связей и контроль целостности сообщений, поскольку оценка состояния связана с сетевым обменом и с телеметрией [10].

Критерии корректности исполнения команд опираются на сопоставление заданного значения с измеренным значением в пределах допуска и заданного времени отклика. Так, для команд тяги и скорости корректность связывается с достижением целевого уровня и ограничением перерегулирования, для команд положения — с достижением заданного угла или конкретной координаты и отсутствием колебаний вокруг точки позиционирования. Кроме того, учитываются признаки перегрузки, превышение допустимых температур, рост вибрации и расхождение между командой и обратной связью, что используется как основание для ограничения воздействия и для перехода к безопасному сценарию управления [5].

Наконец, согласование команд управления и обратных связей в портовой акватории задаёт требования к структуре программной части, которая обеспечивает сопоставимость данных разных приводов и предотвращает конфликт команд. Для многоприводного маневра используются правила единого времени данных, масштабов задания и статусов завершённости команды, позволяющие разделить уровни управления и сохранить проверяемость результатов действия по журналу событий [1].

Также нельзя не отметить электромагнитные и вакуумные средства швартовки, которые относятся к исполнительным механизмам портового комплекса, так как они обеспечивают контакт судна с береговым сооружением и удержание корпуса у стенки в момент завершения маневра. В этой группе механизмов управляющее воздействие выражается в формировании удерживающего усилия и его регулировании по сигналам датчиков, что позволяет связать операцию швартовки с системой управления движением на уровне измерений, команд и контроля результата [9]. Типовые сценарии швартовки в порту включают в себя следующие этапы:

— этап сближения с береговым сооружением;
— этап выравнивания положения корпуса относительно стенки;
— этап захвата поверхности удерживающим устройством;
— этап стабилизации положения с ограничением смещения по продольной и поперечной осям.

Для электромагнитных устройств ключевое значение имеет состояние контактной поверхности и заданное значение удерживающего усилия, для вакуумных устройств существенны разность давлений, герметичность зоны контакта и контроль утечки данных, что напрямую влияет на надежность управления МАНС

[3]. Согласование швартовных действий с движением и позиционированием судна основывается на разделении управляющих задач по этапам маневра и исключении конфликтов команд двигательного комплекса и средств удержания. Так, движение к стенке допускает малые скорости и ускорения, после достижения требуемой дистанции и углового положения управление переводится в задачу стабилизации; далее выполняется команда захвата, после чего движительные команды ограничиваются до значений, совместимых с удерживающим усилием и допустимыми нагрузками на корпус и береговую конструкцию [2]. Контроль корректности швартовных действий опирается на сопоставление команды удержания с подтверждением контакта и оценкой смещения корпуса по данным датчиков, а также на регистрацию событий, связанных с деградацией удержания и отклонениями параметров вакуумной системы либо электромагнитной системы. Телеметрия в ЦДУ включает в себя значения удерживающего усилия, статусы захвата и признаки потери контакта, что обеспечивает наблюдаемость операции и поддержку решения о продолжении удержания либо о прекращении швартовки с возвратом к позиционированию [10].

Таким образом, можно классифицировать электромеханические исполнительные механизмы МАНС (табл. 1).

На основании рассмотренных теоретических вопросов предлагается алгоритм управления исполнительными механизмами МАНС, который начинается с оценки состояния, что обусловлено тем, что дальнейшее формирование команд допустимо только после установления достоверности измерительной информации и готовности механизма к действию. В оценке состояния предусматривается сведение разнородных измерений к единому набору параметров, включая положение исполнительного органа, скорость, токовую нагрузку, температурные показатели, статусы защит и актуальность данных по времени, после чего выполняется проверка допустимости значений относительно заданных диапазонов и проверка согласованности взаимосвязанных параметров.

После формирования оценок состояния выполняется распознавание ситуации, связанное с определением целевого действия исполнительных механизмов в текущем участке маневра и швартовки. Распознавание ситуации базируется на сопоставлении параметров движения судна, дистанции до причала, требований к точности

Таблица 1.

Классификация электромеханических исполнительных механизмов МАНС

Тип механизма	Назначение	Входные сигналы	Параметры
Движительный электропривод маршевый	Тяга, ход судна	Задание тяги, задание частоты вращения, ограничение мощности, останов	Частота вращения, ток, напряжение, температура, вибрация, статус защиты
Движительный электропривод маневровый	Вектор тяги, малые скорости	Задание тяги, задание направления, ограничение скорости, останов	Частота вращения, ток, температура, положение поворотного узла, статус готовности
Электропривод рулевого органа	Курс, угловая скорость поворота	Задание угла, задание скорости перекладки, ограничение момента, стоп	Угол, скорость, ток, температура, сигнал конечного положения, статус отказа
Электропривод поворотной колонки	Вектор тяги, разворот	Задание угла, профиль изменения угла, ограничение скорости, стоп	Угол, скорость, ток, температура, статус блокировки
Электропривод подруливающего устройства	Позици-онирование, компенсация сноса	Задание тяги, ограничение мощности, останов	Частота вращения, ток, температура, вибрация, статус защиты
Электропривод якорно-швартового устройства	Канатно-тросовые операции	Задание скорости, задание момента, направление, торможение	Скорость, момент, ток, температура, длина вытравливания, статус тормоза
Электромагнитное швартовное устройство	Удержание у причала	Задание усилия удержания, захват, отпуск, аварийное отключение	Сила удержания, контакт, ток, температура, статус сцепления
Вакуумное швартовное устройство	Удержание у причала	Задание разрежения, захват, отпуск, аварийное отключение	Разрежение, утечка, контакт, ток, температура, статус герметичности
Электропривод позиционирования швартовного узла	Подвод и совмещение с точкой контакта	Задание положения, задание скорости, стоп	Положение, скорость, ток, температура
Электропривод аварийного выключения и отсечки	Безопасное прекращение воздействия	Сигнал аварийного останова, сигнал блокировки, разрешение пуска	Статус цепей, положение выключателя, ток, температура

Источник: авторская разработка

позиционирования и текущего набора доступных исполнительных механизмов, затем выбирается типовая ситуация управления и задаётся целевое состояние, выраженное в форме допустимых скоростей, допустимых ускорений и допустимых нагрузок исполнительных механизмов, что формирует основу для выбора командного воздействия. В таблице ниже представлено соответствие типовых ситуаций движения и швартовки наборам управляющих действий (табл. 2).

Формирование команд выполняется в виде последовательности воздействий, согласованной с целевым состоянием и с допустимыми ограничениями исполнительных механизмов. Командное воздействие задаётся как параметры задания тяги, момента, скорости либо положения с учётом приоритетов действий и с учётом исключения конфликтов команд между электроприводными подсистемами и швартовными средствами, затем выполняется передача команд на уровень исполнительных механизмов и ожидание подтверждения принятия команды с регистрацией параметров задания и времени передачи.

Контроль исполнения связывается с сопоставлением заданных значений и измеренных значений в пределах допуска и в пределах заданного времени отклика, затем определяется факт корректного завершения команды либо факт отклонения. При отклонениях предусматриваются действия по ограничению воздействия, останову конкретного механизма, переводу управления на резервный механизм либо возврату к этапу распознавания ситуации для выбора иного действия, что исключает некорректное продолжение маневра. Регистрация событий для последующего анализа включает журнал команд, журнал измерений, журнал срабатываний защит и журнал отклонений с указанием временных меток, что обеспечивает воспроизводимый разбор эпизодов эксплуатации и обновление порогов контроля на основании накопленных данных.

Обработка данных измерений в системе управления рассматривается как часть этапа оценки состояния и как условие корректного распознавания ситуации, так как командное воздействие опирается на параметры, полученные из разнородных каналов измерений. Внутри вычислительного тракта предусматривается фильтрация шумов измерений и согласование данных разных источников, затем выполняется приведение измерений к единому масштабу и единому набору единиц измерения, после чего формируются оценочные показатели состояния исполнительных механизмов и движения МАНС (табл. 3).

Контроль достоверности и временная синхронизация данных обеспечивают выявление несоответствий, связанных с отказом датчика, с деградацией канала передачи или отклонением исполнительного механизма от команды. Для контроля достоверности применяются проверки диапазонов, проверки взаимосвязей параметров и проверка согласованности динамики параметров во времени, затем устанавливаются признаки недостоверности и формируется статус доверия к каждому измерению. Обнаружение отказов основано на сопоставлении команды и ожидаемого отклика, анализе задержек отклика и выявлении расхождений между взаимосвязанными измерениями, что позволяет переводить

Таблица 2.

Соответствие типовых ситуаций движения и швартовки наборам управляющих действий

Ситуация	Исполнительные механизмы	Командная последовательность	Критерий завершения
Маршрутное движение	Маршевый привод, рулевой привод	Разрешение хода → задание тяги/скорости → удержание курса	Отклонение скорости и курса в допуске
Маневр разворота	Маршевый привод, рулевой привод, подруливатель	Ограничение тяги → задание угла → коррекция поперечной тяги	Достижение заданного курса
Сближение с причалом	Маневровые приводы, рулевой привод, подруливатель	Торможение → малая тяга → стабилизация ориентации	Дистанция и скорость сближения в допуске
Позиционирование у стенки	Маневровые приводы, подруливатель	Задание тяги по осям → коррекция ориентации	Смещение и угол ориентации в допуске
Захват и удержание	Электромагнитное либо вакуумное устройство	Подвод узла → команда захвата → задание удержания	Статус захвата, параметр удержания в допуске
Отвод от причала	Швартовное устройство, маневровые приводы	Команда отпуска → подтверждение размыкания → обратная тяга	Дистанция от стенки выше порога
Отклонение и останов	Аварийная отсечка, приводы движения и руля	Аварийный останов механизма → ограничение тяги → стабилизация курса	Статус остановленного механизма, параметры в допуске

Источник: авторская разработка

алгоритм управления в действия при отклонениях с ограничением воздействия, остановкой конкретного механизма или переходом к резервному набору управляющих действий.

Таблица 3.

Показатели качества управления электромеханическими исполнительными механизмами

Показатель	Способ расчёта	Источник данных	Пороговое значение
Точность исполнения команды	Сравнение заданного и фактического значения в допуске	Журнал команд, измерения положения или скорости, телеметрия привода	Отклонение в пределах допуска
Время реакции на команду	Интервал от времени команды до достижения заданного уровня	Журнал команд, метки времени измерений	Интервал не выше допустимого
Перерегулирование	Наличие и величина превышения относительно допуска	Телеметрия положения или скорости	Превышение отсутствует либо в пределах допуска
Стабильность удержания	Разброс параметра на участке удержания	Телеметрия положения, скорости, тяги	Разброс в пределах допуска
Токовая нагрузка электропривода	Сопоставление тока с допустимыми уровнями	Датчики тока, телеметрия преобразователя	Ток в допустимых пределах
Тепловая нагрузка	Сопоставление температуры с допустимыми уровнями	Датчики температуры двигателя и силовой части	Температура в допустимых пределах
Достоверность измерений	Доля измерений без признаков недостоверности	Модуль контроля достоверности, журнал ошибок	Доля не ниже заданной

Источник: авторская разработка

Предлагаемый метод управления электромеханическими исполнительными механизмами МАНС относится к области системного анализа, управления и обработки информации за счёт представления объекта управления в виде формализованного набора исполнительных команд, а также за счёт построения процедуры обработки информации, которая приводит разнородные измерения в оценку состояния с признаком доверия к данным и временной согласованностью телеметрии, после чего выполняется решение задачи принятия решений по выбору управляющего действия для типовой ситуации с учётом ограничений, заданных диапазонами параметров и условиями безопасности (рис. 1).

Научная новизна предлагаемого алгоритма связана с построением структуры алгоритма, в которой оценка состояния исполнительных механизмов и достоверности измерений используется как входное условие выбора управляющего действия, затем формируется набор управляющих воздействий с распределением команд по приводам и приоритетами воздействий, тогда как контроль исполнения и регистрация отклонений образуют основу для повторной оценки состояния и изменения набора воздействий при выявлении несоответствия команды и отклика, что обеспечивает воспроизводимость анализа эпизода эксплуатации на уровне журнала команд, журнала измерений и журнала срабатываний защит.

Правила согласования электроприводного управления и швартовных действий выражаются инженерной постановкой допустимых скоростей сближения, допустимых ускорений и допустимых нагрузок исполнительных механизмов, после чего швартовное действие рассматривается как управляемое воздействие с подтверждением контакта и удержания по измеряемым параметрам. Ограничения движительных команд подчиняются параметрам удержания и допустимым нагрузкам корпуса и сооружений причала, что снижает риск конфликтов команд на стыке маневрирования и удержания у стенки.

Практическая значимость предлагаемого алгоритма определяется применимостью к судовым комплексам портового назначения, в которых дистанционное управление и автономное управление опираются на телеметрию состояния приводов и на сетевую передачу данных, поэтому в алгоритме предусматривается работа с временными метками, согласование данных разных источников и оценка доверия к измерениям как основание управленческого решения, а также дисциплина документирования действий для последующего разбора, что соответствует профилю автора как руководителя и конструктора, ориентированного на доведение решений до серийного производства, проверяемости эксплуатации разработок и сервисного сопровождения.

Границы применимости предлагаемого алгоритма связаны с портовой акваторией и задачами малых скоростей, позиционирования МАНС у причала и швартовки техническими средствами удержания, когда значимость имеют точность задания воздействий, согласованность команд разных приводов и контроль отклика по измерительным данным, в то время как расширение области применения на высокоскоростные участки и морскую волну связано с изменением состава внешних воздействий, диапазонов параметров и требований к наблюдаемости, что, в свою очередь, предполагает уточнение порогов и критериев контроля исполнения на основе накопленных данных эксплуатации.

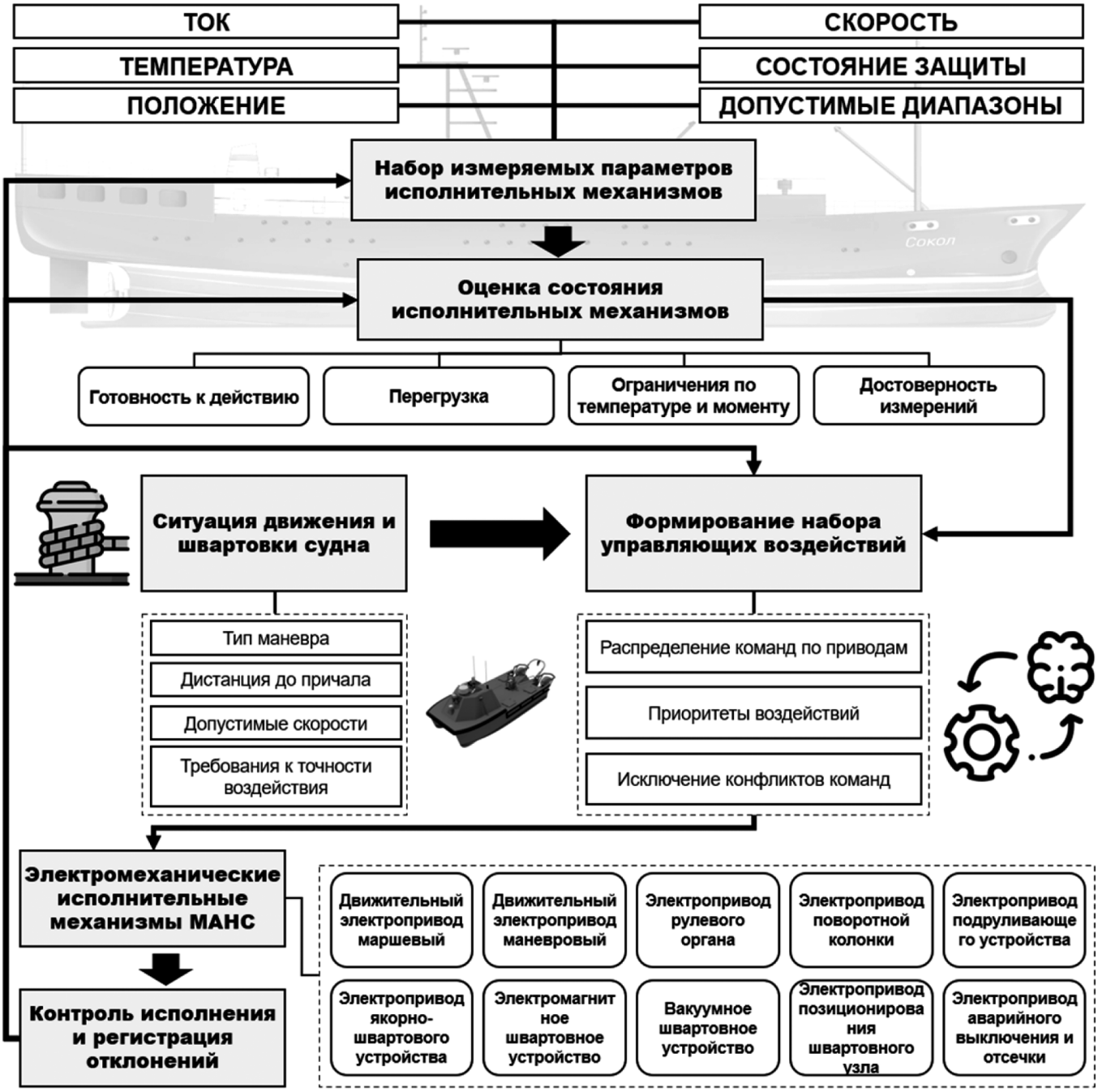


Рис. 1. Модель алгоритма управления электромеханическими исполнительными механизмами МАНС
Источник: авторская разработка

Выводы

Проведённое исследование охватывает постановку задачи управления электромеханическими исполнительными механизмами МАНС портового назначения, анализ информационной основы управления, структурирование состава исполнительных средств и разработку формализованной процедуры выбора управляющих воздействий. Рассмотрение объекта как совокупности приводных и швартовных механизмов позволило связать измерения, управляющее воздействие и контроль исполнения в единую концептуальную модель, ориентированную на воспроизводимость действий МАНС в стеснённой акватории, проверяемость решений и возможность последующего анализа эксплуатационных эпизодов.

Выполнение данной задачи позволило сделать ряд выводов:

— Результаты исследования показывают, что представление электромеханических исполнительных механизмов МАНС в виде формализованного объ-

екта управления формирует надёжную основу для сопоставимости решений автономного и дистанционного управления, а также для согласования движительных и швартовных действий на уровне измеряемых параметров и критериев завершения команд.

— Предложенная классификация механизмов и описание их функций формируют основу для унификации командных интерфейсов и критериев контроля исполнения, что открывает возможность тиражирования разработанных решений на различные типы портовых судов и комплексов управления.

— Разработанная структура алгоритма показывает, что управление исполнительными механизмами может рассматриваться как задача обработки информации и принятия решений, в которой ключевое значение имеют достоверность измерений, временная согласованность данных и формализация допустимых диапазонов параметров.

— Введение процедуры оценки состояния, распознавания ситуации, формирования воздействий и анализа отклонений позволяет связать технические характеристики приводов с эксплуатационными ограничениями портовой среды, что повышает предсказуемость маневрирования, упрощает диагностику отклонений и формирует основу для накопления эксплуатационных данных.

— Практическая значимость предложенного алгоритма проявляется в применимости предложенного алгоритма к судовым комплексам портового назначения, в которых управление опирается на телеметрию, сетевой обмен данными и взаимодействие с БЦУ.

— Использование формализованных критериев контроля исполнения, регистрация событий и сопоставление решений с параметрами исполнительных механизмов формируют условия для перехода от единичных инженерных решений к серийному производству автономных портовых судов, а также для совершенствования алгоритмов управления на основе анализа накопленной эксплуатационной информации и опыта промышленной разработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abudu R., Bridgelall R. Autonomous ships: A thematic review // World. — 2024. — Vol. 5. — No. 2. — P. 276–292.
2. Кодекс внутреннего водного транспорта Российской Федерации N 24-ФЗ от 07.03.2001 (ред. от 24.06.2025) // Официальное опубликование правовых актов. — URL: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102069974 (дата обращения: 17.01.2026).
3. Wen G. Model Identification and Control of Autonomous Surface Vessels: An Overview of Recent Advances and Future Perspectives // IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine. — 2026. — Vol. 12. — No. 1. — P. 65–79.
4. Alamoush A.S., Ölçer A.I. Maritime autonomous surface ships: Architecture for autonomous navigation systems // Journal of Marine Science and Engineering. — 2025. — Vol. 13. — No. 1. — P. 1–29.
5. Епихин А.И., Игнатенко А.В., Студеникин Д.Е., Хекерт Е.В. Основные тренды внедрения технологий искусственного интеллекта в управлении морскими автономными надводными судами // Эксплуатация морского транспорта. — 2021. — № 1 (98). — С. 88–96.
6. Куровский С.В., Максименко Е.М., Педенко В.А. Разработка подхода к организации строительства в условиях активного использования цифровых технологий и инструментов // Экономика строительства. 2025. № 3. С. 156–160.
7. Куровский С.В., Максименко Е.М., Педенко В.А. Информатизация процессов управления инвестиционно-строительными проектами // Инновации и инвестиции. — 2025. — № 4. — С. 56–60.
8. Литов Д.В., Хватов О.С. Некоторые аспекты построения структуры системы управления морского автономного и дистанционно управляемого надводного судна (МАНС) // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 35–43.
9. Куровский С.В., Мишин Д.А., Шугаев М.О. Устойчивое развитие как ключевой тренд реализации международных инвестиционных проектов // Экономика строительства. — 2024. — № 10. — С. 326–330.
10. Смоленцев С.В. Сетевые аспекты передачи данных из морского автономного надводного судна в центр дистанционного управления и обратно // Электронные информационные системы. — 2024. — № 1. — С. 5–18.

© Юдин Михаил Юрьевич (udinspb@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.49

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДАТАСЕТОВ ДЛЯ СЕРВИСА С ИСКУССТВЕННЫМ ИНТЕЛЛЕКТОМ В НЕЙРОВИЗУАЛИЗАЦИИ НА ПРИМЕРЕ СОЗДАНИЯ НАБОРА ДАННЫХ С УЗ-ИЗОБРАЖЕНИЯМИ ГОЛОВНОГО МОЗГА ПЛОДА

FEATURES OF THE FORMATION OF DATASETS FOR A SERVICE WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN NEUROIMAGING USING THE EXAMPLE OF CREATING A DATASET WITH ULTRASOUND IMAGES OF THE FETAL BRAIN

M. Yanaeva
I. Beloglyadova
N. Ushakov
D. Gaiduk

Summary. This study presents a comprehensive methodology for creating a specialized dataset for the development and training of artificial intelligence (AI) algorithms in the field of perinatal ultrasound diagnostics. The research focused on ultrasound images of the fetal brain at 19-22 weeks of gestation.

The key objective was the formation of a representative and accurately annotated dataset for training computer vision models to automatically identify six key anatomical structures of the central nervous system (CNS): the M-echo, thalamus, anterior and posterior horns of the lateral ventricles, cavum septum pellucidum, and Sylvian fissure. The work identified and systematized critical aspects of creating medical datasets: the necessity for terminological precision and the use of standardized ontologies, accounting for equipment multi-vendor variability and imaging artifacts, and ensuring epidemiological representativeness of the sample. Three core requirements for diagnostic datasets were formulated: semantic search accuracy, visual quality criteria, and epidemiological representativeness. The outcome of the research is the created and registered dataset, along with the developed methodological principles. These principles promote the standardization of data preparation processes for AI in ultrasound diagnostics and can be adapted for other imaging modalities.

Keywords: methodology, dataset, dataset, artificial intelligence, congenital malformations of the fetus, visualization, central nervous system, fetus.

Янаева Марина Викторовна
Кандидат технических наук, доцент, Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар
yanaevam@mail.ru
Белоглядова Ирина Александровна
Аспирант, Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар
beloglyadovaia@ksma.ru
Ушаков Никита Алексеевич
Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар
nickaleush@mail.ru
Гайдук Дмитрий Алексеевич
Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар
d@gaiduk.ru

Аннотация. В данной работе представлена комплексная методология создания специализированного набора данных (датасета) для разработки и обучения алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ) в области перинатальной ультразвуковой диагностики. Объектом исследования выступили ультразвуковые изображения головного мозга плода в сроки 19–22 недель гестации. Ключевой целью было формирование репрезентативного и качественно размеченного датасета, позволяющего обучать модели компьютерного зрения для автоматизированного выявления шести ключевых анатомических структур центральной нервной системы (ЦНС): М-эхо, таламуса, передних и задних рогов боковых желудочков, полости прозрачной перегородки и Сильвиевой борозды. В ходе работы выявлены и систематизированы критические аспекты создания медицинских датасетов: необходимость терминологической точности и использования стандартизированных онтологий, учет мультиплатформенности оборудования и артефактов визуализации, обеспечение эпидемиологической репрезентативности выборки. Сформулированы три основных требования к диагностическим датасетам: семантическая точность поиска, критерии визуального качества и эпидемиологическая репрезентативность. Результатом исследования является созданный и зарегистрированный датасет, а также разработанные методические принципы, которые способствуют стандартизации процессов подготовки данных для ИИ в ультразвуковой диагностике и могут быть адаптированы для других визуализационных модальностей.

Ключевые слова: методология, набор данных, датасет, искусственный интеллект, врожденные пороки развития плода, визуализация, центральная нервная система, плод.

Введение

Современные технологии искусственного интеллекта находят все более широкое применение в различных сферах медицины — от диагностики и терапии до управления медицинскими учреждениями и телемедицинских услуг. Особое значение ИИ-решения приобретают в области лучевой диагностики, где они способствуют оптимизации рабочих процессов, минимизации диагностических ошибок и повышению эффективности исследований при сокращении временных затрат [1, 2]. При этом ключевым фактором, определяющим качество и безопасность работы алгоритмов ИИ, остается тщательная подготовка и верификация используемых медицинских данных.

Ультразвуковая диагностика головного мозга плода представляет особую сложность в связи с уникальными анатомическими и физиологическими особенностями этого органа, что требует особого подхода к формированию специализированных [11] наборов данных. Необходимо учитывать все нюансы данного вида исследований для обеспечения высокой диагностической ценности.

В данной работе мы рассматриваем ключевые аспекты создания визуализационных наборов данных на примере ультразвуковых изображений головного мозга плода в период 19–22 недель гестации. Исследование основано на материалах эксперимента по внедрению передовых технологий компьютерного зрения для анализа медицинских изображений, с перспективой практического применения разработанных решений в медицинских учреждениях Краснодарского края.

Материалы и методы

Создание специализированного датасета ультразвуковых изображений головного мозга плода (срок гестации 19–22 недели) проводилось по четкой многоступенчатой методике, детально описанной в представленном алгоритме работы. Процесс включал последовательное выполнение взаимосвязанных этапов, каждый из которых вносил существенный вклад в формирование конечного набора данных. Особое внимание уделялось соблюдению стандартизированного подхода на всех стадиях подготовки, что позволило обеспечить высокую репрезентативность и диагностическую ценность собранных медицинских изображений (Рис. 1).

1. Этап планирования

При разработке проекта по оценке анатомических ориентиров головного мозга плода первостепенной задачей стало выявление шести ключевых структур на ультразвуковых изображениях в период 19-22 недель гестации. Данный срок соответствует второму скрининговому УЗИ согласно Приказу Минздрава России №1130н от 20.10.20221.

Протокол исследования предполагает проведение ультразвукового сканирования строго в указанные сроки (19 недель 0 дней — 22 недели). В ходе обследования фиксируется 15-секундная видеозапись, содержащая серию аксиальных срезов головного отдела плода. Первичная обработка изображений направлена на выделение области головы, после чего выделенный фрагмент подвергается нейросетевому анализу для идентификации шести значимых анатомических маркеров ЦНС [3].

На подготовительном этапе выполняются стандартные фетометрические измерения:
- Бипариетальный размер (БПР)
- Лобно-затылочный размер (ЛЗР)
- Окружность головы (ОГ)

Техника измерений:
- Проводится в аксиальной плоскости
- Ориентир — наружный контур черепных костей (гиперэхогенная линейная структура)
- Критерии качества: овальный контур без дефектов >2 мм
- Референсная плоскость: уровень таламуса и полости прозрачной перегородки

Рис. 1. Схема-алгоритм этапов создания набора датасетов

В соответствии с международными стандартами ISUOG [4] (рис. 2) выделены шесть ключевых анатомических структур, имеющих принципиальное значение для оценки развития ЦНС плода:

1. М-эхо (белая маркировка)
2. Зрительные бугры (таламус) (зеленая маркировка)
3. Передние рога боковых желудочков (коричневая маркировка)
4. Задние рога боковых желудочков (розовая маркировка)
5. Полость прозрачной перегородки (желтая маркировка)
6. Сильвиева борозда (синяя маркировка)

Данные анатомические ориентиры служат важнейшими диагностическими критериями, позволяющими:

— объективно оценивать нормальное развитие нервной системы плода
— своевременно выявлять возможные морфологические аномалии
— проводить дифференциальную диагностику во II триместре гестации

Цветовая дифференциация структур значительно облегчает процесс их идентификации при ультразвуковом исследовании, что особенно важно для стандартизации диагностического процесса и последующего анализа полученных данных.

Рис. 2. Разметка 6 анатомических ориентиров врачом ультразвуковой диагностики

Исходные данные для исследования были предоставлены двумя ведущими перинатальными центрами Краснодара и охватывали период 2021–2023 годов, с ежегодным объемом около 20 000 исследований [5]. Материалы включали как ультразвуковые изображения, так и сопутствующую текстовую медицинскую документацию: краткие анамнестические сведения и стандартизированные протоколы ультразвуковых исследований. На основании этих материалов были сформированы четкие критерии отбора данных.

Для включения в исследование обязательным условием являлось наличие в медицинской информационной системе полного протокола обследования с заключением о состоянии плода (норма или патология). Исключались случаи с отсутствием таких протоколов в системе. Дополнительным фильтром служило качество визуализации — из анализа исключались изображения с выраженными артефактами (шум, недостаточная четкость), которые могли негативно повлиять на работу алгоритмов искусственного интеллекта.

2. Этап отбора

На этапе первичного отбора исследований проводился тщательный анализ медицинских протоколов УЗИ на предмет наличия специфических анатомических терминов. В качестве ключевых маркеров использовались следующие точные формулировки: «М-эхо», «таламус», «передние рога боковых желудочков головного мозга», «задние рога боковых желудочков головного мозга», «прозрачная полость перегородки», «латеральная борозда (Сильвиева борозда)».

Для формирования исходной выборки были обработаны текстовые данные 37587 ультразвуковых исследований второго скрининга, проведенных в двух крупнейших перинатальных центрах Краснодара. Из медицинской базы данных извлекалась следующая информация: уникальный цифровой идентификатор исследования (ID), точная дата проведения диагностики, возраст пациентки и полный текст протокола ультразвукового исследования. Анализ соответствия заданным ключевым словам осуществлялся методом бинарной классификации — фиксации их присутствия или отсутствия в текстовом описании каждого конкретного исследования.

3. Этап разметки и верификации

Процесс аннотирования медицинских изображений осуществлялся группой из трех квалифицированных врачей ультразвуковой диагностики, каждый из которых имел профессиональный стаж не менее двух лет. Контроль качества выполненной разметки и верификацию результатов проводил старший эксперт — специалист по ультразвуковой диагностике с 15-летним клиническим опытом.

Отбор исследований для финального набора данных проводился методом случайной выборки из исходной базы с обязательным соблюдением установленных критериев включения. По завершении процедуры аннотирования был сформирован репрезентативный датасет, включающий 1500 ультразвуковых исследований, где [5, 6]:

— 200 случаев (13,3 %) демонстрировали различные патологические изменения

— 1300 случаев (86,7 %) соответствовали нормальным анатомическим показателям

Такое распределение отражает реальную эпидемиологическую картину и обеспечивает достаточную выборку для обучения и валидации диагностических алгоритмов.

4. Этап публикации и документирования

Итоговый вариант набора данных был официально зарегистрирован на платформе Федерального института промышленной собственности (FIPS). Все представленные материалы прошли процедуру полной деидентификации и содержат необходимые технические характеристики и статистические показатели. Следует отметить, что объем предоставленной выборки может не покрывать потребности всех возможных видов тестирования — его адекватность зависит от конкретных исследовательских задач и формулировки нулевой гипотезы в каждом отдельном случае.

Результаты

По итогам проведенного исследования был создан и зарегистрирован специализированный набор данных «Формирование инструментального диагноза для выявления пороков центральной нервной системы у плода на основе нейросетевых моделей». В процессе разработки выявлены ключевые методологические особенности, выходящие за рамки стандартных подходов, существенные для качества работы алгоритмов искусственного интеллекта [7]:

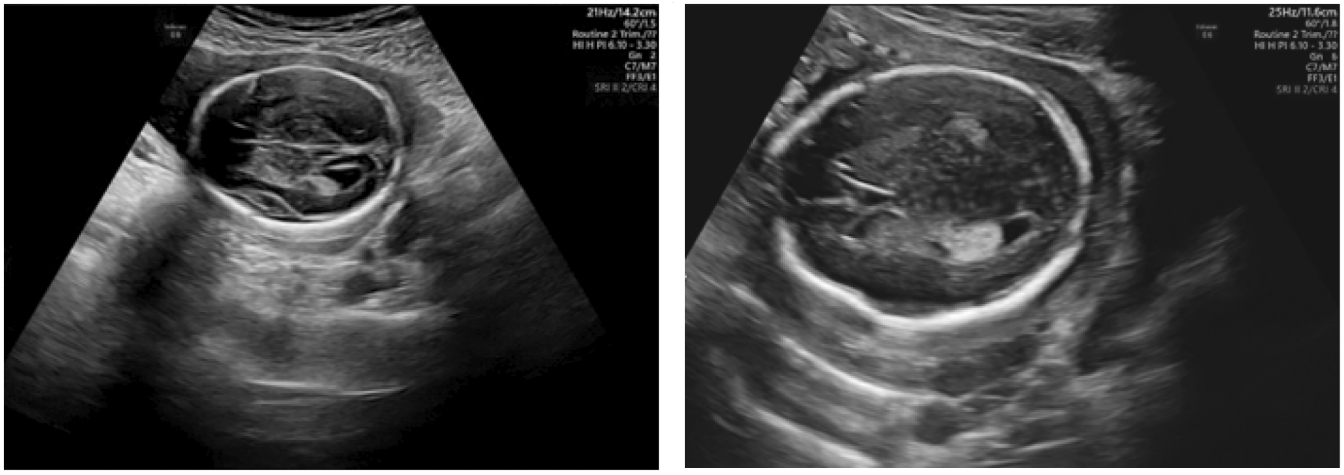
1. Терминологическая точность и согласованность данных — разные врачи могут описывать одну и ту же находку разными терминами (синонимы, жаргонизмы) или с разной степенью детализации. Для решения этой задачи необходимо:
- Использование онтологий и стандартных словарей (например, RadLex для лучевой диагностики, SNOMED CT).
- Процесс аннотирования: Разработка четких, иллюстрированных гайдов для аннотаторов с правилами для пограничных случаев.
- Контроль межэкспертной согласованности (Inter-rater reliability) – обязательный метрический этап сбора данных.
2. Требования к качеству и стандартизации изображений – это самый критичный технический барьер. Для решения этой задачи необходимо:
- Мультиплатформенность: Учет различий в ультразвуковых датчиках, алгоритмах постобработки и фирменных «фильтрах» от разных производителей (GE, Philips, Siemens, Mindray и др.).
- Протокол исследования: Стандартизация не только настроек, но и позиции датчика, доступа, угла сканирования [9]. Модель, обученная на изображениях в одном стандартном сечении, будет бесполезна для изображений в другой плоскости.
- Артефакты: Нужно не просто минимизировать, а явно маркировать артефактные изображения (тень от ребра, реверберация, недостаточная пенетрация) и либо исключать их, либо учить модель их распознавать и игнорировать.
3. Эпидемиологическая релевантность и смещения (Bias):
- Смещение отбора (Selection Bias): Данные часто собираются в крупных научных центрах, куда поступают сложные случаи. Это искажает естественную распространенность заболеваний.
- Популяционные особенности: Анатомические нормы, преобладающие патологии и их фенотипы могут различаться у разных этнических групп, возрастных когорт.
- Сохранять распределение подтипов – это необходимо, но недостаточно. Нужно также контролировать баланс по возрасту, индексу массы тела (для УЗИ это критично), сопутствующим заболеваниям.
4. Методология валидации и вывод в практику:
- Проспективная валидация на независимом наборе данных из другого медицинского учреждения, желательно на другом оборудовании.
- Клинические конечные точки: Важно оценивать не только точность распознавания изображения (техническая метрика), но и влияние на клиническое решение (изменение тактики, время до постановки диагноза) и, в идеале, на исход для пациента.
- Разработка порогов принятия решений: Для бинарной классификации (есть/нет патологии) порог часто выбирают для максимизации точности. В медицине цена ошибок разная. Ложноположительный результат может привести к ненужной биопсии, ложноотрицательный — к пропуску болезни. Порог должен выбираться совместно с клиницистами исходя из клинических задач.

Методологическая схема формирования датасета представлена на Рисунке 1. Иллюстративные примеры ультразвуковых сканов из финальной выборки (нормальные и патологические случаи) демонстрируются на Рисунке 3.

Данные особенности имеют принципиальное значение для создания эффективных диагностических алгоритмов в перинатальной ультразвуковой диагностике.

Обсуждение

Анализ международных рекомендаций, включая стандарты ISUOG, показывает, что существующие требования к созданию научных баз данных часто оказываются труднореализуемыми в реальной клинической



A. B.

Рис. 3. Ультразвуковые снимки головного мозга плода в аксиальном сечении:
a) отсутствие признаков целевой патологии; b) Слияние таламуса, нарушение дифференцировки М-эхо, сужение (стеноз) и сглаживание сильвиевой борозды

практике [8, 9]. Основные ограничения связаны со сложностью соблюдения конфиденциальности пациентов и ограниченной доступностью полных медицинских данных. При этом литературный обзор выявил определённый парадокс: хотя многочисленные работы посвящены тестированию ИИ-алгоритмов, критически важный этап подготовки данных нередко описывается поверхностно или остаётся за рамками публикаций. Даже в исследованиях с детальным описанием методик отмечаются существенные расхождения в подходах, что обусловлено разнообразием клинических задач и спецификой применения искусственного интеллекта в разных медицинских областях.

Национальный стандарт ГОСТ Р 59921.5–2022 содержит лишь общие принципы формирования медицинских датасетов, не предлагая конкретных алгоритмов отбора изображений или практических рекомендаций по подготовке данных. Именно этот пробел стал основанием для разработки Кубанским государственным медицинским университетом специализированных методических указаний, включающих спецификации УЗИ-исследований, а также руководства как для разработчиков ИИ-систем в области диагностики аномалий центральной нервной системы плода, так и для врачей-диагностов.

Вместе с тем ряд вопросов требует дальнейшего изучения: влияние количества специалистов на качество разметки данных, оптимальное соотношение случаев нормы и патологии, необходимый объём датасета, допустимая степень трансформации изображений, а также значимость различных типов метаданных и их влияние на обучение алгоритмов, валидацию результатов и дальнейшее дообучение систем.

Автоматизированный анализ медицинских текстов с использованием как классических методов машинного обучения, таких как k-NN и модели ключевых терминов, так и современных нейросетевых архитектур позволяет стандартизировать обработку диагностических заключений и в перспективе расширить этот подход на другие визуализационные модальности — КТ, МРТ и УЗИ. Особую сложность на практике представляет формирование репрезентативных выборок и учёт естественного распределения патологий [10]. В нашем исследовании, например пропорции основаны на локальной статистике ввиду отсутствия надёжных эпидемиологических данных.

Как показывают исследования, качество медицинской разметки напрямую зависит от участия врачей-экспертов. Это обусловлено необходимостью профессиональной экспертизы, которая обеспечивает точность идентификации патологий, адекватность оценки степени тяжести состояний и корректность аннотирования. Ошибки менее опытных специалистов могут существенно повлиять на качество обучающей выборки для алгоритмов ИИ. Привлечение нескольких экспертов позволяет учесть различные диагностические подходы, минимизировать субъективность через консенсусную оценку и повысить надёжность данных. Для объективной оценки уровня согласия используется статистика, например коэффициент каппа Коэна.

Крайне важна стандартизация процесса — единые протоколы аннотирования обеспечивают согласованные диагностические критерии, унифицированную интерпретацию и сопоставимость данных. Многоуровневый контроль качества, включающий независимую проверку, анализ сложных случаев, регулярный аудит и обратную связь, позволяет постоянно поддерживать высокий уровень разметки.

В рамках представленного проекта реализована трехуровневая система экспертной оценки: первичная

разметка выполняется тремя врачами УЗ-диагностики, а финальная верификация — старшим экспертом с опытом более 15 лет. Такой подход гарантирует создание высококачественных и клинически релевантных данных для обучения диагностических систем искусственного интеллекта.

Заключение

По результатам исследования можно выделить три принципиальных требования к созданию диагностических наборов данных.

Первое — семантическая точность поиска. Её обеспечивают применение узкоспециализированных медицинских терминов, использование фильтрующих «стоп-фраз» и внедрение алгоритмов автоматического анализа текстовых заключений.

Второе требование связано с критериями визуального качества. Сюда относится отбор изображений с оптимальной контрастностью и минимальным уровнем шумов, а также учёт межучрежденческих различий, вызванных отсутствием стандартизированных протоколов сканирования.

Третье требование — эпидемиологическая репрезентативность. Для обучающих выборок важно сохранение естественного распределения патологий в популяции, а для тестовых наборов необходимо равномерное распределение случаев, позволяющее проводить комплексную валидацию.

Современный этап развития медицинского ИИ характеризуется, с одной стороны, наличием универсальной методологии создания датасетов, а с другой — необходимостью учитывать модальностную специфику, особенно в такой области, как ультразвуковая диагностика.

Перспективные направления дальнейших исследований включают изучение особенностей сердечно-сосудистых патологий, специфики различных диагностических методик и разработку стандартизированных протоколов подготовки данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кремнева Е.И., Сморчкова А.К., Хоружая А.Н., Семенов Д.С., Мальцев А.В., Шарова Д.Е., Зинченко В.В., Владзимирский А.В. Особенности формирования наборов данных для сервисов с искусственным интеллектом в нейровизуализации на примере создания набора данных с КТ-изображениями головного мозга с признаками кровоизлияния. Врач и информационные технологии. 2023;(4):42–53. https://doi.org/10.25881/18110193_2023_4_42.
2. Немковский Г.Б., Ашапкина М.С., Ефимов С.А., Деревянко Е.А. Анализ графической информации методами машинного обучения // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2025. №2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-graficheskoy-informatsii-metodami-mashinnogo-obucheniya (дата обращения: 15.12.2025).
3. Drukker L., Noble J.A., Papageorghiou A.T. Introduction to artificial intelligence in ultrasound imaging in obstetrics and gynecology. Ultrasound Obstet Gynecol. 2020;56(4):498–505. DOI: 10.1002/uog.22122.
4. Возможности применения нейросетевого анализа в ультразвуковой диагностике врожденных пороков развития плода во II триместре беременности / А.В. Поморцев, Ю.Ю. Дьяченко, Е.А. Арутюнян [и др.] // Радиология — практика. — 2025. — № 5(113). — С. 47–59. — DOI 10.52560/2713-0118-2025-5-47-59. — EDN MDGHJJ.
5. Применение искусственного интеллекта в ультразвуковой диагностике пороков ЦНС плода в сроках гестации с 19 по 22 неделю беременности / А.В. Поморцев, А.Н. Редько, Е.А. Барсукова [и др.] // Инновационная медицина Кубани. — 2024. — Т. 9, № 2. — С. 42–47. — DOI 10.35401/2541-9897-2024-9-2-42-47. — EDN ILDGNZ.
6. Разработка и обучение нейросетевых моделей для диагностики заболеваний ЦНС плода / М.В. Янаева, Н.А. Ушаков, Д.А. Гайдук, И.А. Белоглядова // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». — 2025. — № 2. — С. 168–187. — DOI 10.26297/2312—9409.2025.2.13. — EDN EQLNBJ.
7. Ившин А.А. Искусственный интеллект: предиктивная аналитика перинатального риска. Вопросы гинекологии, акушерства и перинатологии. / Гусев А.В., Новицкий Р.Э. // 2020; 19(6): 133-144.
8. А.В. Поморцев, Ю.Ю. Дьяченко, Е.А. Барсукова, М.А. Матосян Возможности применения искусственного интеллекта в ультразвуковой диагностике врожденных пороков развития плода во II триместре беременности // Инновационная медицина Кубани. 2024. №4-1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-primeneniya-iskusstvennogo-intellekta-v-ultrazvukovoy-diagnostike-vrozhdennyh-porokov-razvitiya-ploda-vo-ii-trimestre (дата обращения: 10.12.2025).
9. Ившин Александр Анатольевич, Воробьева Вера Михайловна, Малышев Никита Андреевич Перспективные методы пренатальной диагностики на основе пассивных датчиков и машинного обучения // Акушерство, гинекология и репродукция. 2025. №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnye-metody-prenatalnoy-diagnostiki-na-osnove-passivnyh-datchikov-i-mashinnogo-obucheniya (дата обращения: 10.01.2026).
10. Бокерия Екатерина Леонидовна, Яннаева Наталья Евгеньевна, Сенча Александр Николаевич, Метелкин Петр Валерьевич, Юрченко Оксана Валерьевна Искусственный интеллект в фетальной эхокардиографии // Инновационная медицина Кубани. 2024. №4 (36). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-v-fetalnoy-ehokardiografii (дата обращения: 10.01.2026).
11. Приказ Министерства здравоохранения РФ от 20 октября 2020 г. N 1130н «Об утверждении Порядка оказания медицинской помощи по профилю «акушерство и гинекология» [Электронный ресурс]. URL: https://base.garant.ru/74840123/ (дата обращения: 18.06.2025).

© Янаева Марина Викторовна (yanaevam@mail.ru); Белоглядова Ирина Александровна (beloglyadovaia@ksma.ru);
Ушаков Никита Алексеевич (nickaleush@mail.ru); Гайдук Дмитрий Алексеевич (d@gaiduk.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.04

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДОБРОКАЧЕСТВЕННЫХ ОПУХОЛЕЙ МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ У ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ

MORPHOLOGICAL FEATURES OF BENIGN BREAST TUMORS IN CHILDREN AND ADOLESCENTS

R. Akhmedov
E. Kalashnikova
E. Bit-Sava
D. Ivanov

Summary. Benign breast tumors in children and adolescents are relatively rare pathology. The aim of our study was to identify the morphological features of breast tumors in children in contrast to the adult population. *Materials and methods*: A prospective cohort study of 21 patients under 18 y.o. who underwent surgical removal of the tumor with subsequent histological evaluation from 2022 to 2025. *Results*: The most common breast tumor in the pediatric population was fibroadenoma (95 %). Histological features of fibroadenoma in children were: a predominantly pericanalicular pattern (33 %) with foci of typical hyperplasia and gynecomastia-type changes (nuclear hyperchromia, micropapillary component, single mitotic figures); mildly and hypercellular stroma with low mitotic activity (less than 2 mitoses per 10 fields of view, x400) without atypia. *Conclusions*: Identifying the morphological features of breast tumor structure in comparison with the adult population will allow us to predict further tumor progress and develop clinical guidelines for the monitoring and treatment of this type of tumor in children.

Keywords: juvenile fibroadenoma, fibroadenoma in children, phyllodes tumor in children, histology, pediatrics.

Ахмедов Руслан Мерзиалиевич
врач-онколог, Клиника высоких медицинских технологий имени Н.И. Пирогова Санкт-Петербургского Государственного Университета
little-doctor1989@yandex.ru
Калашникова Елизавета Сергеевна
врач-патологоанатом, Национальный центр клинической морфологической диагностики
Бит-Сава Елена Михайловна
доктор медицинских наук, профессор, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет; заведующая отделением, врач-онколог, ГБУЗ Санкт-Петербургский клинический научно-практический центр специализированных видов медицинской помощи (онкологической) имени Н.П. Напалкова
Иванов Дмитрий Олегович
доктор медицинских наук, профессор, главный неонатолог, ректор, ФГБО ВО Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет

Аннотация. Доброкачественные опухоли молочной железы у детей и подростков представляют собой редкую и малоизученную патологию. Целью данного исследования стало выявление морфологических особенностей опухолей молочной железы у детей в отличие от взрослой популяции. *Материалы и методы*: Проспективное когортное исследование 21 пациентки до 18 лет, которым было проведено хирургическое удаление опухоли с последующей гистологической оценкой в период с 2022 по 2025 гг. *Результаты*: наиболее часто встречающейся опухолью молочной железы в детской популяции стала фиброаденома (95 %). Гистологическими особенностями фиброаденомы у детей явились: преимущественно перикаиаликулярный паттерн (33 %) с очагами типичной гиперплазии и изменениями по типу гинекомастии (гиперхромия ядер, микропапиллярный компонент, единичные митотические фигуры); умеренно- и гиперклеточная строма с низкой митотической активностью (менее 2 митозов на 10 полей зрения, х400) без атипии. *Заключение*: Выявление морфологических особенностей строения опухолей молочной железы в сравнении с взрослой популяцией позволит прогнозировать дальнейшее развитие опухоли и разработать клинические рекомендации по наблюдению и лечению данного вида опухолей у детей.

Ключевые слова: ювенильная фиброаденома, фиброаденома у детей, филлоидная опухоль у детей, гистология, педиатрия.

Введение

Опухоли молочной железы у детей и подростков женского пола встречаются относительно редко, их распространенность составляет около 2–3 % [1]. Большинство новообразований молочной железы в детской популяции (0–18 лет) являются доброкачественными, при этом фиброаденомы встречаются чаще всего, составляя до 80–95 % от всех опухолей молочной железы [2].

Учитывая отсутствие четких рекомендаций по ведению больных с опухолями молочной железы в педиатрической практике, наблюдается значительная вариативность в рекомендациях по диагностике и лечению подобных новообразований. Ввиду довольно редкой распространенности опухолей молочной железы у детей и подростков, программы скрининга и ранней диагностики изменений в молочной железе у данной когорты пациентов не разработаны, поэтому подавляющее большинство пациентов обращаются к врачу после самостоятельного обнаружения пальпируемого образования в молочной железе [3]. Кроме того, применимость рекомендаций для взрослых, таких как международная стандартизированная система оценки и описания результатов маммографии, УЗИ и МРТ молочных желез (BI-RADS), к детям неизвестна [4]. Наличие опухолевого образования в молочной железе у ребенка вызывает обеспокоенность у родителей, а недостаточное количество информации о гистологических особенностях подобных опухолей у детей и возможных рисках малигнизации, приводит в замешательство клиницистов.

Изучение гистологических особенностей опухолей молочной железы у детей и подростков предоставит больше информации по этой редкой патологии и приведет к разработке конкретных клинических рекомендаций по диагностике и лечению доброкачественных новообразований молочной железы в педиатрической практике. Таким образом, целью данного исследования было выявить отличительные особенности в гистологической оценке доброкачественных новообразований у детей.

Материалы и методы

Данное исследование представляет собой проспективное когортное исследование 21 пациентки с пальпируемым новообразованием молочной железы, которым проводилось хирургическое лечение с последующей гистологической оценкой послеоперационного материала в онкологическом отделении №1 Клиники высоких медицинских технологий имени Н.И. Пирогова в период с 2022 по 2025 гг.

В исследование включались пациентки женского пола в возрасте до 18 лет, средний возраст составил 15±2,1 лет. Все пациентки обратились на прием по поводу пальпируемого новообразования молочной железы. Критериями исключения являлись: мужской пол, возраст более 18 лет, размер новообразования менее 1 см. Всем пациенткам на дооперационном этапе было выполнено УЗИ или МРТ молочных желез, а также тонкоигольная аспирационная биопсия при размере опухоли до 2 см и трепанационная биопсия при размере опухоли более 2 см.

По результатам исследования биопсийного материала принималось решение о хирургическом удалении опухоли. Операции проводились под внутривенным наркозом. Решение о хирургическом доступе принималось на основании локализации опухоли, размера опухолевого узла, а также размера молочной железы и ареолы. Наиболее частым вариантом выбора стал периареолярный разрез (N=18). В одном случае (N=1) ввиду локализации опухоли в нижневнутреннем квадранте молочной железы был выбран разрез по субмаммарной складке. В двух случаях (N=2) кожный разрез производился непосредственно над опухолью.

Послеоперационный материал отправлялся на гистологическое исследование. Послеоперационные образцы тканей молочной железы были фиксированы в 10 % нейтральном буферном растворе формалина с последующим взятием тканевых образцов, проводкой (процессор Sakura VIP6), заливкой в парафин с изготовлением парафиновых блоков и микротомных парафиновых срезов толщиной 4 мкм (микротом Sakura SRM200), использованием рутинной окраски гематоксилин и эозин (стейнер Sakura Tissue Tek Prisma Film). Проводилась оценка всех компонентов опухоли с указанием степени атипии, митотической активности, вторичных изменений тканей.

Все пациентки подписали информированное согласие на обследование и хирургическое вмешательство, а также публикацию снимков гистологических материалов в обезличенном формате.

Результаты

Всем пациенткам, соответствующим критериям включения в данное исследование (N=21), был проведен ряд предоперационных обследований (таблица 1). В качестве визуализационного обследования большинству пациенток (90 %, N=19) было выполнено УЗИ молочных желез. В двух случаях (10 %) предпочтительным методом стало МРТ молочных желез ввиду подозрения на злокачественный характер новообразования (многоузловое образование, наличие акустической тени, малоподвижное при пальпации). Проведение маммографии в детской популяции малоинформативно и предполагает излишнюю лучевую нагрузку [5]. По результатам рент-

генологических методов визуализации всем пациенткам выполнялась биопсия новообразования молочной железы. В большинстве случаев выполнялась трепанационная биопсия опухоли (57 %, N=12), так как размер новообразования превышал 2 см. Девяти пациенткам (43 %) была выполнена тонкоигольная аспирационная биопсия с последующим цитологическим исследованием.

Таблица 1.

Предоперационное обследование пациентов

Исследование	Тип исследования	Количество пациентов (n=21)	% пациентов (100 %)
Биопсия	Тонкоигольная аспирационная биопсия	9	43 %
	Трепанационная биопсия (core-биопсия)	12	57 %
Визуализация	УЗИ молочных желез	19	90 %
	МРТ молочных желез	2	10 %

Гистологические характеристики послеоперационного материала удаленных опухолей молочной железы представлены в таблице 2.

Таким образом, наиболее часто встречающейся доброкачественной опухолью молочной железы в детской популяции стала периканаликулярная фиброаденома (33 %). Полученные результаты свидетельствуют о высоком многообразии гистологических подтипов опухолей молочной железы у детей.

Во всех случаях (N=21) новообразования молочной железы были удалены в пределах здоровых тканей. Данных за рецидив заболевания ни у одного пациента в исследовании получено не было.

Таблица 2.

Гистологические характеристики опухоли

Характеристики опухоли		Количество пациентов (n=21)	% пациентов (100 %)
Размер опухолевого узла	>3 см	14	67 %
	<3 см	7	33 %
Гистологический подтип	Интраканаликулярная фиброаденома	5	24 %
	Периканаликулярная фиброаденома	7	33 %
	Смешанная фиброаденома	6	29 %
	Доброкачественная филлоидная опухоль	1	4 %
	Тубулярная фиброаденома	2	10 %

Эпителиальный компонент интраканаликулярного строения образован двумя рядами клеток (миоэпителиальными и эпителиальными) с гиперхромией ядер протокового эпителия без митотической активности и атипии. В просвете протоков определяются немногочисленные пигментированные макрофаги. Стромальный компонент гиперклеточный представлен пролиферацией фибробластов без атипии и митотической активности с миксоидным отеком.

Эпителиальный компонент периканаликулярного строения образован двумя рядами клеток (миоэпителиальными и эпителиальными) с очаговой типичной ги-

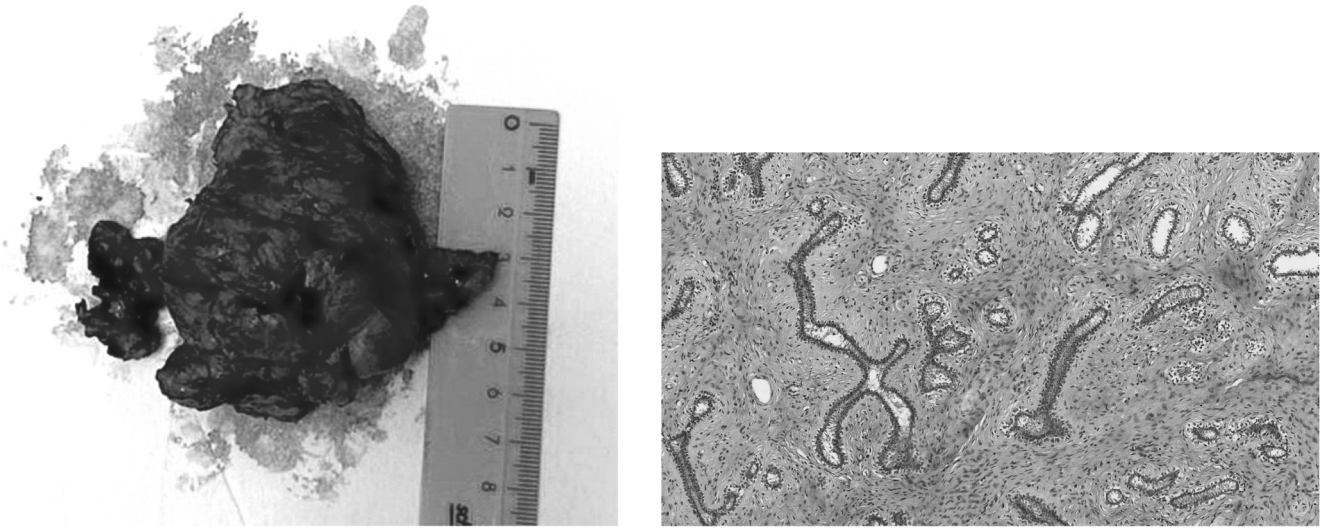


Рис. 1. Интраканаликулярная фиброаденома: макро- и микропрепарат (увеличение х100)

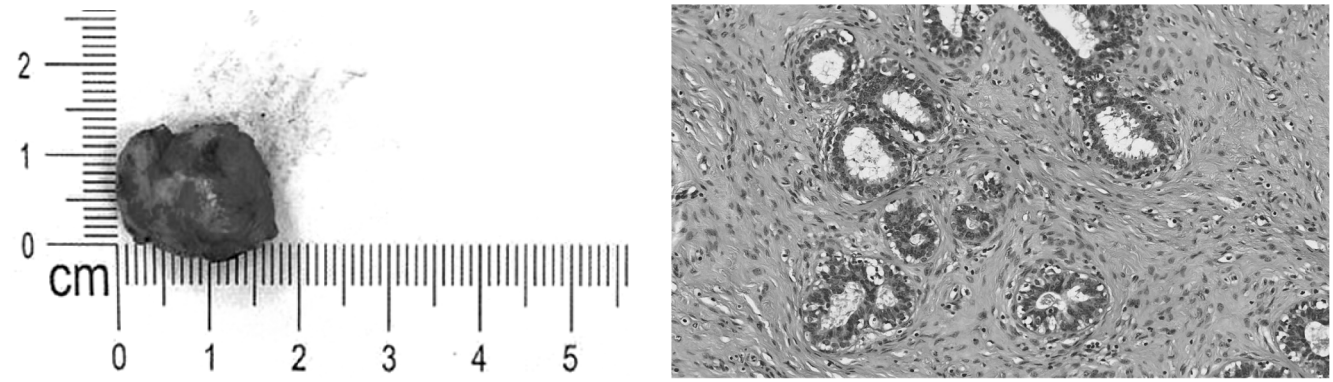


Рис. 2. Периканаликулярная фиброаденома: макро- и микропрепарат (увеличение х200)

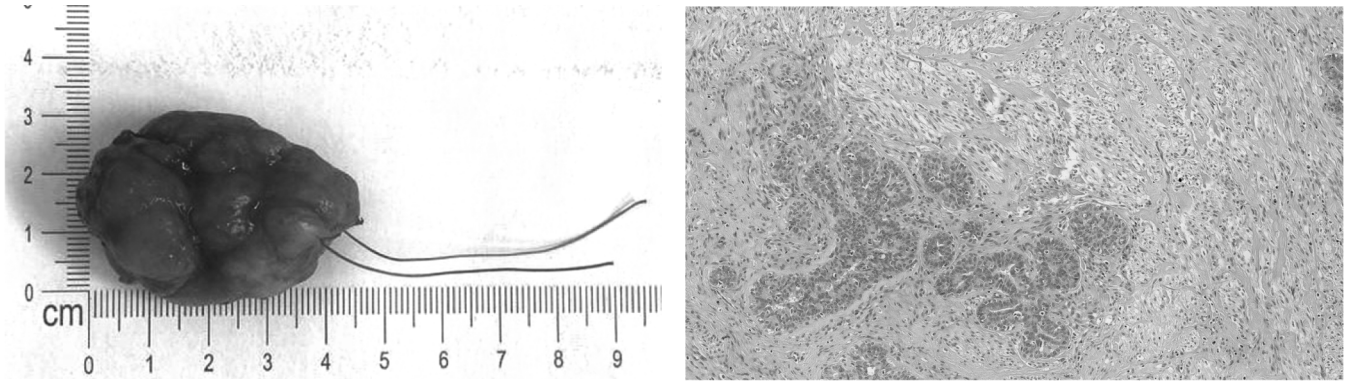


Рис. 3. Смешанная фиброаденома: макро- и микропрепарат (увеличение х100)

перплазией протокового эпителия, гиперхромией ядер, единичными митозами без атипии. Стромальный компонент с умеренной клеточностью, фиброзом без атипии и митотической активности.

Опухоль бифазного строения представлена эпителиальным и стромальным компонентами. Эпителиальный компонент тубулярного и периканаликулярного строения образован двумя рядами клеток (миоэпителиальными и эпителиальными) с очаговой типичной гиперплазией протокового эпителия, очагами микропапиллярного строения, гиперхромией ядер, низкой митотической активностью без атипии. Стромальный компонент гиперклеточный с наличием эпителиоидноклеточных фибробластов без атипии и митотической активности с очаговым гиалинозом.

Опухоль бифазного строения представлена эпителиальным и стромальным компонентами. Эпителиальный компонент преимущественно интраканаликулярного («листовидного») строения, имеются очаги периканаликулярного строения. Эпителий образован двумя рядами клеток (миоэпителиальными и эпителиальными) с типичной гиперплазией протокового эпителия, гиперхромией ядер, низкой митотической активностью без атипии. Стромальный компонент гиперклеточный представлен пролиферацией веретеновидных фибробластов без атипии и митотической активности с очаговым гиалинозом.

Эпителиальный компонент с тубулярным паттерном образован двумя рядами клеток (миоэпителиальными и эпителиальными) с очаговой типичной гиперплазией ядер протокового эпителия, гиперхромией ядер протокового эпителия, низкой митотической активностью без атипии. Гипоцеллюлярный стромальный компонент с фиброзом без атипии и митотической активности.

Обсуждение

Новообразования молочной железы у детей являются достаточно редкой патологией, вследствие чего конкретных клинических рекомендаций по диагностике и лечению данных опухолей не разработано. В большинстве случаев поводом для обращения к врачу являются размер опухолевого узла более 2 см, быстрый рост опухоли, болезненность при пальпации и в определенные фазы менструального цикла, а также общая онкологическая обеспокоенность родителей пациента [6]. Согласно результатам нашего исследования, наиболее распространенным видом доброкачественного новообразования молочной железы стала фиброаденома (95 %), что соотносится с результатами исследований из других стран. Например, в многоцентровом исследовании Amy E. Lawrence et al. 453 пациенток в возрасте от 10 до 21 года наиболее распространенной патологией также стала фиброаденома (75 % случаев) [7]. 3 % новообразований в данном исследовании были филлоидными, при этом только одно филлоидное новообразование было

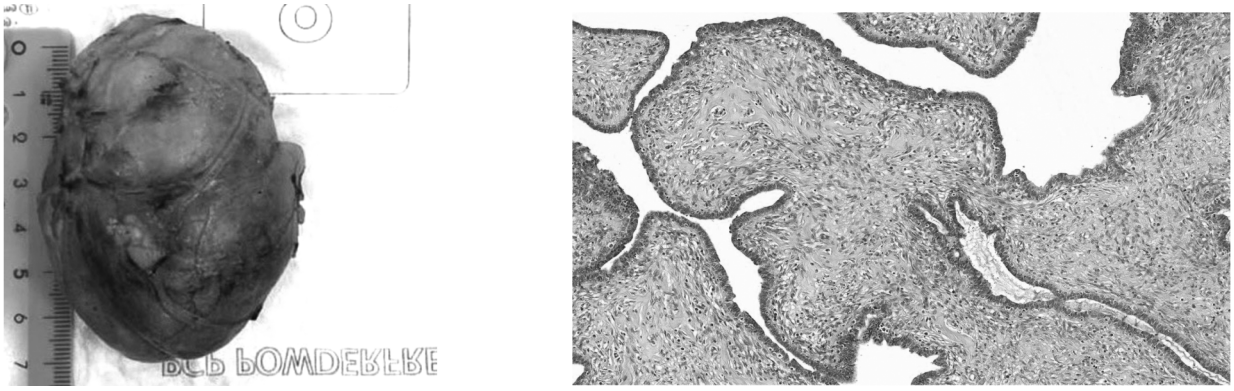


Рис. 4. Доброкачественная филлоидная опухоль: макро- и микропрепарат (увеличение х200)

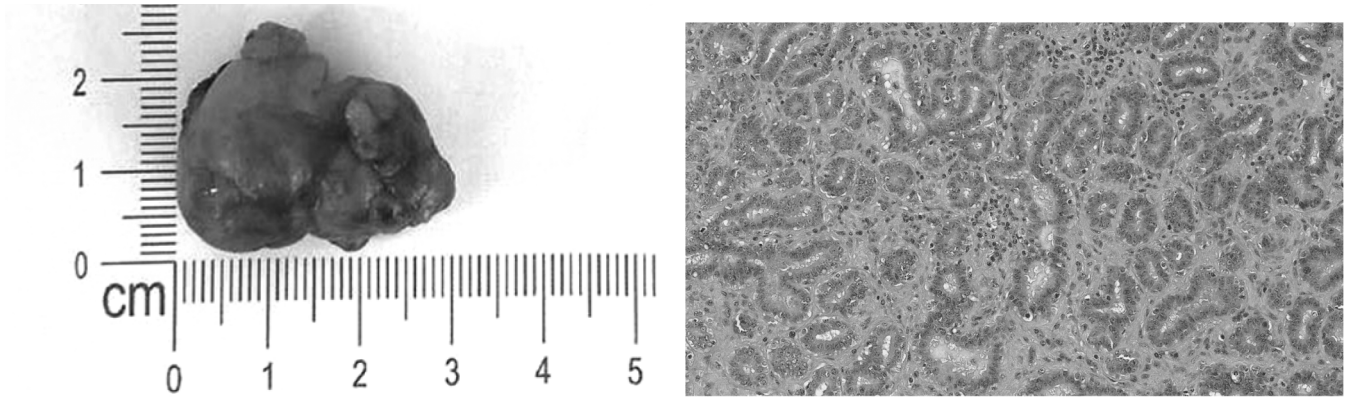


Рис. 5. Тубулярная фиброаденома: макро- и микропрепарат (увеличение х200)

идентифицировано как пограничное, остальные — доброкачественные. Случаев злокачественного процесса обнаружено не было.

Фиброаденомы чаще всего представляют собой одиночные опухолевые образования, однако могут встречаться и множественные и двусторонние варианты. Клинически фиброаденомы проявляются как плотные подвижные узлы с четкими и ровными краями, чаще округлой или овальной формы. Они образуются в результате узловой пролиферации фибробластов, происходящих из специализированной внутридольковой стромы, и поэтому имеют миксоидный вид, особенно у пациенток более молодого возраста [8]. Пролиферация стромы концентрически организована вокруг желез, которые могут иметь интраканаликулярный (дугообразный, удлиненный и бусинообразный) или периканаликулярный (небольшие овальные протоковые) паттерн, или их комбинацию. Распределение желез и стромы относительно равномерно по всей опухоли, что приводит к однородному микроскопическому виду. Стромальная атипия отсутствует, а митотическая активность стромы низкая или отсутствует. Для взрослой популяции пациенток с фиброаденомой характерна гипоцеллюлярная строма; выраженная гиперклеточность стромы у данной когорты пациентов обычно не отмечается. Отличительной особенностью фиброаденомы у детей и подростков до 18 лет в сравнении с взрослой популяцией часто встречается умеренная гиперклеточность стромы и небольшое повышение митотической активности стромы. Митотическая активность, однако, все равно остается относительно низкой (2–3 митоза/10 полей зрения), но иногда могут встречаться очаговые участки повышенной митотической активности (обычно не превышающие 5 митозов/10 полей зрения большого увеличения) [9].

Результаты нашего исследования коррелируют с данными зарубежных авторов. Таким образом, в данном исследовании фиброаденомы у детей представлены преимущественно периканаликулярным паттерном с очагами типичной гиперплазии и изменениями по типу гинекомастии (гиперхромия ядер, микропапиллярный компонент, единичные митотические фигуры). Фиброаденомы взрослых преимущественно интраканаликулярного строения, могут встречаться периканаликулярный и смешанный паттерны. Строма в ювенильных фиброаденомах умеренно- и гиперклеточная с пролиферацией веретеновидных фибробластов, фасцикулярным паттерном, низкой митотической активностью (менее 2 митозов на 10 полей зрения, х400) без атипии. Могут встречаться очаги миксоидизации стромы. В фиброаденомах взрослых стромальный компонент гипоклеточный с утолщением коллагеновых волокон, гиалинозом, очаговым миксоидным отеком без атипии и митотической активности.

Из 21 пациентки, включенной в исследование, был выявлен 1 случай доброкачественной филлоидной опухоли. Филлоидные опухоли — это стромальные поражения молочной железы, которые редко встречаются у детей и подростков (менее 1 %) и в основном наблюдаются у женщин в возрасте 40–50 лет [10]. Гистологически филлоидные опухоли похожи на фиброаденомы, но демонстрируют более выраженную стромальную пролиферацию, и классифицируются на доброкачественные, промежуточные и злокачественные типы. Опухоли более высокой степени злокачественности имеют повышенную митотическую активность и сходны с саркомами. Несмотря на гистологическую классификацию, все филлоидные опухоли (доброкачественные, промежуточные и злокачественные) обладают потенциалом к метастазированию и местному рецидиву [11]. Редкая встречаемость данной опухоли, подтвержденная как данным исследованием, так и зарубежными статьями, приводит к трудностям в диагностике и определении правильной тактики лечения пациентов с филлоидной опухолью молочной железы.

Хотя наше исследование носило проспективный характер, что является преимуществом относительно доказательности, редкая встречаемость опухолей молочной железы у детей ограничивает возможный размер выборки. Для более глубокого понимания гистологического разнообразия доброкачественных опухолей молочной железы у детей необходимы дальнейшие исследования с большим числом пациентов.

Заключение

Новообразования молочной железы у детей встречаются значительно реже, чем во взрослой популяции. Наиболее распространенным гистологическим вариантом опухоли у детей является фиброаденома, в частности, периканаликулярная, в то время как у взрослых чаще встречается интраканаликулярный вариант. Отличительной особенностью гистологического строения фиброаденомы у детей является гиперклеточность с возможными очагами повышенной митотической активности, тогда как для фиброаденом взрослых наиболее характерна гипоклеточность и отсутствие митотической активности на всем протяжении опухоли. Выявление морфологических особенностей строения опухолей молочной железы в сравнении с взрослой популяцией позволит прогнозировать дальнейшее развитие опухоли и разработать клинические рекомендации по наблюдению и лечению данного вида опухолей у детей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Knell J., Koning J.L. & Grabowski J.E. Analysis of surgically excised breast masses in 119 pediatric patients. Pediatr Surg Int 32, 93–96 (2016). doi:10.1007/s00383-015-3818-5.
2. Chung E.M., Cube R., Hall G.J., González C., Stocke J.T., Glassman L.M. Breast Masses in Children and Adolescents: Radiologic-Pathologic Correlation. Radio Graphics. 2009; 29:907–931. doi: 10.1148/rg.293095010.
3. Cory M. McLaughlin, Jessica Gonzalez-Hernandez, Monica Bennett, Hannah G. Piper, Pediatric breast masses: an argument for observation, Journal of Surgical Research 228, 2018, 247–252, doi: 10.1016/j.jss.2018.03.056.
4. John Davis, Juliana Liang, Albert Roh, Laurel Kittrell, Matthew Petterson, Lisa Winton, Mary Connell, Rebecca Viscusi, Ian Komenaka, Ramin Jamshidi. Use of breast imaging-reporting and data system (BI-RADS) ultrasound classification in pediatric and adolescent patients overestimates likelihood of malignancy. Journal of Pediatric Surgery 56, 2021, 1000–1003, ISSN 0022–3468, doi: 10.1016/j.jpedsurg.2020.12.025.
5. Brownstone Nicholas D. MD, Celie Karel-Bart B.A., Spigland Nitsana A. MD, Otterburn David M. MD. Pediatric Breast Fibroadenomas: A Systematic Review and Algorithm for Treatment. Annals of Plastic Surgery 83(5): p 601–605, November 2019. doi: 10.1097/SAP.0000000000001717.
6. McLaughlin C.M., Gonzalez-Hernandez J., Bennett M., Piper H.G. Pediatric breast masses: an argument for observation. J Surg Res. 2018; 228:247e252. doi: 10.1016/j.jss.2018.03.056.
7. Lawrence A.E., Saito J., Onwuka A., Port E., Bowder A., Courtney C., Deans K.J., Downard C.D., Duran Y.K., Fallat M.E., Fraser J.D., Gadepalli S., Kabre R., Kalbfell E.L., Knaus M.E., Kohler J., Lal D., Landman M.P., Leys C.M., Lu P., Mak G.Z., Markel T., Merchant N., Nguyen T., Pilkington M., Rymeski B., Sato T.T., St Peter S.D., Wright T., Minneci P.C., Grabowski J.E. Management of Pediatric Breast Masses: A Multi-institutional Retrospective Cohort Study. J Surg Res. 2021 Aug; 264:309–315. doi: 10.1016/j.jss.2021.01.041.
8. Chow Z.L., Gudi M., Tan P.H. Fibroepithelial Lesions: An Update for Daily Practice (Part-II). Surg Pathol Clin. 2025 Dec;18(4):701-706. doi: 10.1016/j.path.2025.05.006.
9. Lerwill M.F., Lee A.H.S. & Tan P.H. Fibroepithelial tumours of the breast — a review. Virchows Arch 480, 45–63 (2022). doi:10.1007/s00428-021-03175-6.
10. De Silva N.K., Brandt M.L. Disorders of the breast in children and adolescents, Part 2: breast masses. J Pediatr Adolesc Gynecol. 2006 Dec;19(6):415–8. doi: 10.1016/j.jpag.2006.09.002.
11. Tea M.K., Asseryanis E., Kroiss R., Kubista E., Wagner T. Surgical breast lesions in adolescent females. Pediatr Surg Int. 2009 Jan;25(1):73–5. doi: 10.1007/s00383-008-2285-7.

© Ахмедов Руслан Мерзиалиевич (little-doctor1989@yandex.ru); Калашникова Елизавета Сергеевна;
Бит-Сава Елена Михайловна; Иванов Дмитрий Олегович
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.07

ВЛИЯНИЕ ОБРАЗА ЖИЗНИ НА РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ОЖИРЕНИЯ И АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИИ У СОВРЕМЕННЫХ ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ

THE INFLUENCE OF LIFESTYLE ON THE PREVALENCE OF OBESITY AND ARTERIL HYPERTENSION IN MODERN CHILDREN AND ADOLESCENTS

N. Berezneva
D. Zelinskaya
E. Osennyaya
E. Shatskaya

Summary. This article analyzes the dynamics of obesity and hypertension prevalence in children, based on data from preventive medical examinations of minors (statistical reporting form No. 030-PO/o-17) and follow-up observations by a pediatric cardiologist at a clinic for the period 2019–2025. Possible causes of the increased incidence are discussed. A clinical example is used to explore diagnostic complexities and the need for a multidisciplinary team when identifying comorbidities in a child, as well as adolescents' lack of commitment to a healthy lifestyle.

Keywords: obesity, arterial hypertension, children, adolescents, healthy lifestyle.

Березнева Наталия Анатольевна
доктор медицинских наук, профессор, Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова, г. Москва
nberezn@mail.ru
Зелинская Дина Ильинична
доктор медицинских наук, профессор, Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова, г. Москва
di.zel@list.ru
Осенняя Елена Викторовна
заведующая филиалом, ГБУЗ ДГП № 118, г. Москва
fall22@yandex.ru
Шатская Елена Владимировна
врач детский кардиолог, ГБУЗ ДГП № 118, г. Москва
ele22779641@yandex.ru

Аннотация. В статье приведен анализ динамики распространенности ожирения и артериальной гипертензии у детей, полученных на основании сведений о профилактических медицинских осмотрах несовершеннолетних (форма статистической отчетности N 030-ПО/о-17) и диспансерного наблюдения врача детского кардиолога поликлиники за период 2019–2025 гг., рассмотрены возможные причины повышения заболеваемости. На клиническом примере разобраны сложности диагностики и необходимость подключения мультидисциплинарной команды при выявлении сочетанной патологии у ребенка, отсутствие приверженности у подростков к соблюдению здорового образа жизни.

Ключевые слова: ожирение, артериальная гипертензия, дети, подростки, здоровый образ жизни.

Состояние здоровья детей школьного возраста в значительной степени определяется их образом жизни [6, с.3]. Поэтому немаловажную роль в профилактике различных заболеваний играют такие составляющие здорового образа жизни (ЗОЖ), как физическая активность и рациональное питание. К сожалению, на фоне нарастающей загруженности детей в школе, наблюдается снижение их физической нагрузки, что способствует развитию функциональных нарушений и заболеваний органов зрения, ортопедической, эндокринной и сердечно-сосудистой патологии [5, с. 1209; 9, с. 64].

Пандемия COVID-19 и перевод в 2020 г. на домашнее обучение усилили дефицит двигательной активности, что способствовало увеличению массы тела школьников и, как следствие, повышению доли детей с избыточной массой тела и ожирением [7, с. 54]. Известно, что ожирение является фактором риска развития патологии сердечно-сосудистой системы, в том числе артериальной гипертензии [1, с. 5; 2, с. 213; 8, с. 57]. Поэтому своевременная диагностика избыточной массы тела и ожирения у детей, проведение профилактических и лечебных мероприятий, направленных на их коррекцию, будут способствовать предотвращению развития сердечно-сосудистой патологии в более старшем возрасте.

Цель исследования

Оценка динамики распространенности избыточной массы тела и ожирения у детей, а так же артериальной гипертензии в школьном возрасте на основании сведений о профилактических медицинских осмотрах не-

совершеннолетних (форма статистической отчетности N 030-ПО/о-17) в городской поликлинике г. Москвы и диспансерного наблюдения врача детского кардиолога в 2019–2025 гг. Данные о количестве детей, прошедших профилактический осмотр, представлены в табл. 1. Менее всего детей было осмотрено в 2020 г., что связано с противоэпидемическими мероприятиями на фоне COVID-19.

Таблица 1.

Число детей, прошедших профилактический осмотр в 2019–2025 гг.

годы	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
n	78429	17605	79200	84879	85275	80469	77152
%	98	21,94	98	99	95,7	96,35	93,5

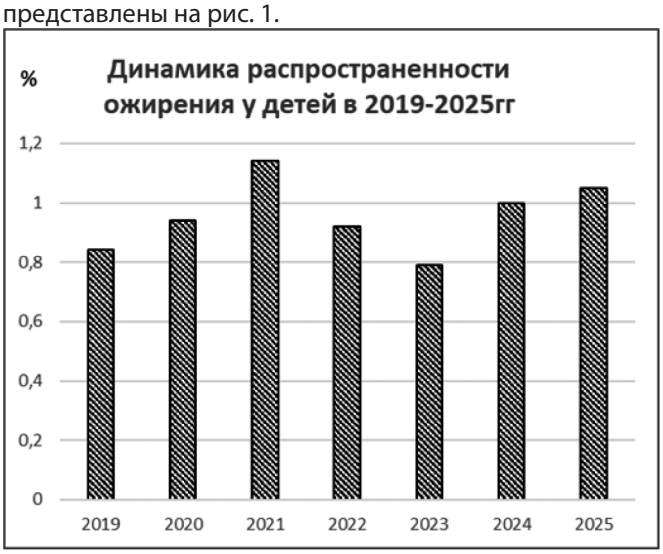
n — абсолютное количество, % — процент осмотренных, от числа детей, подлежащих профилактическому осмотру

Материалы и методы

Всем детям после проведения антропометрических измерений рассчитывали индекс массы тела (ИМТ). Избыточную массу тела и ожирение диагностировали по величине отклонения наблюдаемого значения показателя (индекса массы тела) от среднего значения в единицах SDS (standard deviation score) (SDS ИМТ). За норму принимали значения индекса массы тела в пределах ±1 SDS, избыточную массу тела диагностировали при значениях от +1 до ≤+2 SDS, ожирение — при значениях > +2 SDS. Артериальную гипертензию (АГ) диагностировали на основании результатов суточного мониторирования артериального давления (СМ АД). За артериальную гипертензию принимали уровень САД и/или ДАД ≥ 95-го процентиля кривой распределения АД в популяции для соответствующего возраста, пола и роста, а у подростков старше 16 лет АД ≥ 140/90 мм рт.ст. [3, с.7]. При лабильной АГ, систолической и/или диастолической, индекс времени гипертензии был в пределах 25–50 %; при стабильной — более 50 % в дневное или ночное время [3, с.26]. Все дети с артериальной гипертензией проходили обследование в условиях дневного или круглосуточного стационара с целью исключения вторичной артериальной гипертензии.

Результаты и обсуждение

Самая высокая распространенность ожирения у детей наблюдалась в 2021 году и составила 1,14 %, тогда же было зарегистрировано больше всего новых случаев заболевания. В 2022 и 2023 гг. выявлено снижение распространенности ожирения (0,92 % и 0,79 %, соответственно), затем вновь наблюдается рост заболеваемости, который не достигает уровня 2021 года. Динамика распространенности ожирения и избыточной массы тела у детей, а также выявления новых случаев ожирения (в процентах от количества осмотренных детей) представлены на рис. 1.



А).

Б).

Рис. 1. Динамика распространенности ожирения у детей в 2019–2025 гг/ (А) и выявления новых форм ожирения (Б)

Как видно на рисунке, за период наблюдения больше всего новых случаев ожирения было выявлено в 2021 г. и в 2024 г., что соответствует росту распространенности заболевания.

Проведен анализ динамики распространенности ожирения в разных возрастных группах обследованных детей (рис. 2). Исходя из полученных нами результатов, наиболее часто избыточная масса тела и ожирение наблюдались у подростков в возрасте 15–17 лет, что может быть объяснено снижением их физической активности на фоне большой загруженности в школе.

В то же время выявление новых случаев ожирения в этом возрасте регистрировалось значительно реже, чем у детей до 14 лет. Наши данные расходятся с результатами, полученными К.А. Елецкой и соавт. [2, с.214], со-

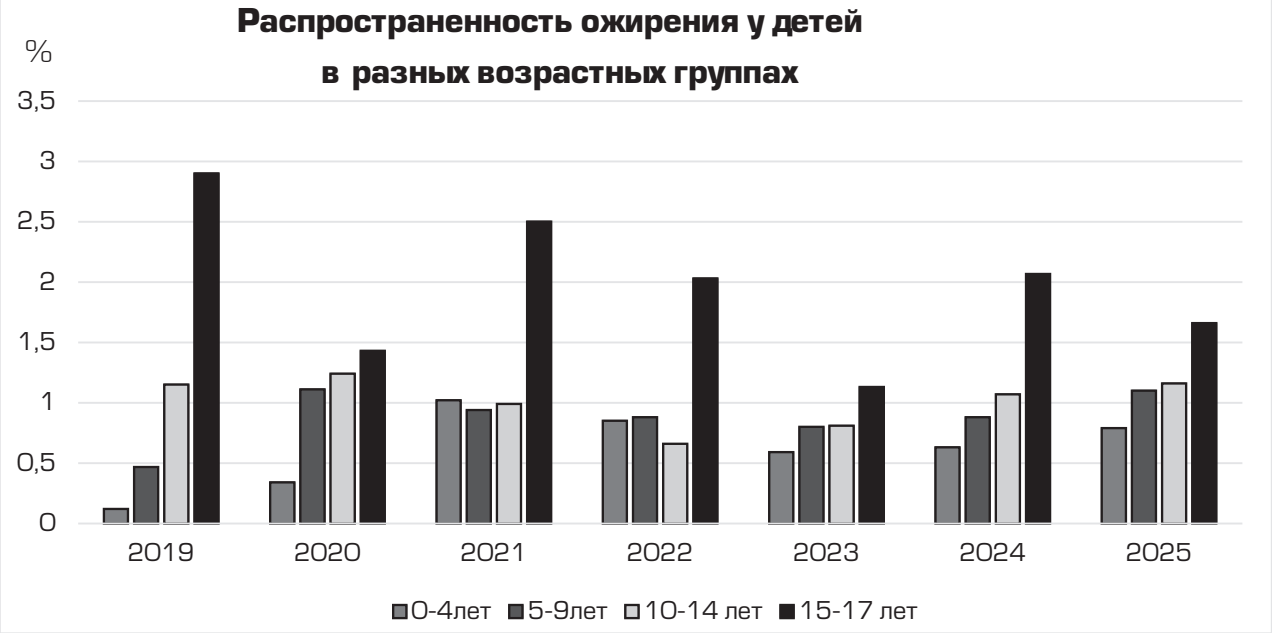


Рис. 2. Распространенность ожирения у детей в разных возрастных группах

гласно которым распространенность АГ в 15 лет была ниже, чем в 11 лет. Другие авторы [4, с. 7–8] сообщают о прогрессировании ожирения в подростковом возрасте. При анализе динамики распространенности ожирения с 2019 по 2025 гг., выявлена тенденция к уменьшению распространенности заболевания в этой возрастной группе к 2025 г. и увеличение распространенности ожирения в группе детей до 4-х лет. Нами не было выявлено существенных различий распространенности ожирения в зависимости от пола ребенка: во всех возрастных группах ожирение регистрировалось практически с одинаковой частотой у мальчиков и девочек.

При анализе заболеваемости детей артериальной гипертензией установлено, что по сравнению с 2019 г. увеличилось количество пациентов, которым был выставлен этот диагноз. Так, в 2019 г. артериальная гипертензия по данным СМ АД была диагностирована у 7 пациентов — у 5 человек лабильная и у 2 стабильная (связанная, как показало дальнейшее обследование, с заболеванием почек. Эти пациенты в дальнейшем наблюдались нефрологом). Избыточная масса тела наблюдалась только у 2-х пациентов с лабильной формой артериальной гипертензии.

При обследовании детей после завершения эпидемии COVID 19 было выявлено увеличение количества детей с артериальной гипертензией: на учет детского кардиолога был поставлен 31 ребенок с артериальной гипертензией, у 10 из которых наблюдалась стабильная АГ, вазо-ренальная артериальная гипертензия диагностирована у 3-х пациентов. Сочетание АГ с ожирением наблюдалось у 11 пациентов, все они были обследованы эндокринологом, ожирение было расценено как конституционально-экзогенное. Такое увеличение заболеваемости артериальной гипертензией, кроме ожирения, может быть связано у части детей со страхом заболевания, смерти и другими эмоциональными потрясениями.

В ряде случаев возникают сложности в выявлении причины артериальной гипертензии и ожирения у пациентов, для установления у них диагноза требуется проведение более сложных исследований и привлечение мультидисциплинарной команды. С целью демонстрации сложности диагностического процесса приводим клинический пример. Девочка А., 11 лет 9 мес., была осмотрена кардиологом в 2019 г. в связи с жалобами на периодические головные боли на фоне эмоциональных нагрузок, ощущение сердцебиений во время бега на уроках физкультуры. При осмотре: масса тела 52 кг 400 г, рост 160 см, ИМТ=20,47 (SDS ИМТ=1,0), правильное телосложение. Кожные покровы чистые, дистальный гипергидроз. Подкожно-жировая клетчатка развита удовлетворительно, распределена равномерно. В легких — везикулярное дыхание, хрипов нет, ЧДД 18 в мин. Область сердца визуально не изменена, перкуторно границы относительной тупости сердца в пределах возрастной нормы. При аускультации тоны сердца удовлетворительной звучности, ритмичные, систолический шум в V точке, без зон проведения, ослабевающий в ортостазе. SO_2=98 %; АД 115/70 мм рт ст. ЧСС лежа 80 ударов в мин, стоя — 100 уд/мин, после физической нагрузки (20 приседаний за 30 сек) — 140 уд/мин. Живот мягкий, безболезненный при пальпации. Печень у края реберной дуги, селезенка не пальпируется. Пульсация на периферических артериях удовлетворительная, дефицита пульса не выявлено.

Проведенные электрокардиография (ЭКГ), эхокардиография (ЭхоКГ), патологических изменений не выявили. Ребенку были даны рекомендации по режиму (постепенное наращивание физических нагрузок, своевременный отход ко сну, включение утренней гимнастики и ежедневных прогулок в режим дня).

Повторно обратилась к детскому кардиологу в 2021 году с жалобами на эпизоды повышения АД до 160/70–80 мм рт ст, учащение пульса до 120–124 уд\мин при обычной физической активности, значительную прибавку массы тела за предыдущие 10 мес. При уточнении анамнеза было выявлено, что значительную часть времени девочка проводит перед компьютером, общаясь on line с подружками и одноклассниками, при этом любит «перекусить» чипсами и конфетами. Родители ребенка имеют нормальную массу тела, анамнез по заболеваниям сердечно-сосудистой системы не отягощен.

При осмотре: масса тела 85,5 кг, рост 165 см, ИМТ=31,4 (SDS роста =+1,2; SDS ИМТ=2,6). Кожные покровы с проявлениями acne vulgaris на лице и спине, дистальный гипергидроз, стрии на груди, животе, бедрах. Подкожно-жировая клетчатка развита избыточно, с преимущественным распределением на лице (лунообразное лицо), животе, пояснице, бедрах. В области VII шейного позвонка определяется «климактерический горбик». В легких — везикулярное дыхание, хрипов нет, ЧДД 18 в мин. Область сердца визуально не изменена, перкуторно границы относительной тупости сердца в пределах возрастной нормы. При аускультации тоны сердца удовлетворительной звучности, ритмичные, систолический шум в V точке, без зон проведения, ослабевающий в ортостазе. SO_2=98 %; АД 145/70 мм рт ст. ЧСС лежа 98 уд\мин, стоя — 118 уд\мин, после физической нагрузки (20 приседаний за 30 сек выполнить не смогла — время проведения 1 мин) — 160 уд\мин. Живот мягкий, умеренно болезненный при пальпации в правом подреберье. Печень у края реберной дуги, симптом Ортнера — положительный. Селезенка не пальпируется. Пульсация на периферических артериях удовлетворительная, дефицита пульса не выявлено. Периферических отеков нет.

При проведении дополнительного обследования в клинических анализах крови и мочи, стандартном биохимическом анализе крови, УЗИ почек и сосудов почек — патологических изменений не выявлено; осмотр сосудов глазного дна — артерии спазмированы. При проведении ЭхоКГ размеры полостей сердца и толщина миокард соответствовали нормальным величинам, однако отмечалось умеренное повышение насосной функции сердца. При проведении СМ АД выявлена систолическая артериальная гипертензия 1ст.

Учитывая быструю прибавку массы тела и характер распределения подкожно-жирового слоя, ребенок был направлен к эндокринологу. Проводился дифференциальный диагноз между синдромом гиперкортицизма и конституционально-экзогенным ожирением, так же были назначены анализы для исключения нарушений липидного обмена. По результатам проведенных обследований, уровни АКТГ, кортизола, холестерина, триглицеридов, глюкозы оказались в норме. Ожирение у этого ребенка на данном этапе было расценено как конституционально-экзогенное. Девочке была рекомендована диета с ограничением быстрых углеводов и жиров животного происхождения, повышение физической активности за счет ежедневных пеших прогулок и привлечения к домашним делам. Однако, выполнение рекомендаций по нормализации образа жизни оказалось невозможным в связи с (со слов мамы пациентки) «большой занятостью по учебе», и тем, что девочка «не любит овощи и отварные блюда, все члены семьи предпочитают жареное и любят выпечку». При наблюдении в динамике у девочки отмечалось дальнейшее нарастание массы тела, при осмотре эндокринолога через 3 месяца была выявлена базальная инсулинорезистентность. В связи с сохраняющейся артериальной гипертензией назначена медикаментозная терапия ингибиторами ангиотензин превращающего фермента (препарат of label, с одобрения ВКК и после получения информированного согласия родителей). Ребенок состоит на диспансерном учете детского кардиолога и эндокринолога. Таким образом, развитие и дальнейшее прогрессирование ожирения у ребенка может приводить развитию не только артериальной гипертензии, но и к нарушению углеводного обмена. Этому способствует избыточное содержание в рационе жирных и мучных блюд в сочетании с низкой физической активностью.

Заключение

Избыточная масса тела и ожирение у детей являются независимым фактором риска развития различных заболеваний, в том числе артериальной гипертензии, сахарного диабета 2 типа [1, с. 30; + 8, с. 57]. Данные литературы [4, с.9] и наши наблюдения подтверждают значительный вклад образа жизни, в том числе недостаточную физическую активность, в увеличение случаев ожирения и артериальной гипертензии у детей и подростков. Важное значение в приверженности детского и подросткового населения к здоровому образу жизни имеют семейные традиции, такие как пищевые пристрастия и особенности проведения досуга. Поэтому необходима профилактическая работа с родителями ребенка, начиная еще с его раннего возраста, направленная на организацию режимных моментов и правильного питания.

При определении тактики ведения больных педиатрического профиля с артериальной гипертензией необходимо создание мультидисциплинарной команды с привлечением врачей разных специальностей, в зависимости от потребности конкретного пациента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дедов И.И., Шестакова М.В., Мельниченко Г.А. и др. Междисциплинарные клинические рекомендации «Лечение ожирения и коморбидных заболеваний» // Ожирение и метаболизм. — 2021 — Т. 18–№1. — С. 5–99. doi: https://doi.org/10.14341/omet12714
2. Елецкая К.А., Намазова-Баранова Л.С., Кайтукова Е.В., Макарова С.Г., Филимонова И.К. Связь массы тела и артериального давления у детей в возрасте 11 и 15 лет: ретроспективное одномоментное исследование. // Педиатрическая фармакология. — 2019. — №16 (4). — с. 211–215. doi: 10.15690/pf.v16i4.2050.
3. Клинические рекомендации «Артериальная гипертензия у детей», 2025 г.
4. Куличенко М.П., Ушакова С.А., Петрушина А.Д., Халидуллина О.Ю. Особенности метаболизма у детей с абдоминальным ожирением и артериальной гипертензией // Университетская медицина Урала. — 2019.— №4.— с. 6–10.
5. Кучма В.Р., Соколова С.Б., Рапопорт И.К., Чубаровский В.В. Влияние поведенческих факторов риска на формирование отклонений в состоянии здоровья обучающихся // Gigiena i Sanitariya (HYGIENE & SANITATION, RUSSIAN JOURNAL. -2022.— Vol. 101, Issue 10. — с.1206–1213. https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-10-1206-1213.
6. Лисицын Ю.П. Здравоохранение и медицинская наука: вызовы современности и пути преодоления // Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. — 2013.— №2.— с.3–4.
7. Рапопорт И.К., Чубаровский В.В., Соколова С.Б. Динамика заболеваемости детского и подросткового населения России и основные направления стратегии профилактики //Оренбургский медицинский вестник — 2024.— Т.12. — №2(46). — с. 51–55.
8. Саргсян В.Д., А.С. Сафарян В.Д., Камышова Т.В., Небиеридзе Д.В. Здоровый образ жизни как решающий фактор профилактики сердечно-сосудистых заболеваний // Профилактическая медицина. — 2019. — Т. 22, № 6–2. — С. 56–60. — DOI 10.17116/profmed20192206256. — EDN GGRXGW
9. Цукарева Е.А. Иванцова К.Н., Петрова И.М. Коморбидные состояние у детей младшего школьного возраста с ожирением и избытком массы тела //Смоленский медицинский альманах.— 2019.— №4.— с.60–64.

© Березнева Наталия Анатольевна (nberezn@mail.ru); Зелинская Дина Ильинична (di.zel@list.ru);
Осенняя Елена Викторовна (fall22@yandex.ru); Шатская Елена Владимировна (ele22779641@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.09

ПОРАЖЕНИЕ СЕРДЦА ПРИ СИСТЕМНЫХ ВОСПАЛИТЕЛЬНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЯХ У ДЕТЕЙ В КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ: ПИЛОТНЫЙ АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПРОТОКОЛ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

CARDIAC INVOLVEMENT IN PEDIATRIC SYSTEMIC INFLAMMATORY DISEASES IN THE KABARDINO-BALKARIAN REPUBLIC: A PILOT ANALYTICAL PROTOCOL AND SIMULATION MODELING

A. Gaeva
R. Ismailova
L. Tkhostova
Z. Kumykova
A. Zhangorazova
Alaiddin Judy

Summary. Pediatric systemic inflammatory diseases are associated with a substantial risk of cardiac involvement, which may present with subtle or nonspecific symptoms and therefore be detected with delay. In Kawasaki disease, coronary artery abnormalities determine the development of aneurysms and the long-term risk of ischemic events, making early diagnosis and standardized echocardiographic follow-up essential. In other systemic vasculitides and connective tissue diseases (systemic juvenile idiopathic arthritis, systemic lupus erythematosus, IgA vasculitis, ANCA-associated vasculitides, etc.), myocarditis, pericarditis, arrhythmias, and systolic dysfunction have been reported, but their incidence and patterns at the regional level remain poorly characterized [3–6]. Heterogeneity of diagnostic approaches and monitoring strategies in routine care hampers data comparability and resource planning. This study aimed to develop a standardized minimal dataset and an analytic reporting template for assessing the frequency and spectrum of cardiac involvement in children with systemic inflammatory diseases in the Kabardino-Balkarian Republic. As a pilot step, we constructed a synthetic cohort (N = 266) with a clinically plausible distribution of diagnoses, age, and sex, and calculated the proportions of major cardiac manifestations with 95 % confidence intervals. The modeled overall prevalence of cardiac involvement was 36.1 % (95 % CI 30.6–42.0), with myocarditis (24.0 %) and pericarditis (18.8 %) being the most frequent types, followed by coronary abnormalities (15.6 %) and arrhythmias (14.6 %). No statistically significant differences in cardiac involvement across diagnostic groups were observed (p = 0.223). The proposed protocol and reporting format may serve as a basis for a regional registry and for planning standardized cardiac surveillance in pediatric systemic inflammation.

Keywords: children, Kawasaki disease, systemic vasculitis, myocarditis, pericarditis, simulation modeling.

Гаева Алина Муратовна
Ассистент, ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова
aminagaevaa@mail.ru
Исмаилова Раяна Лечиевна
Врач-терапевт,
Шалинская центральная районная больница
rayana.ismailova53@gmail.com
Тхостова Лина Асланбековна
Врач-терапевт,
ГБУЗ Межрайонная многопрофильная больница МЗ КБР
tkhostova01@mail.ru
Кумыкова Залина Альбертовна
Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова
zalinakumykova33@gmail.com
Жангоразова Аида Харуновна
ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова
zhangorazova_aida@mail.ru
Алаиддин Джуди
ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова
judy.alaiddin@mail.ru

Аннотация. Системные воспалительные заболевания в детском возрасте сопровождаются риском вовлечения сердца, которое нередко протекает со стёртой симптоматикой и диагностируется с задержкой. Наиболее клинически значимым примером является болезнь Кавасаки, при которой коронарные изменения определяют формирование аневризм и долгосрочный риск ишемических событий, что требует ранней диагностики и стандартизированного эхокардиографического контроля. У детей с другими системными васкулитами и заболеваниями соединительной ткани (системный ювенильный идиопатический артрит, системная красная волчанка, IgA-васкулит, ANCA-ассоциированные васкулиты и др.) описываются миокардит, перикардит, нарушения ритма и систолическая дисфункция, однако их частота и структура на региональном уровне остаются малоформализованными [3–6]. В практическом здравоохранении отсутствие единого минимального набора переменных и унифицированного формата отчётности затрудняет сопоставление данных и планирование ресурсов для кардиологического мониторинга. Целью работы стала разработка стандартизированного протокола сбора минимального набора переменных и аналитического шаблона для оценки частоты и структуры кардиальных проявлений у детей с системными воспалительными заболеваниями в Кабардино-Балкарской Республике. В качестве пилотного шага сформирован синтетический массив (N = 266) с распределением нозологий, пола и возраста, приближенным

к клинической практике, на основе которого рассчитаны доли основных типов поражения сердца с 95 % доверительными интервалами. В модельной выборке общая доля пациентов с кардиальным поражением составила 36,1 % (95 % ДИ 30,6–42,0), наиболее частыми вариантами были миокардит (24,0 %) и перикардит (18,8 %), далее коронарные изменения (15,6 %) и аритмии (14,6 %). Сравнение долей поражения сердца между нозологическими группами статистически значимых различий не выявило (p = 0,223). Предложенные протокол и формат представления результатов могут служить основой для регионального регистра и планирования кардиологического наблюдения детей с системным воспалением.

Ключевые слова: дети, болезнь Кавасаки, системные васкулиты, миокардит, перикардит, имитационное моделирование.

Введение

Кардиальные осложнения при системных воспалительных заболеваниях детского возраста относятся к числу ключевых факторов, определяющих долгосрочный прогноз, качество жизни и потребность в специализированном наблюдении. При болезни Кавасаки ведущую роль играют поражение коронарных артерий и формирование аневризм, ассоциированных с риском тромбозов, стенозов и ишемических событий. Современные рекомендации подчёркивают необходимость раннего начала терапии, стандартизированного эхокардиографического мониторинга и стратификации риска на основе коронарных Z-показателей. [1, 2]. Для других нозологий спектр кардиальной патологии включает миокардит, перикардит, различные варианты аритмий, развитие систолической дисфункции левого желудочка и сердечной недостаточности [3], [4], [5], [6]. При IgA-васкулите и системной красной волчанке описана ненулевая частота вовлечения миокарда и перикарда, причём часть случаев выявляется только при активном инструментальном обследовании. В условиях регионального здравоохранения, включая Кабардино-Балкарскую Республику, подходы к кардиологическому мониторингу таких детей зависят от ресурсов учреждения и наличия детского кардиолога, что приводит к неоднородности данных. В этих условиях актуально создание минимального набора переменных (minimal dataset), который может заполняться в разных медицинских организациях и обеспечивать сопоставимость результатов. Имитационное моделирование позволяет на пилотном этапе протестировать структуру набора и формат отчётности без использования персональных данных реальных пациентов.

Цель

Разработать протокол сбора минимального набора переменных и унифицированный аналитический шаблон для оценки частоты и структуры поражения сердца у детей с системными воспалительными заболеваниями в Кабардино-Балкарской Республике на основе имитационного моделирования синтетической выборки.

Материалы и методы

Исследование имело методический дизайн и включало этап имитационного моделирования с последующей статистической обработкой данных. Сформирована синтетическая выборка объёмом 266 наблюдений с распределением пола и возраста (0–4, 5–9, 10–14, 15–17 лет), приближенным к ожидаемой структуре контингента детей с системным воспалением. В модель были включены следующие нозологические группы: болезнь Кавасаки, системный ювенильный идиопатический артрит (сЮИА), системная красная волчанка (СКВ), IgA-васкулит, ANCA-ассоциированные васкулиты, другие системные заболевания соединительной ткани (СЗСТ) и аутовоспалительные синдромы. Минимальный набор переменных предусматривал обязательную фиксацию пола, возраста, нозологической группы и признаков кардиального поражения: миокардит, перикардит, коронарные изменения, аритмии, систолическая дисфункция левого желудочка/сердечная недостаточность, лёгочная гипертензия, эндокардит/вальвулит [1, 6–8].

Принципы мониторинга при подозрении на коронарные осложнения болезни Кавасаки и воспалительное поражение миокарда были согласованы с основными положениями международных и национальных рекомендаций, включая документы Американской кардиологической ассоциации, экспертный консенсус ACC по миокардиту и клинические рекомендации Союза педиатров России [1, 2, 6–8]. Статистический анализ выполнялся с расчётом долей пациентов с поражением сердца (по любому из критериев) и частот отдельных типов кардиальной патологии с 95 % доверительными интервалами по методу Уилсона. Для оценки различий между нозологическими группами применялся критерий хи-квадрат; статистически значимым считался уровень $p < 0,05$.

Так как использовались синтетические данные без персональной информации, прямой риск для пациентов отсутствует. Предполагается последующая адаптация протокола для реального регистра с обязательным одобрением локальным этическим комитетом и соблюдением требований к защите персональных данных.

Результаты

Демографическая характеристика модельной выборки по полу и возрасту представлена в таблице 1, что демонстрирует отсутствие выраженного перекоса по полу и возрастным подгруппам. Распределение по нозологическим формам (таблица 2, рисунок 1) отражает преобладание болезни Кавасаки, сЮИА и СКВ, что соответствует клиническим ожиданиям для регионального центра, занимающегося системными воспалительными заболеваниями у детей.

Таблица 1.

Характеристика выборки (N=266)

Показатель	n	%
Мальчики	142	53,4
Девочки	124	46,6
0–4 года	80	30,1
5–9 лет	74	27,8
10–14 лет	72	27,1
15–17 лет	40	15,0

Таблица 2.

Нозологические группы (N=266)

Нозология	n	%
Болезнь Кавасаки	72	27,1
сЮИА	54	20,3
СКВ	48	18,0
IgA васкулит	36	13,5
ANCA васкулиты	18	6,8
Другие СЗСТ	20	7,5
Аутовосп. синдромы	18	6,8

Кардиальное поражение, определённое по наличию хотя бы одного из критериев, было отмечено у 96 из 266 наблюдений (36,1 %; 95 % ДИ 30,6–42,0). Частота поражения сердца по нозологическим группам представлена в таблице 3 и на рисунке 2: при болезни Кавасаки — 38,9 % (95 % ДИ 28,5–50,4), при сЮИА — 40,7 % (95 % ДИ 28,7–54,0), при СКВ — 41,7 % (95 % ДИ 28,8–55,7). Для IgA-васкулита, ANCA-ассоциированных васкулитов, других СЗСТ и аутовоспалительных синдромов доли варьировали от 11,1 % до 44,4 %, однако широкие доверительные интервалы отражают небольшой объём соответствующих подгрупп.

Рис. 1. Распределение нозологий в модельной выборке (N=266)

Таблица 3.

Частота поражения сердца по группам (N=266)

Нозология	Всего, n	С поражением сердца, n	%	95 % ДИ
Болезнь Кавасаки	72	28	38,9	28,5–50,4
сЮИА	54	22	40,7	28,7–54,0
СКВ	48	20	41,7	28,8–55,7
IgA васкулит	36	10	27,8	15,8–44,0
ANCA васкулиты	18	8	44,4	24,6–66,3
Другие СЗСТ	20	6	30,0	14,5–51,9
Аутовосп. синдромы	18	2	11,1	3,1–32,8
Итого	266	96	36,1	30,6–42,0

Структура типов кардиального поражения среди 96 «пациентов» с вовлечением сердца представлена в таблице 4 и на рисунке 3. Наиболее частым вариантом оказался миокардит (24,0 %), далее следовали перикардит (18,8 %), коронарные изменения (15,6 %) и аритмии (14,6 %); систолическая дисфункция левого желудочка/сердечная недостаточность, лёгочная гипертензия и эндокардит/вальвулит отмечались реже, но дополняли картину поражения сердца. [1, 5, 6].

Таблица 4.

Типы поражения сердца (N=96)

Тип поражения	n	%	95 % ДИ
Миокардит	23	24,0	16,5–33,4
Перикардит	18	18,8	12,2–27,7
Коронарные изменения	15	15,6	9,7–24,2
Аритмии	14	14,6	8,9–23,0
Систолическая дисфункция ЛЖ / СН	12	12,5	7,3–20,6
Лёгочная гипертензия	8	8,3	4,3–15,6
Эндокардит / вальвулит	6	6,2	2,9–13,0
Итого	96	100,0	–

Суммарное сравнение долей поражения сердца между нозологическими группами не выявило статистически значимых различий (хи-квадрат = 8,21; df = 6; p = 0,223), что свидетельствует об относительной однородности риска кардиальных осложнений в разных кластерах системного воспаления в пределах модельной выборки. Это подчёркивает необходимость тщательного кардиологического контроля не только при болезни Кавасаки, но и при других системных васкулитах и заболеваниях соединительной ткани у детей.

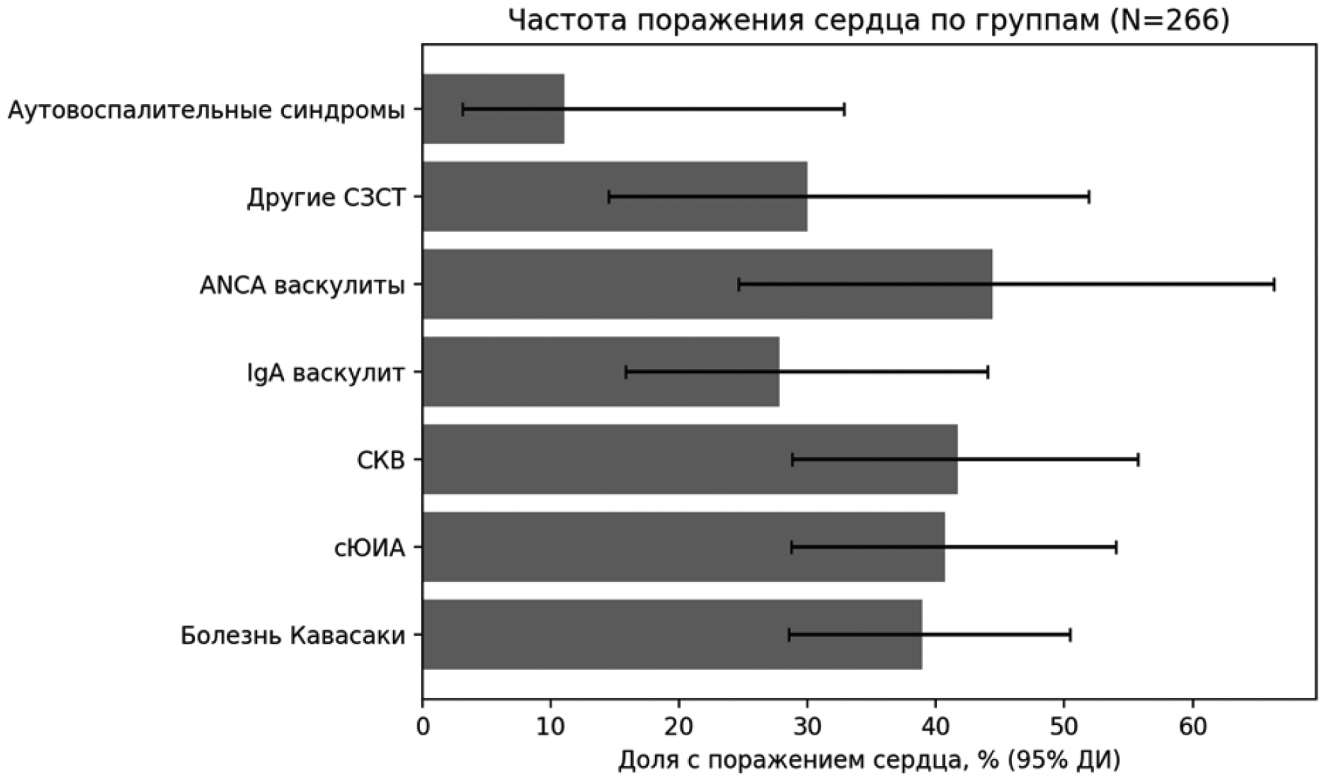


Рис. 2. Частота поражения сердца по группам (N=266)

Примечание: отрезки отражают 95 % доверительные интервалы (метод Уилсона).

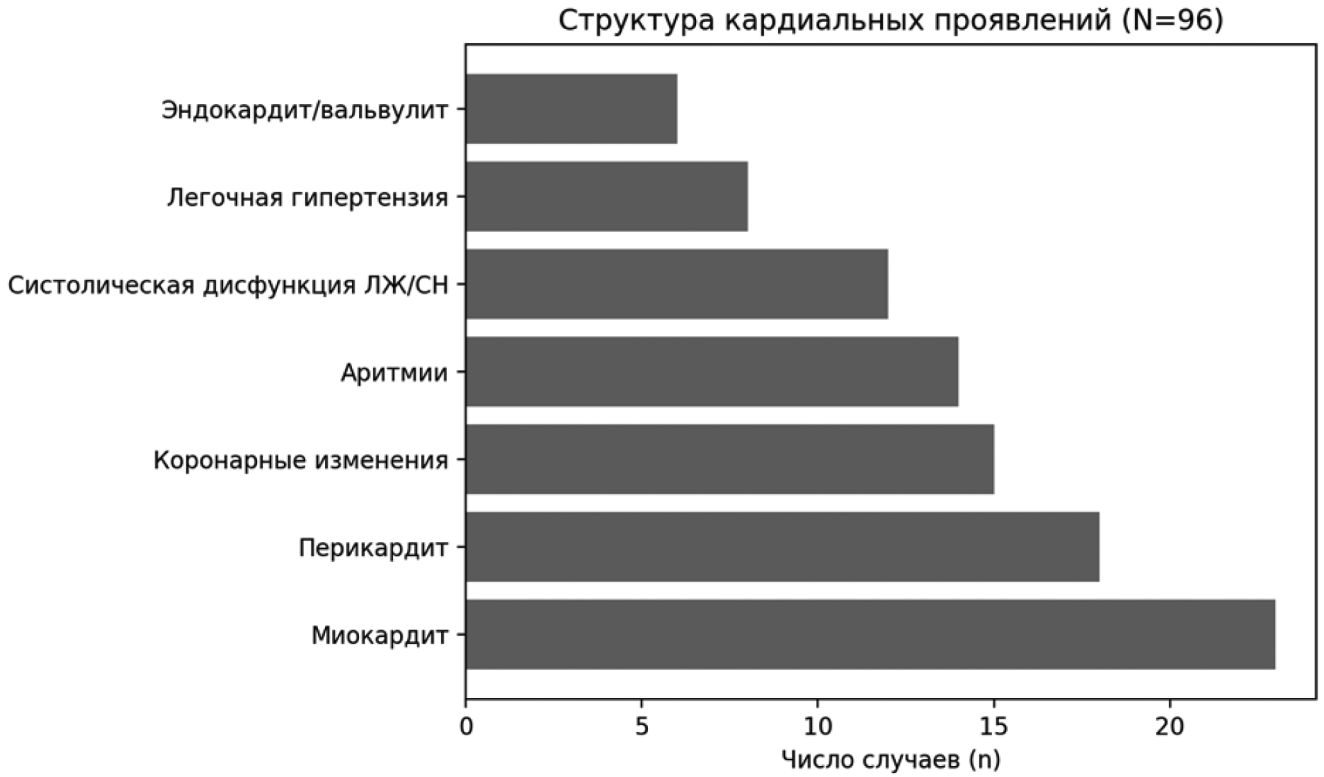


Рис. 3. Структура кардиальных проявлений (N=96)

Обсуждение

Результаты имитационного моделирования демонстрируют, что при использовании унифицированного подхода к описанию кардиального поражения возможно сопоставимое представление данных по различным нозологическим группам и возрастным категориям. Для болезни Кавасаки принципиально выделение коронарных изменений как фактора, определяющего долгосрочный прогноз; вокруг оценки коронарных артерий построены современные алгоритмы наблюдения и стратификации риска. [1, 2]. В отношении IgA-васкулита и СКВ опубликованы данные о ненулевой частоте поражения миокарда и перикарда, что требует настороженности и стандартизированного алгоритма обследования с использованием эхокардиографии, и при необходимости МРТ сердца. Для системного ювенильного идиопатического артрита описаны случаи, когда перимиокардит является ранним или первым проявлением системного воспалительного процесса, что подчёркивает важность раннего привлечения кардиолога. [3, 4]. Современные консенсусные документы по миокардиту акцентируют внимание не только на диагностике, но и на стратификации риска, определении показаний к госпитализации в специализированные отделения, использованию МРТ сердца и инвазивных методов в строго отобранных случаях. В этой парадигме внедрение минимального набора переменных и единого формата отчётности на региональном уровне может повысить качество маршрутизации и мониторинга детей с подозрением на миокардит или иные формы кардиального вовлечения [6, 7, 8]. Предложенный в работе протокол может рассматриваться как заготовка для будущего регистра, где реальные клинические данные будут заполняться в стандартизованной форме, что облегчит анализ частоты осложнений, сравнение между учреждениями и оценку эффективности профилактических и лечебных стратегий. Использование имитационного моделирования на пилотном этапе позволяет отработать структуру переменных и формат представления результатов без привлечения персональных данных.

Заключение

Разработаны протокол сбора минимального набора переменных и стандартизированный формат аналитической отчётности, предназначенные для оценки частоты и структуры поражения сердца у детей с системными воспалительными заболеваниями в региональном контексте. На синтетической выборке объёмом 266 наблюдений показано, что при использовании предложенного протокола возможно унифицированно описывать кардиальные проявления с указанием 95 % доверительных интервалов и выполнением межгрупповых сравнений. В модельной выборке поражение сердца регистрировалось у 36,1 % «пациентов», при этом наиболее частыми типами были миокардит и перикардит, а также коронарные изменения и аритмии, что согласуется с современными представлениями о спектре кардиальных осложнений при болезни Кавасаки и других системных

воспалительных заболеваниях у детей [1–6]. Разработанный протокол и аналитический шаблон могут служить основой для создания регионального регистра и внедрения единых подходов к кардиологическому мониторингу детей с системным воспалением в Кабардино-Балкарской Республике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jone P.N., Tremoulet A., Choueiter N. и др. Обновление диагностики и ведения болезни Кавасаки: научное заявление Американской кардиологической ассоциации. Circulation. 2024;150(23): e481–e500. doi:10.1161/CIR.0000000000001295.
2. McCrindle B.W., Rowley A.H., Newburger J.W. и др. Диагностика, лечение и долгосрочное ведение болезни Кавасаки: научное заявление для специалистов здравоохранения. Circulation. 2017;135: e927–e999.
3. Clinical characteristics and risk factors of cardiac involvement in pediatric IgA vasculitis: a 7-year retrospective study from a single tertiary center. PubMed PMID: 38300364. 2024.
4. Chourabi S. и др. Cardiac involvement in systemic lupus erythematosus: interest of 2D echocardiography with strain. Lupus. 2024. doi:10.1177/09612033241266990.
5. Ciancia S., Cappella M., De Fanti A., Iughetti L. Perimyocarditis as first sign of systemic-onset juvenile idiopathic arthritis treated successfully with anakinra: a case-based review. Acta Biomed. 2020. PubMed PMID: 33525302.
6. Drazner M.H., Bozkurt B., Cooper L.T. и др. 2024 ACC Expert Consensus Decision Pathway on Strategies and Criteria for the Diagnosis and Management of Myocarditis. Journal of the American College of Cardiology. 2025;85(4):391–431. doi: 10.1016/j.jacc.2024.10.080.
7. Слизисто-кожный лимфонодулярный синдром (синдром/болезнь Кавасаки) у детей. Клинические рекомендации Союза педиатров России. URL: https://www.pediatr-russia.ru/ (дата обращения: 24.02.2026).
8. Миокардит у детей. Клинические рекомендации Союза педиатров России. URL: https://www.pediatr-russia.ru/ (дата обращения: 24.02.2026).

© Гаева Алина Муратовна (aminagaevaa@mail.ru); Исмаилова Раяна Лечиевна (rayana.ismailova53@gmail.com);
Тхостова Лина Асланбековна (tkhostova01@mail.ru); Кумыкова Залина Альбертовна (zalinakumykova33@gmail.com);
Жангоразова Аида Харуновна zhangorazova_aida@mail.ru); Алаиддин Джуди (judy.alaiddin@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.10

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АНТАГОНИСТОВ PCSK9 У ПАЦИЕНТОВ ОЧЕНЬ ВЫСОКОГО РИСКА

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS AND SAFETY OF PCSK9 ANTAGONISTS IN PATIENTS WITH A VERY HIGH RISK

A. Janibekova
M. Uzdenov
L. Janibekova
F. Aibazova

Summary. According to the modern concept of the cardiovascular continuum, the initial stage in the development of neurohumoral dysregulation processes is the risk factors (RF) of cardiovascular diseases (CVD). It has been established that one of the significant risk factors of CVD is a violation of lipid metabolism (hypercholesterolemia (HC), dyslipidemia). According to the results of the multicenter epidemiological study ESSE-RF3 (Epidemiology of Cardiovascular Diseases in the Regions of the Russian Federation. Third Survey), the prevalence of hypercholesterolemia and elevated low-density lipoprotein cholesterol (LDL-C) levels is very high, at 59.7 % and 69.1 %, respectively [1,3]. The presented data were obtained from a survey of men and women aged 35–74 years living in the Russian Federation for the period from 2020 to 2022. Numerous epidemiological studies have also revealed a linear relationship between the level of lipid metabolism disorders and cardiovascular mortality [2,7]. In this regard, in recent years, the European Society of Cardiology (ESC 2018) has also revised the target LDL cholesterol levels. For example, for patients with a very high cardiovascular risk, the target LDL cholesterol level is less than 1.4 mmol/L [3,9]. These findings have led to a revision of approaches to the treatment of atherosclerosis and the development of an innovative approach with the creation of a completely new group of lipid-lowering drugs, particularly proprotein convertase subtilisin/kexin type 9 (PCSK9) inhibitors.

Keywords: PCSK9 antagonist, LDL cholesterol, dyslipidemia, hypercholesterolemia, cardiovascular diseases.

Джанибекова Асият Рамазановна
кандидат медицинских наук, доцент, ФГБОУ ВО Северо-Кавказская государственная академия, г. Черкесск
asia.janibekova@mail
Узденов Марат Борисович
кандидат медицинских наук, доцент, ФГБОУ ВО Северо-Кавказская государственная академия, г. Черкесск
f_inostr_mi@ncsa.ru
Джанибекова Лейла Рамазановна
кандидат медицинских наук, врач-кардиолог, РГБ ЛПУ Карачаево-Черкесская республиканская клиническая больница; главный внештатный специалист-кардиолог Министерства здравоохранения Карачаево-Черкесской Республики; доцент, ФГБОУ ВО Северо-Кавказская государственная академия, г. Черкесск
lady.djanibekova@mail.ru
Айбазова Фатима Унуховна
кандидат биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО Северо-Кавказская государственная академия, г. Черкесск
fat8149@yandex.ru

Аннотация. Согласно современной концепции сердечно-сосудистого континуума пусковым этапом в развитии процессов нейрогуморальной дисрегуляции являются факторы риска (ФР) сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ). Установлено, что одним из значимых факторов риска ССЗ является нарушение липидного обмена (гиперхолестеринемия (ГХС), дислипидемия). Согласно результатам проведенного многоцентрового эпидемиологического ЭССЕ-РФЗ исследования (Эпидемиология сердечно-сосудистых заболеваний в регионах Российской Федерации. Третье обследование) было установлено, что распространенность ГХС и повышенного уровня холестерин липопротеинов низкой плотности (ХС ЛПНП) очень высока и составляет 59,7 и 69,1 %, соответственно [1,3]. Представленные данные были получены при обследовании мужчин и женщин в возрасте 35–74 лет, проживающих в Российской Федерации за период с 2020 по 2022 гг. Многочисленные эпидемиологические исследования также выявили линейную зависимость между самим уровнем нарушения липидного обмена и сердечно-сосудистой смертностью [2,7]. В связи, с чем за последние годы Европейским обществом кардиологов (European Society of Cardiology (ESC 2018)) были также пересмотрены показатели целевого уровня ХС ЛПНП. Так, например, для категории пациентов очень высокого сердечно-сосудистого риска целевым уровнем ХС ЛПНП считается уровень менее 1,4 ммоль/л [3,9]. Данные факты послужили также причиной пересмотра подходов к терапии атеросклероза и разработки инновационного подхода с созданием совершенно новой группы гиполипидемических препаратов, в частности антагонистов пропротеиновой конвертазы субтилизин/кексин типа 9 (PCSK9).

Ключевые слова: антагонист PCSK9, ХС ЛПНП, дислипидемия, гиперхолестеринемия, сердечно-сосудистые заболевания.

На протяжении многих лет именно клинические проявления атеросклероза в виде тромбоза артерии являются одной из ведущих причин смертности и инвалидизации населения в целом [4,5].

На графике представлены изменения коэффициентов смертности и рождаемости населения в России за 1950–2024 годы. Данные по России приведены из официальных ежегодников Росстата: «Российский статистический ежегодник» [I.6], «Демографический ежегодник России» [I.24], «Здравоохранение в России» [I.29] всех лет публикации.

В России, начиная с середины 1970-х годов и до 2014 года включительно, более половины смертей были обусловлены ССЗ [7]. В отдельные годы (2007–2008 гг.) доля умерших от этого класса причин смерти достигала 57 %. По данным Федеральной службы государственной статистики, ССЗ занимают первое место в структуре смертности на территории РФ [4]. Анализ количественного изменения коэффициента смертности населения РФ по основным классам причин наступления смерти за последние 9 лет показал, что смертность от ССЗ имеет высокий уровень (573,2 на 100 тыс. населения в 2019 г.) и занимает первое место среди остальных причин [5].

Динамика изменения доли основных причин летального исхода в общем количестве умерших приведены в табл. 1.

Данные по России приведены из официальных ежегодников Росстата: «Российский статистический ежегодник» [I.6], «Демографический ежегодник России» [I.24], «Здравоохранение в России» [I.29] всех лет публикации.

Вместе с тем, в некоторых экономически развитых странах, благодаря эффективно проводимому лечению и первичной профилактике, в последние годы наблюдается тенденция к снижению смертности от негативных последствии атеротромбоза [12,13]. Установлено, что современная концепция сердечно-сосудистого континуума подразумевает развитие атеросклероза через процессы нейрогуморальной дисрегуляции. При этом началом этого процесса является наличие факторов риска, из которых одним из наиболее значимых считается дислипопротеидемия (ДЛП) [3,8].

Результаты многочисленных эпидемиологических и клинических исследований свидетельствуют о том, что повышенный уровень общего холестерина (ХС), ХС липопротеинов низкой плотности (ЛНП) и/или триглицери-

Рис. 1. Коэффициент рождаемости и смертности населения в России

Коэффициенты рождаемости и смертности населения в России. Источники: [I.6, 99].

Таблица 1.

Основные причины смерти в общем количестве умерших

Причины	1970	1980	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Болезни системы кровообращения	47,5	52,7	55,3	52,8	55,3	56,4	56,1	48,7	43,9	38,3	43,8
Новообразования	17	14,9	17,4	13,6	13,4	12,5	14,4	15,7	13,8	11,4	14,6
Внешние	14,5	15	12	15,8	14,3	13,7	10,2	9,3	6,5	5,7	7,7

дов (ТГ) вносит существенный вклад в развитие сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ) атеросклеротического генеза. Так, в 2019 г. в мире от ишемической болезни сердца (ИБС) умерло ~ 9 млн человек, причем смерть >3,7 млн человек была связана с высоким уровнем ХС ЛНП. Помимо клинических последствий, ДЛП связана и со значительным экономическим ущербом, который включает затраты на коррекцию данного фактора риска (ФР), а также на лечение заболеваний и осложнений, связанных с ним [6,11].

Учитывая, что данный фактор риска относится к числу модифицируемых, это повышает научно-практический интерес к разработке оптимальных подходов к их выявлению и своевременной эффективной коррекции. Вышеизложенная актуальность послужила основанием для проведения настоящего исследования.

Цель

Оценка эффективности и безопасности длительного применения антагонистов PCSK9 (эволокумаб) в терапии атеросклероза у пациентов очень высокого сердечно-сосудистого риска за период 1 год.

Материал и методы

В исследование были включены 12 пациентов (9 мужчин и 3 женщин) с постинфарктным кардиосклерозом в возрасте 53–67 лет, проходивших лечение в многопрофильных клиниках. Все пациенты с ХСН II–III класса (по NYHA) и с промежуточной фракцией выброса — СНпФВ (ФВ от 40 до 49 %), а также отсутствием достижения целевых уровней липидов холестерина липопротеидов низкой плотности (ХС ЛНП) при применении двойной гиполипидемической терапии с максимальными дозами статина и эзетимиба в течении предшествующих 6 месяцев. К лечению был добавлен эволокумаб, препарат из группы антагонистов пропротеиновой конвертазы субтилизин/кексин типа 9 (PCSK9). Препарат вводился в дозе 140 мг подкожно 1 раз в 2 недели в условиях дневного стационара многопрофильных клиник. Период наблюдения составил 12 месяцев. Из обследованных у 37.5 % пациентов были выявлены случаи с семейной гиперхолестеринемией (СГХС). Количество пациентов, перенесших инфаркт миокарда с подъемом сегмента ST (ИМcST), составили 5 человек (62.5 %), и без подъема сегмента ST (ИМбST) соответственно 3 (37.5 %). Всем пациентам поведена инструментальная диагностика: ЭхоКГ, холтеровское мониторирование ЭКГ (ХМ ЭКГ). Лабораторная диагностика включала в себя общий клинический анализ крови, анализ показателей липидного спектра, гликированного гемоглобина, липопротеида (а), Апо (В)), N-концевого натрийуретического мозгового пептида (NT-proBNP), АЛТ, АСТ, билирубин, КФК. Анализ динамики данных показателей проводился на 3, 6, 12 месяц обследования, также пациенты наблюдались на предмет развития побочных эффектов, указанных в инструкции препарата.

Статистический анализ проводился с использованием программа Statistica 22.0 (Statsoft Inc., США). Данные представлены в виде среднего (M) и стандартного отклонения (SD). Для определения статистической значимости различий использовали непарный t-критерий Стьюдента. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты

При анализе липидснижающего эффекта эволокумаба у обследуемых пациентов уже к 3 месяцам таргетной терапии было установлено статистически значимое снижение уровня общего холестерина (ОХС) и ХС ЛПНП. Уровнь ХС ЛПВП и Тг в заданный период статистически значимо не отличался от первоначальных показателей. Уровень ОХС снизился с 7,4±1,7 ммоль/л исходного до 3,6±1,4 ммоль/л (на 48,6 %), $p < 0,05$, а уровень ХС ЛПНП — с 3,09±0,84 ммоль/л до 1,02±0,62 ммоль/л (на 30,9 %), $p<0,05$ соответственно. В среднем снижение уровня ХС ЛПНП у 75 % пациентов после присоединения эволокумаба было отмечено уже в 1 месяц терапии на 59,7 %. По нашим данным, рекомендуемого целевого уровня ХС ЛПНП для пациентов очень высокого риска достигли на 6 месяц терапии 75,0 % обследуемых, что свидетельствует о высокой эффективности препарата. За время наблюдения у пациентов, регулярно применявших препарат, достигнутый эффект сохранялся. Данные пациенты составили группу с полным ответом на проводимую терапию. Тем не менее, у оставшихся 25,0 % пациентов рекомендуемых показателей уровня ХС ЛПНП достигнуть не удалось. Данные пациенты, с установленной семейной ГХС, нарушали прием препарата, аргументируя неудобством посещения клиники для инъекции. Корректировать уровень ХС ЛПНП до целевых показателей на 6 месяц терапии у них не удалось. В связи с отсутствием должного эффекта от комбинированной гиполипидемической терапии дальнейшее их лечение осуществлялось в условиях Центра атеросклероза и нарушений липидного обмена, г. Санкт-Петербург. У всех пациентов при применении антагонистов PCSK9 в указанный выше период нежелательных реакции выявлено не было, также лабораторные показатели безопасности терапии оставались неизменными, что свидетельствует о хорошей переносимости препарата.

Заключение

Достижение целевых значений показателей ХС ЛПНП, несмотря на наличие таких эффективных гиполипидемических групп препаратов, как ингибиторов ГМГ-КоА-редуктазы и селективный ингибитор всасывания

ХС в кишечнике, не всегда представляется возможным. Однако, благодаря применению препаратов моноклональных антител к PCSK9, генно-инженерных конструкции, появилась альтернатива в лечении атеросклероза, для пациентов с отсутствием контроля над уровнем холестерина липопротеидов низкой плотности (ХС ЛНП) при применении двойной гиполипидемической терапии с максимальными дозами статина и эзетимиба.

Список сокращений.
БА — болезнь Альцгеймера,
БП — болезнь Паркинсона,
ИБС — ишемическая болезнь сердца,
ИМ — инфаркт миокарда,
КМП — ишемическая кардиомиопатия,
КН — когнитивные нарушения,
КНПСР — краткая номенклатура причин смерти Росстата,
МКБ — Международная статистическая классификация болезней и проблем, связанных со здоровьем,
ППС — первоначальная причина смерти,
ПР — психические расстройства,
ПФХИБС — прочие формы хронической ишемической болезни сердца,
РФ — Российская Федерация,
СКС — стандартизованные коэффициенты смертности,
ССЗ — сердечно-сосудистые заболевания,
СРСКС — среднерегиональные значения стандартизованного коэффициента смертностью,
ХИБС — хроническая ишемическая болезнь сердца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Драпкина О.М., Имаева А.Э., Куценко В.А. и др. Дислипидемии в Российской Федерации: популяционные данные, ассоциации с факторами риска. Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2023;22(8S):3791. https://doi.org/10.15829/1728-8800-2023-3791.
2. Самородская И.В., Старинская М.А., Бойцов С.А. Динамика региональных показателей смертности от сердечно-сосудистых заболеваний и когнитивных нарушений в России 2019–2021 годах. Российский кардиологический журнал. 2023;28(4):5256. https://doi.org/10.15829/1560-4071-2023-5256
3. Мешков А.Н., Ершова А.И., Деев А.И. и др. Распределение показателей липидного спектра у мужчин и женщин трудоспособного возраста в Российской Федерации: результаты исследования ЭССЕ-РФ за 2012–2014 гг. Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2017;16(4):62–67. https://doi.org/10.15829/1728-8800-2017-4-62-67.
4. Карамнова Н.С., Рытова А.И., Швабская О.Б. Ассоциации привычек питания и употребления алкоголя с сердечно-сосудистыми заболеваниями и сахарным диабетом во взрослой популяции. Результаты эпидемиологического исследования ЭССЕ-РФ. Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2021;20(5):2982. https://doi.org/10.15829/1728-8800-2021-2982.
5. Косолапов В.П., Ярмонова М.В. Анализ высокой сердечно-сосудистой заболеваемости и смертности взрослого населения как медико-социальной проблемы и поиск путей ее решения. Уральский медицинский журнал. 2021;20(1):58–64. https://doi.org/10.52420/2071-5943-2021-20-1-58-64
6. Zhu J., Zhang Y., Wu Y., et al. Obesity and dyslipidemia in Chinese adults: a cross-sectional study in Shanghai, China. Nutrients. 2022;14(11):2321. https://doi.org/10.3390/nu14112321.
7. Драпкина О.М., Шальнова С.А., Имаева А.Э. и др. Эпидемиология сердечно-сосудистых заболеваний и их факторов риска в регионах Российской Федерации. Третье исследование (ЭССЕ-РФ-3). Обоснование и дизайн исследования. Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2022;21(5):3246. https://doi.org/10.15829/1728-8800-2022-3246.
8. Драпкина О.М., Имаева А.Э., Куценко В.А., и др. Дислипидемии в Российской Федерации: популяционные данные, ассоциации с факторами риска. Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2023;22(8S):3791. https://doi.org/10.15829/1728-8800-2023-3791.
9. NCD Risk Factor Collaboration (NCD-RisC). Repositioning of the global epicentre of non-optimal cholesterol. Nature. 2020; 582:73–77. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2338-1.
10. Карамнова Н.С., Рытова А.И., Швабская О.Б. Ассоциации привычек питания и употребления алкоголя с сердечно-сосудистыми заболеваниями и сахарным диабетом во взрослой популяции. Результаты эпидемиологического исследования ЭССЕ-РФ. Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2021;20(5):2982. https://doi.org/10.15829/1728-8800-2021-2982.
11. Арабидзе Г.Г. Обзор материалов 88 Конгресса Европейского общества по атеросклерозу (EAS), проходившего 04–07 октября 2023 г. в online-формате Атеросклероз и дислипидемии. 2023;4(41):44–6. https://doi.org/10.34687/2219-8202.JAD.2020.04.0006.
12. Ferri N., Grego M.F., Corsini A., Ruscica M. Proprotein convertase subtilisin/kexin type 9: an update on the cardiovascular outcome studies. Eur Heart J Suppl. 2020;22(Suppl E): E64–7. https://doi.org/10.1093/eurheartj/suaa063
13. Katzmann J.L., Cupido A.J., Laufs U. Gene therapy targeting PCSK9. Metabolites. 2022;12(1):70. https://doi.org/10.3390/metabo12010070.

© Джанибекова Асият Рамазановна (asia.janibekova@mail); Узденов Марат Борисович (f_inostr_mi@ncsa.ru);
Джанибекова Лейла Рамазановна (lady.djanibekova@mail.ru); Айбазова Фатима Унуховна (fat8149@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.14

ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КАЛЬЦИЯ И ВИТАМИНА D В КРОВИ У ПОДРОСТКОВ КРАЙНЕГО СЕВЕРА (НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ))

CHANGES IN CALCIUM AND VITAMIN D CONTENT IN THE BLOOD OF TEENAGERS IN THE FAR NORTH (ON THE EXAMPLE OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA))

O. Ivanova

Summary. *Relevance*: The Republic of Sakha (Yakutia) is a region with unique climatic and geographical conditions: a long period of low temperatures, lack of solar insolation, hypoxia during a long winter (8 months). All this forms a deficiency of calcium and vitamin D in the population of this region. Currently, there are no correction schemes for vitamin D and calcium deficiency for children living in the Arctic zone of Russia. *The aim of the study* was to determine the prevalence of vitamin D and calcium deficiency in adolescents of the Republic of Sakha (Yakutia) and to develop vitamin D prescribing schemes for adolescents aged 12 to 16 years of the Republic of Sakha (Yakutia). Research materials and methods: 1,000 adolescents of the Republic of Sakha (Yakutia) aged 12 to 16 years old were examined based on the Consultative Polyclinic of the Republican Hospital No. 1 of the National Center of Medicine in a free sample.

The results of the study: 1,000 adolescents of the Republic of Sakha (Yakutia) aged 12 to 16 years were examined based on the Consultative Polyclinic of the Republican Hospital No. 1 of the National Center of Medicine in a free sample. Changes (deformations) of the musculoskeletal system were noted in 503 children. In 503 (50 %) children with deformities of the musculoskeletal system (juvenile scoliosis, keeled and funnel-shaped chest, hallux valgus deformities of the legs, flat foot, osteochondropathy). Caries was detected in 60 % of patients, and 15 % had multiple caries. Changes (deformations) of the musculoskeletal system were noted in 503 children. In 503 (50 %) children with changes in the musculoskeletal system (postural disorders, juvenile scoliosis, keeled and funnel-shaped chest, hallux valgus deformities of the legs, flat foot, osteochondropathy). Caries was detected in 60 % of patients, and 15 % had multiple caries. 80 % of adolescents living in the Republic of Sakha (Yakutia) have decreased vitamin D levels, and 50 % have decreased serum calcium levels.

Conclusion: 80 % of adolescents living in the Republic of Sakha (Yakutia) have decreased vitamin D levels, and 50 % have decreased serum calcium levels.

Keywords: deformations, vitamin, teenager, calcium, Arctic region.

Иванова Ольга Николаевна
доктор медицинских наук, профессор,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова. г. Якутск
olgadoctor@list.ru

Аннотация. *Актуальность*: Республика Саха (Якутия) является регионом с уникальными климато-географическими условиями: длительный период низких температур, недостаток солнечной инсоляции, гипоксия в период длительной зимы (8 мес.). Все это формирует дефицит кальция и витамина D у населения данного региона. В данное время не разработаны схемы коррекции дефицита витамина D и кальция для детей, проживающих в условиях Арктической зоны России. *Цель исследования*: Определить распространенность дефицитных состояний витамина D и кальция у подростков Республики Саха (Якутия) и разработка схем назначения витамина D у подростков от 12 до 16 лет Республики Саха (Якутия).

Материалы и методы исследования: Обследовано 1000 подростков Республики Саха (Якутия) в возрасте от 12 до 16 лет на базе Консультативной поликлиники Республиканской больницы №1 Национального центра медицины в свободной выборке. У родителей каждого ребенка было взято добровольное информированное согласие на обработку индивидуальных данных и публикацию изображений, а также на медицинские вмешательства. План исследования был рассмотрен на заседании этического комитета №118 от 17.11.2024.

Результаты исследования: Обследовано 1000 подростков Республики Саха (Якутия) в возрасте от 12 до 16 лет на базе Консультативной поликлиники Республиканской больницы №1 Национального центра медицины в свободной выборке. При осмотре педиатра были выявлены изменения костной системы у 503 (50 %) обследованных детей: нарушения осанки, сколиозы юношеские, килевидная и воронкообразная грудная клетка, вальгусные деформации ног, плоская стопа, остеохондропатии. При осмотре стоматолога у 60 % пациентов выявлен кариес, 15 % — множественный кариес. У 80 % подростков, проживающих в Республике Саха (Якутия) отмечен сниженный уровень витамина D, у 50 % снижен уровень кальция в сыворотке крови.

Заключение: У 80 % подростков, проживающих в Республике Саха (Якутия) отмечен сниженный уровень витамина D, у 50 % снижен уровень кальция в сыворотке крови.

Ключевые слова: деформации, витамин, подросток, кальций, Арктический регион.

Введение

Особенностями проживания жителей в условиях Республики Саха (Якутия) являются длительный период низких температур, недостаток солнечной инсоляции, гипоксия в период длительной зимы (в течение 8 мес.)[1.4]. В длительный период низких температур (–50 ° и –55 °) дети вынужденно сидят дома. Гиподинамия детского и взрослого населения является вынужденной в период холодов. Данные условия для растущего организма, определяют ряд факторов, влияющих на формирование костно-мышечной системы и внутренних органов [6,10]. Пубертатный период у подростков характеризуется резким ростовым скачком и высокой потребностью в микроэлементах и витаминах [2]. У подростков, проживающих в РС (Я) (Республике Саха (Якутия)) отмечается высокая распространенность деформаций и изменений костной системы (грудной клетки, костей рук и ног), нарушений осанки, плоскостопия и т.д [6, 7]. В 2018 году Союзом педиатров России была разработана национальная программа: «Недостаточность витамина D у детей и подростков Российской Федерации: современные подходы к коррекции» в 2018 [5]. Данные рекомендации были разработаны для детей и подростков Средней полосы России и Европейского Северного региона [3]. В данное время не разработаны схемы коррекции дефицита витамина D и кальция для детей, проживающих в условиях Арктической зоны России [8,9]. Климатические условия Республики Саха (Якутия) отличаются от климато-географических условий Европейского Северного региона и требуют более длительного приема микроэлементов у подростков в период скачкового роста.

Цель исследования: Определить распространенность дефицитных состояний витамина D и кальция у подростков Республики Саха (Якутия) и разработка схем назначения витамина D у подростков от 12 до 16 лет Республики Саха (Якутия).

Материалы и методы исследования

Обследовано 1000 подростков Республики Саха (Якутия) в возрасте от 12 до 16 лет на базе Консультативной поликлиники Государственного автономного учреждения Республиканской больницы № 1 Национального центра медицины Республики Саха (Якутия) (ГАУ РБ№1 НЦМ) г. Якутск в свободной выборке из разных регионов республики. Критериями включения был возраст детей. Пол, этническая принадлежность значения не имели. Критериями исключения были врожденные патологии костно-мышечной системы у детей и врожденная наследственная патология. У родителей каждого ребенка было взято добровольное информированное согласие на обработку индивидуальных данных и публикацию изображений, а также на медицинские вмешательства. План обследования был рассмотрен на заседании этического комитета №118 от 17.11.2024. У всех детей после физикального осмотра педиатром определяли уровень 25(OH)D в сыворотке крови для оценки обеспеченности 25(OH)D и уровень кальция сыворотки крови. Анализ крови на 25(OH)D производился методом хемилюминесцентного иммуноанализа на микрочастицах. Уровень 25(OH)D расценивался как адекватный при показателе от 30 до 100 нг/мл, недостаточность — от 20 до 30 нг/мл, дефицит — от 10 до 20 нг/мл и выраженный дефицит витамина D при менее 10 нг/мл.

Статистическая обработка материала выполнена с использованием программы Microsoft Office Excel 2016, с применением прикладных статистических программ Statistica 6.0, SPSS 16.0. Использовали общепринятые параметрические и непараметрические методы сравнения. Достоверность различий признаков определяли с помощью критерия Стъюдента, они считались достоверными при $p < 0,05$.

Результаты исследования

Все обследуемые пациенты были осмотрены педиатром и ортопедом-травматологом.

При осмотре педиатра были выявлены изменения костной системы у 503 (50 %) обследованных детей: нарушения осанки, сколиозы юношеские, килевидная и воронкообразная грудная клетка, вальгусные деформации ног, плоская стопа, остеохондропатии. При осмотре стоматолога у 60 % пациентов выявлен кариес, 15 % — множественный кариес (рисунок 1).

Проведен анализ травм и переломов у детей обследованной группы. Среди детей выявлены переломы верхних конечностей 213 случаев, костей черепа и лица 25, переломы нижних конечностей 139 случаев, переломы позвоночника отмечены у 84 детей. Повторные переломы отмечены у 10 % больных (рисунок 2).

У всех детей определяли уровень кальция крови. Выявлено снижение уровня кальция в крови у 50 % обследованных детей, уровень ионизированного кальция снижен 37 %, средний показатель Д25(OH)D у 80 % обследованных детей. В таблице 1 приведены средние показатели биохимического анализа крови у обследованных подростков.

Как видно из таблицы 1, отмечено резкое снижение среднего показателя витамина Д25(OH) D, содержание общего кальция и ионизированного кальция.

Всем детям определялся уровень активного 25(OH) D3. У 80 % детей отмечено снижение уровня витамина D 25(OH)D3 ниже 20 нг/мл, из них ниже10 нг/мл у 20 % обследованных.

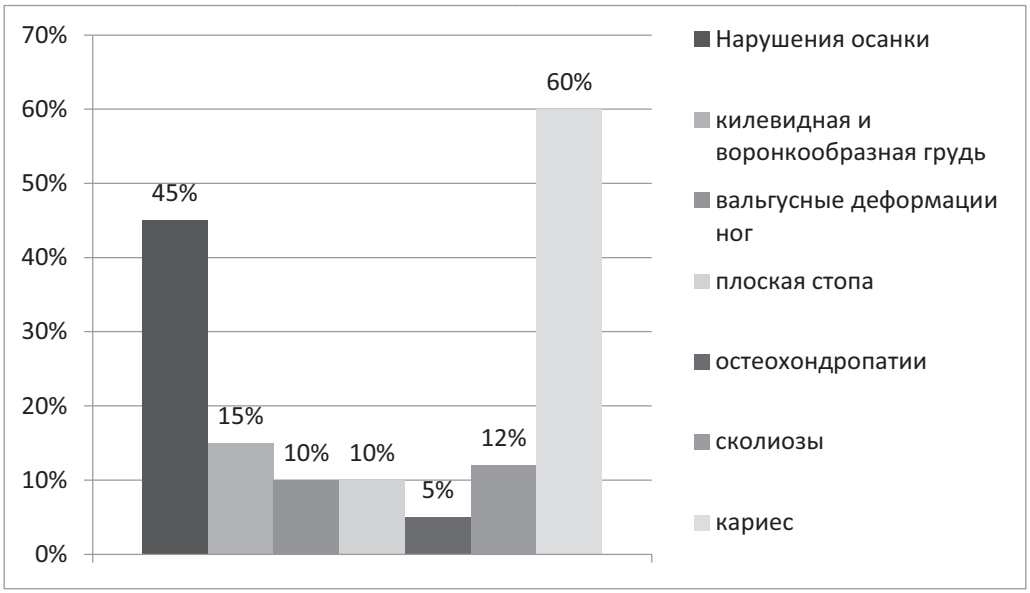


Рис. 1. Выявленные патологические изменения костной системы у обследованных подростков Республики Саха (Якутия)

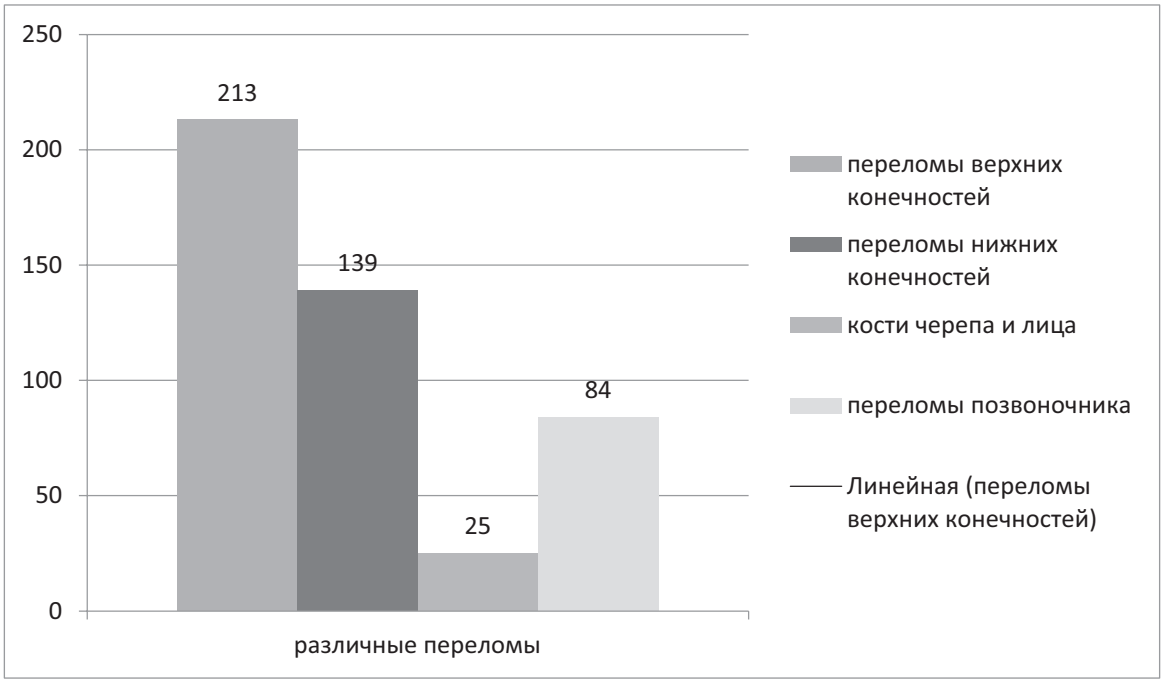


Рис. 2. Переломы костей верхних конечностей у детей обследованной группы РС (Я)

Таблица 1.

Показатели биохимического анализа крови у обследованных подростков

Показатели биохимического анализа крови	Средний показатель содержания кальция ммоль/л; n=1000		Средний показатель ионизированного кальция ммоль/л n=1000		Средний показатель витамина Д 25(OH) D Нг /мл n=1000	
	M±m	Референсный интервал	M±m	Референсный интервал	M±m	Референсный интервал
Группа обследованных детей	1,25±0,03	2,10–2,55	0.48±0.01	1,22–1,37	10±0.05	30–100

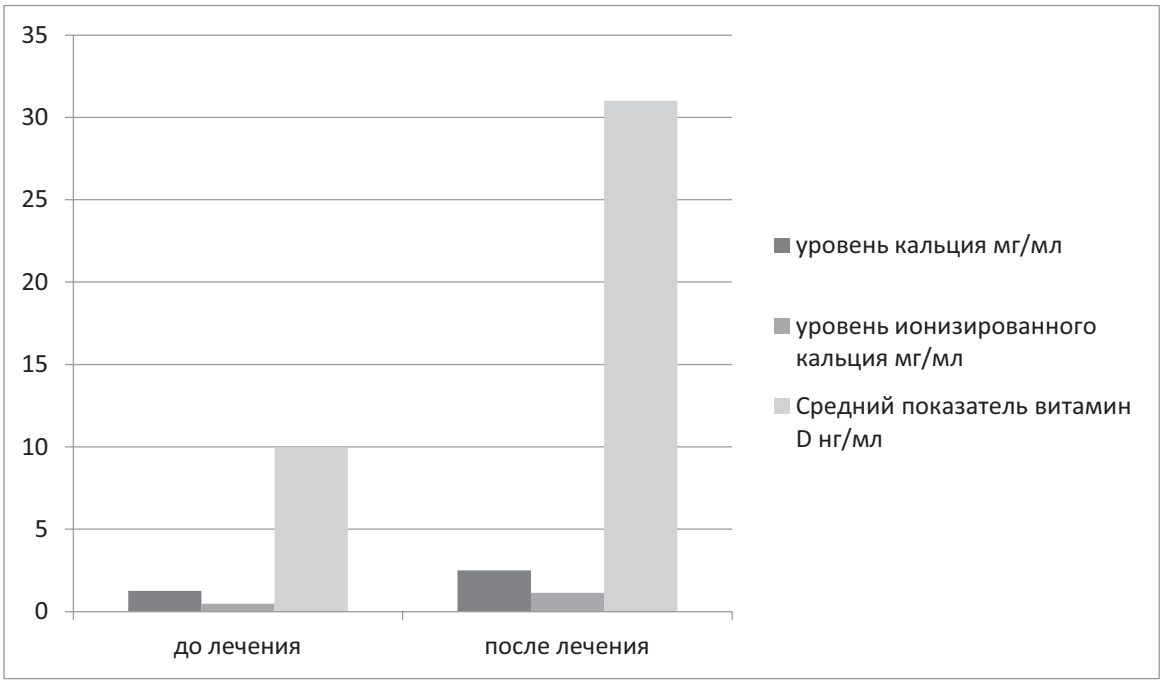


Рис. 3. Уровень кальция и витамина D у подростков в динамике после лечения витамином D

Согласно клиническим рекомендациям «Недостаточность витамина D. Рахит» [3] витамин D3 рекомендуется подросткам в дозе 2 капли 1000 МЕ в сутки в течение 1 месяца. Данной группе детей с дефицитом витамина D (800 детей) был назначен витамин D 3 капли 1500 мг в сутки и кальций из расчета 1200 мг в сутки в течение трех зимних месяцев (январь, февраль, декабрь).

В течение всех 3 месяцев подростки себя чувствовали хорошо. По окончании курса был проведен осмотр детей. Ни у кого из детей не отмечено переломов за 3 месяца. У 600 детей из 800 обследованных детей уровень 25(OH) повысился до нормальных показателей. Далее, в течение последующих 6 месяцев все больные наблюдались у участковых педиатров. Побочных явлений после приема витамина 25(OH)D не обнаружено.

Таким образом, в условиях Республики Саха (Якутия) назначение курса 1500 МЕ витамина D и кальция 1200 мг в период зимних холодов показало положительный клинический эффект и нормализацию содержания микроэлементов у детей в условиях Республики Саха (Якутия).

Обсуждение

Уникальные климато-географические условия Республики Саха (Якутия) связаны с изменением содержания витамина D и кальция в сыворотке крови у подростков. Изучение данной проблемы и разработка новых схем назначения витамина D и кальция подростков, проживающих в условиях Республики Саха (Якутия) представляет актуальную задачу педиатров и других специалистов.

Заключение

У 80 % подростков, проживающих в Республике Саха (Якутия) отмечен сниженный уровень витамина D, у 50 % снижен уровень кальция в сыворотке крови. Подросткам в период зимних холодов (декабрь, январь, февраль) необходим курс витамина D3 и кальция. Применение курса витамина D 1500 МЕ в сутки и кальция 1200 мг в сутки у подростков в период зимних холодов в Арктической зоне России показало положительный клинический эффект и нормализацию содержания микроэлементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аверьянова В.И. Уровень обеспеченности витамином D, распространенность его дефицита, недостаточности и оптимальной концентрации у лиц различных возрастных групп, проживающих в условиях Российского Севера. Профилактическая медицина. — 2023; 26(4): — 72–76. — DOI: 16 10.17116/profimed 20232604172
2. Ахмеджанова З.И., Жиемуратова Г.К., Данилова Е.А., Каримов Д.А. Макро-и микроэлементы в жизнедеятельности организма и их взаимосвязь с иммунной системой (обзор литературы). // Журнал теоретической и клинической медицины. 2020. № 1. С. 16–21.
3. Мельниченко Г.А., Намазова-Баранова Л.С., Громова О.А., Драпкина О.М., Каронова Т.Л., Куликова К.С., Крупинова Ю.А., Лесняк О.М., Мазурина Н.В., Панов А.А., Пигарова Е.А., Рожинская Л.Я., Белая Ж.Е., Руяткина Л.А., Суплотова Л.А. Профилактика и лечение дефицита витамина D: выбор оптимального подхода. Вопросы современной педиатрии. 2021; 20(4): С. 338–345. DOI: 10.15690/vsp. v20i4.2246.
4. Каронова Т.Л., Михеева Е.П., Никитина И.Л. и др. Уровень обеспеченности витамином D у жителей Северо-Западного региона РФ и значение дефицита витамина D для здоровья // Остеопороз и остеопатии. 2016. Т. 19. № 2. С. 45–46.
5. Национальная программа «Недостаточность витамина D у детей и подростков Российской Федерации: современные подходы к коррекции». Союз педиатров России [и др.]. М.: ПедиатрЪ; 2018. 96 с.
6. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации: методические рекомендации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора; 2009. 36 с.
7. Петрушкина А.А., Пигарова Е.А., Рожинская Л.Я. Эпидемиология дефицита витамина D в Российской Федерации // Остеопороз и остеопатии. 2018. Т. 21. № 3. С. 15–20.
8. Hajhashemy Z., Shahdadian F., Ziaei R., Saneei P. Serum vitamin D levels in relation to abdominal obesity: A systematic review and dose-response meta-analysis of epidemiologic studies. // Obes Rev. 2021;22(2): — e13134. DOI:10.1111/obr.13134.
9. Pereira M., Ribas de Farias Costa P., Miranda Pereira E., et al. Does vitamin D deficiency increase the risk of obesity in adults and the elderly? A systematic review of prospective cohort studies. Public Health. 2021; 190:123–131. DOI: 10.1016/j.puhe.2020.04.031.
10. Churyukina E.V., Puzikova O.Z., Popova V.A. et al. Cytokine profile disorders in thyroid dysfunction of adolescents living in ecologically unfavorable regions. // Abstracts from the European Academy of Allergy and Clinical Immunology Hybrid Congress, 2021; 76 Suppl 110:5–661. DOI: 10.1111/all.15093.

© Иванова Ольга Николаевна (olgadoctor@list.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.15

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕННОСТИ АЛЛЕРГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ У ДЕТЕЙ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

ANALYSIS OF THE PREVALENCE OF ALLERGIC DISEASES IN CHILDREN OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)

O. Ivanova
O. Golikova

Summary. This article is devoted to the current problem of the dynamics of changes in the prevalence of allergic diseases in children of the Republic of Sakha (Yakutia). The unique conditions of the Far North suggest a high risk of developing allergic pathology in children. The aim of the study was to study the dynamics of the prevalence of allergic pathology among the children's population of the Republic of Sakha (Yakutia). The authors of the article analyzed the data of the Yakutsk Republican Information and Analytical Center for the period from 2015 to 2025. As a result of the conducted research, a tendency towards an increase in the prevalence of bronchial asthma among the children of the Republic of Sakha (Yakutia) has been revealed, which requires further study and implementation of regional programs for the prevention and detection of this pathology.

Keywords: prevalence, statistics, analysis, pathology, study, implementation, research, climate, indicators.

Иванова Ольга Николаевна
доктор медицинских наук, профессор, ФГАОУ ВО Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, г. Якутск
olgadoctor@list.ru
Голикова Оксана Афанасьевна
кандидат медицинских наук, Республиканская больница №1 Национального центра медицины, г. Якутск
mother-olga1969@mail.ru

Аннотация. Данная статья посвящена актуальной проблеме динамике изменений распространенности аллергических заболеваний у детей Республики Саха (Якутия). Уникальные условия Крайнего Севера предполагаю высокий риск развития аллергической патологии у детей. Целью исследования явилось изучение динамики показателей распространенности аллергической патологии среди детского населения Республики Саха (Якутия). Авторами статьи проведен анализ данных Якутского республиканского информационно-аналитического центра за период с 2015 по 2025 г. В результате проведенного исследования выявлена тенденция к росту распространенности бронхиальной астмой у детского населения Республики Саха (Якутия), что требует дальнейшего изучения и внедрения региональных программ профилактики и выявления данной патологии.

Ключевые слова: распространенность, статистика, анализ, патология, изучение, внедрение, исследования, климат, показатели.

Одной из самых актуальных проблем современного здравоохранения является рост распространенности аллергических заболеваний среди всех групп населения [1,2,3,4,7,8]. Согласно данным Российской ассоциации аллергологов и клинических иммунологов (РААКИ), возглавляет рейтинг по обращаемости детей с аллергопатологией бронхиальная астма (37,2 %), затем аллергический ринит (26,60 %), аллергический риноконъюнктивит (16 %), атопический дерматит (11,76 %), лекарственная аллергия (8,26 %), пищевая аллергия (6,95 %), инсектная аллергия (1,51 %) [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Ранее эпидемиология аллергических заболеваний в самом Северном регионе России изучалась в работах ряде исследователей, указывался рост заболеваемости и распространенности данной патологии у взрослых и детей [6, 7, 8, 9, 10].

Уникальные климато-географические особенности Севера (резко-континентальный климат), частые осложненные ОРВИ и применение противовирусной и антибактериальной терапии, вынужденное длительное пребывание в квартирных условиях и использование меховой одежды и обуви являются важными факторами формирования аллергии у детей Республики Саха (Якутия).

Изучение динамики изменений показателей распространенности аллергической патологии среди детского населения Республики Саха (Якутия) (РС (Я)) представляет интерес для клиницистов и исследователей.

Цель исследования: Изучить динамику показателей распространенности аллергической патологией у детей и подростков Республики Саха (Якутия) за период с 2015 по 2025 года.

Материалы и методы

Проведен анализ статистических данных Якутского республиканского информационно-аналитическо-

го центра за период с 2015 по 2025 г. Проведен анализ распространенности аллергических заболеваний у детей от 0 до 17 лет. Всего проанализированы данные 263,4 тыс. детей, из них девочек 141,3 тысячи девочек и 122,1 тысячи мальчиков. При анализе возрастных групп выявлено, что дети от 0 до 7 лет составили 91, 1 тысячи детей, от 8 до 14 лет — 120,3 тысячи детей, подростки от 14 до 17 лет 52,0 тысячи детей. У 1500 детей (группа была подобрана методом свободной выборки на базе Консультативной поликлиники Республиканской больницы № 1 Национального центра медицины) в возрасте от 0 до 17 лет. Было получено информированное согласие родителей и пациентов, использовались только обезличенные данные. Был подробно изучен анамнез формирования аллергической патологии. Далее дети были разделены на две группы: в возрастных группах от 0 до 10 лет (720 детей) и от 11 до 17 лет (680 пациентов). Математическая обработка полученных данных проводилась с использованием пакета прикладных программ MS Office Excel 2010 и «STATISTICA, версия 10,0» (Statsoft, USA). Для оценки различий результатов выборки по количественным параметрам использовали непараметрический критерий Манна — Уитни (U-тест), по качественным признакам — критерий $\chi 2$ с поправкой Йетса. Оценка степени зависимости между признаками проводилась с помощью коэффициента ранговой корреляции Спирмена. Вероятность различий считалась статистически значимой при $p < 0,05$. Для показателей каждой группы определены среднее, стандартное отклонения, стандартная ошибка среднего, 95 % доверительный интервал (ДИ) для среднего, минимума и максимума.

Результаты анализа

Как видно из рисунка 1, показатели распространенности атопического дерматита у детей Республики Саха (Якутия) высокие и эта тенденция остается на высоком уровне и в 2024 году.

При анализе данных выявлено, что показатели распространенности аллергическим ринитом демонстрируют снижение распространенности за период с 2015 по 2025 годы.

Анализ показателей распространенности бронхиальной астмой у детей Республики Саха (Якутия) демонстрирует неуклонный рост данной патологии в детской популяции.

Проведен анализ факторов риска формирования аллергической патологии у детей и подростков.

Как видно из таблицы 1, наиболее значимыми факторами формирования аллергической патологии являются наследственность и частые осложненные респираторно-вирусные инфекции (синуситы, гаймориты, хронические тонзиллиты), в лечение которых используются антибактериальные и противовирусные препараты. Важную роль играют заболевания желудочно-кишечного тракта нарушения в питании: дети и подростки часто употребляют продукты с консервантами: чипсы, кока колу, доширак и др. Важным фактором формирования аллергии являются условия и образ жизни: все дети в длительный период зимних холодов большую часть времени про-

Рис. 1. Динамика показателей распространенности атопического дерматита Республики Саха (Якутия)

Рис. 2. Динамика показателей распространенности аллергическим ринитом Республики Саха (Якутия)

Рис. 3. Динамика показателей распространенности бронхиальной астмой Республики Саха (Якутия)

водят в закрытых помещениях, мало бывают на свежем воздухе.

Обсуждение

Проведенный анализ статистических показателей свидетельствует о повышении показателей распространенности тяжелых аллергических заболеваний (бронхиальной астмы) у детей. Данная ситуация обусловлена климатическими особенностями РС (Я), изменениями условий быта и проживания, изменением питания, частыми осложнениями острых респираторно-вирусных инфекций. Выявлено, что наиболее значимыми факторами формирования аллергической патологии у детей явилась наследственность, частые осложненные ОРВИ, в лечении которых используется противовирусная и антибактериальная терапия, сопутствующие заболевания желудочно-кишечного тракта и ЛОР-патология.

Таблица 1.

Анализ данных анамнеза формирования аллергической патологии у детей и подростков

Показатель	Среднее	Стандартное отклонение	Стандартная ошибка	95 % ДИ		Минимум	Максимум	P, χ2
				нижняя граница	верхняя граница			
Частые ОРВИ, применение антибактериальной терапии	42,2	3,6	1,1	24,6	58,4	24,0	58,9	p=0,029, χ2=4,765
Наследственность по аллергии	30.1	2.4	1.1	18.1	24,1	16,1	35,6	p1–2= 0,024, χ2 = 5,327;
Сопутствующие заболевания Желудочно-кишечного тракта и Лор Органов	34	1,8	1,3	24,3	37,2	18,4	38,3	p= 0,05, χ2 = 5,327;
Частое употребление продуктов с консервантами: чипсы, кока-кола, и др	34,2	1,6	1,5	29,1	44,1	26,4	47,1	p1–2= 0,024, χ2 = 5,327;
Условия и образ жизни (длительное нахождение в квартирных условиях в период длительных холодов, ношение меховой одежды и обуви)	22,2	4,3	1,2	19,6	24,8	15,0	31,9	p=0,39, χ2=4,765

Заключение

Таким образом, изучение распространенности БА является актуальной проблемой в условиях Крайнего Севера. В результате проведенного исследования выявлена тенденция к росту распространенности бронхиальной астмой у детского населения Республики Саха (Якутия), что требует дальнейшего изучения факторов риска формирования патологии и обязательного внедрения региональных программ доступной диагностики и обеспечения препаратами базисной терапии детей с бронхиальной астмой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аралова В.С., Алване К.Х., Лущик М.В., Губин А.И. Сравнительная характеристика проявлений аллергических заболеваний среди школьников и студентов. //European Journal of Natural History. 2023. № 1. С. 40–44; URL: https://world-science.ru/ru /article/view?id=34314.
2. Бедарева О.К. Эпоха аллергии: как взять эпидемию под контроль? //Вестник аллерголога-иммунолога для врачей. № 04 (06). 2022. С.2–5.
3. Иванова О.Н., Петрова П.Г. Эпидемиология бронхиальной астмы у детей Республики Саха (Якутия). // Вестник СВФУ.2013. №1. Том 10. С. 24–26.
4. Ильина Н.И.Аллергия в России сегодня: проблемы и решения. //Российский аллергологический журнал. Том 19, № 3. 2022. С. 19–22. URL: https://rusalljournal.ru/raj/article/view/1566 DOI: https://doi.org/10.36691/RJA1566.
5. Лагутина С.Н., Чижков П.А., Лущик М.В., Макеева А.В. Аллергические реакции как основная проблема в современной медицине. //Международный студенческий научный вестник. 2018. № 4–4.; URL: https://eduherald.ru/ru/article/view?id=18829.
6. Кузьмичева К.П., Малинина Е.И., Рычкова О.А. Современный взгляд на проблему распространенности аллергических заболеваний у детей. //Аллергология и иммунология в Педиатрии. 2021;(2):4–10. https://doi.org/10.24412/2500-1175-2021-2-4-10.
7. Минаева Н.В., Девяткова Е.А. Аллергическая заболеваемость у пациентов разных возрастных групп. // Профилактическая и социальная медицина. 2019 том XXXVI № 2. С. 68–72. DOI 10.17816/pmj3626874.
8. Мельникова И.Ю., Чистякова В.Ю. Связь дефицита железа и аллергических заболеваний. //Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. 2024. №6. С.84–89.https://doi.org/10.31146/1682-8658-ecg-226-6-84-89.
9. Хаитов Р.М. Аллергология и клиническая иммунология / под ред. Р.М. Хаитова, Н.И. Ильиной — Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2019. 336 с. (Серия «Клинические рекомендации»). ISBN 978-5-9704-5010-9. Текст: электронный. ЭБС «Консультант студента»: [сайт]. URL: https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785970450109.html
10. Хаитова Р.М. Тактика диагностики и лечения аллергических заболеваний и иммунодефицитов: практическое руководство/ под ред. Р.М. Хаитова — Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2019. 152 с. ISBN 978-5-9704-5200-4. Текст: электронный. ЭБС «Консультант студента»: [сайт]. — URL: https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785970452004.

© Иванова Ольга Николаевна (olgadoctor@list.ru); Голикова Оксана Афанасьевна (mother-olga1969@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.17

ЦИРКАДНЫЙ ДЕФИЦИТ МЕЛАТОНИНА И ЭНДОКРИННЫЙ ДИСБАЛАНС У БЕСПЛОДНЫХ ЖЕНЩИН ПОЗДНЕГО РЕПРОДУКТИВНОГО ВОЗРАСТА

CIRCADIAN MELATONIN DEFICIENCY AND ENDOCRINE IMBALANCE IN INFERTILE WOMEN OF ADVANCED REPRODUCTIVE AGE

A. Ichmelyan
A. Bogdasarov
L. Davidyan
R. Bogdasarova

Summary. The aim of this study was a comprehensive analysis of the relationship between melatonin (MT) deficiency and the state of the thyroid system and the hypothalamic-pituitary-adrenal (HPA) axis in patients with idiopathic infertility of advanced reproductive age. A prospective comparative study of 239 women was conducted, divided into a main group (n=115) with a nocturnal salivary MT concentration <40 pg/ml and a comparison group (n=124) with a normal MT level. Methods included determination of hormonal profile, assessment of daily cortisol and DHEA dynamics, correlation, and statistical analysis. It was found that in patients with MT deficiency, the level of free thyroxine (FT4) was statistically significantly lower (Me=15.4 pmol/L vs. 19.6 pmol/L; p=0.016), while TSH and anti-TPO levels did not differ significantly. Pronounced, persistent hypercortisolemia was revealed at all daily time points (p<0.0001), as well as a 38.9 % increase in the catabolic cortisol/DHEA-S ratio compared to the control group. Correlation analysis in women with MT deficiency showed a complete absence of significant relationships between momentary MT and cortisol levels (r_s from –0.133 to 0.074, p>0.15), indicating a pronounced desynchronosis between the circadian and stress-realizing systems. In the comparison group, weak physiological correlations were preserved (morning antagonism: r_s=–0.176, p=0.050). The obtained data confirm that MT deficiency is a significant factor associated with the formation of a complex of endocrine disorders—from subclinical changes in thyroid metabolism to a profound imbalance in the stress-limiting system. This should be considered when planning preconception preparation and ART programs.

Keywords: melatonin, circadian rhythms, age-related infertility, hypercortisolemia, thyroid hormones, cortisol, DHEA, desynchronosis.

Ичмелян Альберт Мисакович
Кандидат медицинских наук, доцент,
ГОУ ВПО Ульяновский государственный университет
ichmelyan@rambler.ru
Богдасаров Азат 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
Богдасарова Регина Азатовна
Аспирант,
ГОУ ВПО Ульяновский государственный университет
bogdasarovar@bk.ru

Аннотация. Целью исследования явился комплексный анализ взаимосвязи между дефицитом мелатонина (МТ) и состоянием тиреоидной системы и оси гипоталамус-гипофиз-надпочечники (ГГН) у пациенток с идиопатическим бесплодием позднего репродуктивного возраста. Проведено проспективное сравнительное исследование 239 женщин, распределенных на основную группу (n=115) с ночной концентрацией МТ в слюне <40 пг/мл и группу сравнения (n=124) с нормальным уровнем МТ. Применялись методы определения гормонального профиля, оценки суточной динамики кортизола и ДГЭА, корреляционного и статистического анализа. Установлено, что у пациенток с дефицитом МТ уровень свободного тироксина (Т4св.) был статистически значимо ниже (Me=15,4 пмоль/л против 19,6 пмоль/л; p=0,016), при этом показатели ТТГ и АТ-ТПО значимо не отличались. Выявлена выраженная, стойкая гиперкортизолемия во все временные точки суток (p <0,0001), а также увеличение катаболического индекса кортизол/ДГЭА-С на 38,9 % по сравнению с контрольной группой. Корреляционный анализ у женщин с дефицитом МТ показал полное отсутствие значимых связей между моментальными уровнями МТ и кортизола (r_s от –0,133 до 0,074, p>0,15), что свидетельствует о выраженном десинхронозе циркадной и стресс-реализующей систем. В группе сравнения сохранялись слабые физиологические корреляции (утренний антагонизм: r_s=–0,176, p=0,050). Полученные данные подтверждают, что дефицит МТ является значимым фактором, ассоциированным с формированием комплекса эндокринных нарушений — от субклинических изменений тиреоидного метаболизма до глубокого дисбаланса стресс-лимитирующей системы, что необходимо учитывать при планировании прегравидарной подготовки и программ ВРТ.

Ключевые слова: мелатонин, циркадные ритмы, возрастное бесплодие, гиперкортизолемия, тиреоидные гормоны, кортизол, ДГЭА, десинхроноз.

Увеличение доли женщин, откладывающих реализацию репродуктивной функции, сделало проблему возраст-ассоциированного бесплодия одной из наиболее актуальных в репродуктивной медицине [1, 2]. Помимо овариального старения, важную роль в снижении эффективности вспомогательных репродуктивных технологий (ВРТ) играют системные метаболические и эндокринные нарушения, патогенез которых может быть тесно связан с дисфункцией циркадной системы [3,4].

Мелатонин, основной гормон эпифиза, выступает ключевым синхронизатором эндогенных биологических ритмов. Его влияние выходит далеко за рамки регуляции сна, оказывая многогранное воздействие на репродуктивную, иммунную, тиреоидную функции и активность оси ГГН [5, 6]. Возрастное снижение секреции МТ, усугубляемое хроническим световым загрязнением и стрессом, рассматривается как потенциальный драйвер эндокринной дестабилизации [7, 8].

Существуют доказанные взаимосвязи между эпифизом и гипоталамо-гипофизарно-тиреоидной (ГГТ) системой [9]. Дефицит МТ может нарушать эту регуляцию, способствуя развитию субклинических форм гипотиреоза, которые негативно влияют на фертильность [10, 11]. Особый интерес представляет взаимодействие циркадной и стресс-адаптационной систем. Кортизол, обладая четким циркадным ритмом (пик утром, минимум ночью), находится в реципрокных отношениях с МТ [12]. Дегидроэпиандростерон-сульфат (ДГЭА-С), анаболический антагонист кортизола, является маркером витального резерва [13]. Нарушение баланса кортизол/ДГЭА-С ассоциировано с ухудшением качества ооцитов и рецептивности эндометрия, снижая шансы на успех ВРТ [14, 15].

Несмотря на очевидную теоретическую предпосылку, недостаточно работ, посвященных комплексному изучению влияния дефицита МТ на тиреоидный статус и суточную динамику стресс-ассоциированных гормонов у женщин с идиопатическим бесплодием.

Цель исследования: оценить особенности состояния тиреоидной системы и паттерны суточной секреции гормонов оси ГГН (кортизол, ДГЭА) у женщин позднего репродуктивного возраста с идиопатическим бесплодием на фоне циркадного дефицита мелатонина.

Проведено проспективное сравнительное открытое исследование в параллельных группах. Работа выполнялась с января 2019 по декабрь 2024 гг. на базе клиник репродуктивной медицины в г. Краснодар и г. Ульяновск. Протокол одобрен локальным этическим комитетом.

Критерии включения: возраст 35–45 лет; диагноз идиопатического бесплодия; сохраненный овариальный резерв (АМГ ≥1,0 нг/мл, количество антральных фолликулов ≥5); одна и более предыдущих неудачных попыток ЭКО/ИКСИ; добровольное информированное согласие.

Критерии исключения: мужской, трубно-перитонеальный, маточный факторы бесплодия; эндометриоз III–IV ст.; онкологические и аутоиммунные заболевания в анамнезе; прием препаратов мелатонина или кортикостероидов в течение 3 месяцев до исследования; тяжелая соматическая патология.

Из 276 пациенток, соответствующих критериям, сформированы 2 группы: основная — 115 женщин с дефицитом МТ (концентрация в ночной порции слюны <40 г/мл); группа сравнения — 124 женщины с нормальным уровнем МТ (≥40 пг/мл). Отказ от участия дали 37 пациенток.

Согласно программе исследования проводилась оценка тиреоидного профиля: забор венозной крови на 2–5 день цикла с последующим определением ТТГ, свободного Т3 (Т3св.), свободного Т4 (Т4св.), АТ-ТПО методом твёрдофазного хемилюминесцентного иммуноанализа. Проведена оценка суточной динамики стресс-ассоциированных гормонов: забор слюны в 4 временные точки (7–9, 11–13, 15-17, 22-24 ч) для определения уровня кортизола и ДГЭА методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с масс-спектрометрией (ВЭЖХ-МС). Дополнительно в сыворотке крови определялись кортизол и ДГЭА-С. Был определен уровень мелатонина: количественный анализ МТ в слюне в аналогичные временные интервалы методом ВЭЖХ-МС (референс: ночь 20–70 пг/мл).

Объем выборки рассчитан априорно (мощность 80 %, α=0,05). Для описания количественных данных с ненормальным распределением использовались медиана (Me) и интерквартильный размах [Q1; Q3]. Сравнение групп проводилось с помощью U-критерия Манна-Уитни. Для оценки взаимосвязей применялся непараметрический коэффициент корреляции Спирмена (r_s). Уровень статистической значимости принят за $p<0,05$. Обработка данных выполнена в программной среде IBM SPSS Statistics 26.0.

Сравнительный анализ выявил избирательные нарушения в тиреоидной системе у женщин с дефицитом МТ. Уровень свободного тироксина (Т4св.) в основной группе был достоверно ниже и составил 15,4 пмоль/л [12,7–19,6] против 19,6 пмоль/л [12,85–21,7] в группе сравнения (U=5850, p=0,016). При этом концентрации тиреотропного гормона (ТТГ) значимо не различались (2,01 [1,52–2,67] и 2,07 [1,91–2,67] мкМЕ/мл соответственно, p=0,171), как и уровни свободного трийодтиронина (Т3св.) и антител к ТПО (АТ-ТПО) (p>0,099). Важно подчеркнуть, что все измеренные значения находились в пределах референсных диапазонов.

Обнаруженный паттерн — изолированное снижение Т4св. при нормальном ТТГ — может трактоваться как признак очень ранних, субклинических сдвигов в тиреоидном гомеостазе. Это согласуется с данными о влиянии МТ на периферический метаболизм тиреоидных гормонов и чувствительность гипоталамо-гипофизарной системы [9, 16]. Дефицит МТ, по-видимому, не запускает классический аутоиммунный процесс (о чем свидетельствуют нормальные уровни АТ-ТПО), но может нарушать тонкие механизмы обратной связи и конверсии гормонов. Хотя выявленные изменения не требовали активной медикаментозной коррекции, они указывают на снижение функционального резерва щитовидной железы, что может создавать неблагоприятный фон для наступления и поддержания беременности, особенно в условиях стресса, сопутствующего программам ВРТ [11].

Наиболее яркие отличия между группами были выявлены в системе стресс-адаптации. У пациенток с дефицитом МТ наблюдалась стойкая, статистически высокозначимая гиперкортизолемия во всех исследованных временных точках (p <0,0001). Утренний уровень кортизола в слюне (7–9 ч) в основной группе был практически в два раза выше: 8,6 нмоль/л [7,9–9,1] против 4,5 нмоль/л [3,8–5,2] в группе сравнения. Примечательно, что у женщин с нормальным МТ суточный ритм кортизола был физиологичным: выраженный утренний пик с последующим прогрессивным снижением на 74 % к вечеру и на 88 % к ночи. В основной группе циркадный профиль был сглажен: уровень кортизола в ночные часы (22–24 ч) оставался аномально высоким (1,6 нмоль/л [1,4–1,9] против 0,4 нмоль/л [0,2–0,6], p <0,0001), что свидетельствует о нарушении механизма отрицательной обратной связи в оси ГГН.

Концентрация ДГЭА-С в сыворотке также была выше в основной группе (79 нмоль/л [66,6–92] против 68 нмоль/л [65–74,8], p=0,0003), однако это повышение было пропорционально менее выраженным, чем у кортизола. В результате ключевой интегральный показатель — соотношение кортизол/ДГЭА-С, отражающее баланс между катаболическими и анаболическими процессами, — оказался достоверно выше у женщин с дефицитом МТ. Медианное значение соотношения в основной группе составило 5,0 [5,0–5,0], что на 38,9 % превышало показатель группы сравнения (3,6 [3,15–4,01]; p <0,0001). Такое смещение баланса в сторону катаболизма указывает на хроническое напряжение адаптационных систем и может непосредственно влиять на энергообеспечение оогенеза и рецептивность эндометрия [14, 17].

Проведенный корреляционный анализ выявил картину глубокого десинхроноза у женщин основной группы. Статистически значимых монотонных связей между уровнями МТ и кортизола в соответствующие временные интервалы обнаружено не было (r_s варьировал от –0,133 для дневных показателей до 0,074 для вечерних, p>0,15). Аналогично, отсутствовали корреляции между МТ и ДГЭА (p>0,31). Более того, не была выявлена синхронность в секреции кортизола и ДГЭА в парных временных точках суток (r_s близки к нулю, p>0,20).

При этом на системном уровне сохранялась сильная положительная сопряженность интегральных показателей активности надпочечников: общий уровень кортизола в крови сильно коррелировал с концентрацией ДГЭА-С (r_s=0,791, p <0,000001). Это указывает на то, что, несмотря на полную разобщенность суточных ритмов, общая продукторная активность оси ГГН остается скоординированной. Таким образом, дефицит МТ ассоциирован не с гипо- или гиперфункцией надпочечников в классическом понимании, а с глубоким нарушением временной организации (паттерна) их секреции и утратой синхронизирующих связей с циркадным осциллятором.

В группе с сохранной секрецией МТ наблюдалась принципиально иная картина регуляции. Были обнаружены статистически значимые, хотя и слабые, корреляции между МТ и кортизолом в ключевые фазы циркадного цикла: очень слабая обратная связь утром (МТ утро — Кортизол 7–9 ч: r_s=–0,176, p=0,050) и очень слабая прямая связь ночью (МТ ночь — Кортизол 22–24 ч: r_s=0,201, p=0,029). Данные корреляции отражают сохраненный физиологический антагонизм (утром) и синхронность в достижении ночного минимума. Значимых связей между динамикой МТ и ДГЭА не установлено.

Как и в основной группе, мгновенная секреция кортизола и ДГЭА не была синхронной, но при этом выявлялась умеренная положительная системная связь между общим уровнем кортизола и катаболическим индексом кортизол/ДГЭА-С (r_s=0,382, p <0,0001), что свидетельствует о более упорядоченной и предсказуемой регуляции оси ГГН в условиях нормального циркадного обеспечения.

Результаты проведенного исследования позволяют утверждать, что циркадный дефицит мелатонина у женщин позднего репродуктивного возраста с идиопатическим бесплодием является значимым эндокринным феноменом, ассоциированным с комплексом специфических нарушений.

1. Субклинический тиреоидный дисбаланс: Проявляется изолированным снижением уровня свободного тироксина (в среднем на 21,4 %) при сохранении нормальных значений ТТГ и отсутствии аутоиммунной сенсибилизации. Это указывает на нарушение тонких механизмов регуляции ГГТ-оси, возможно, опосредованное дефицитом МТ.
2. Выраженная дисфункция стресс-лимитирующей системы: Характеризуется стойкой гиперкортизо-

лемией (с превышением контрольных значений до 2 раз), сглаживанием физиологического суточного ритма секреции кортизола и значительным (на 38,9 %) повышением катаболического индекса кортизол/ДГЭА-С. Данные изменения отражают хроническое напряжение адаптационных резервов, что создает неблагоприятный метаболический фон для процессов фолликулогенеза и имплантации.

3. Феномен гормонального десинхроноза: Ключевым отличием эндокринного статуса при дефиците МТ является не просто количественное изменение уровней гормонов, а качественное нарушение временной организации их секреции. Полное отсутствие корреляционных связей между моментальными уровнями мелатонина и кортизола свидетельствует о разобщении (десинхронозе) работы циркадного осциллятора и эффекторного звена стресс-реализующей системы. В условиях нормы эти слабые, но статистически значимые связи сохраняются.

Таким образом, дефицит мелатонина можно рассматривать как интегральный маркер и, вероятно, патогенетический фактор нарушения системной гормональной синхронизации. Выявленный комплекс нарушений (субклинический гипотиреоидный сдвиг, гиперкортизолемия, десинхроноз) формирует неблагоприятный эндокринный фон, потенциально снижающий эффективность программ ВРТ. Полученные данные обосновывают целесообразность включения оценки циркадного статуса (определение уровня МТ в слюне) в алгоритм обследования женщин с бесплодием позднего репродуктивного возраста и рассмотрение стратегий коррекции циркадных ритмов как части прегравидарной подготовки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Потин В.В., Баранова Е.Е. Возрастные аспекты женской фертильности и репродуктивные технологии. // Акушерство и гинекология. — 2021. — № 5. — С. 13–19. https://doi.org/10.18565/aig.2021.5.13-19.
2. Broekmans F.J., Knauff E.A., te Velde E.R., Macklon N.S., Fauser B.C. Female reproductive ageing: current knowledge and future trends. // Trends Endocrinol Metab. — 2007. — Vol. 18(2). — P. 58–65. https://doi.org/10.1016/j.tem.2007.01.004.
3. Кветной И.М., Ярмолинская М.И., Князькин И.В. Мелатонин: роль в регуляции репродуктивной системы. // Проблемы репродукции. — 2019. — Т. 25, № 4. — С. 29–38. https://doi.org/10.17116/repro20192504129.
4. Reiter R.J., Rosales-Corral S.A., Liu X.Y., Acuna-Castroviejo D., Escames G., Tan D.X. Melatonin in the circadian system: roles and clinical applications. // Handb Clin Neurol. — 2021. — Vol. 179. — P. 357–368. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819975-6.00023-6.
5. Табеева Д.М., Азимова Ю.Э. Мелатонин и циркадные ритмы в норме и патологии. // Неврологический журнал. — 2017. — Т. 22, № 2. — С. 70–78. https://doi.org/10.18821/1560-9545-2017-22-2-70-78.
6. Talpur H.S., Yang K., Shaikh A., Wang J., Khan F.A., Huo L.J. Melatonin: Functions and ligands. // Drug Discov Today. — 2022. — Vol. 27(3). — P. 735–749. https://doi.org/10.1016/j.drudis.2021.11.002.
7. Claustrat B., Leston J. Melatonin: Physiological effects in humans. // Neurochirurgie. — 2015. — Vol. 61(2-3). — P. 77–84. https://doi.org/10.1016/j.neuchi.2015.03.002.
8. Жаров В.В., Тюльпаков А.Н. Эпифиз и его роль в эндокринной регуляции. // Вестник РАМН. — 2016. — Т. 71, № 1. — С. 45–51. https://doi.org/10.15690/vramn682.
9. Петухова Н.А., Фадеев В.В. Взаимодействие мелатонина и тиреоидной системы: от фундаментальных основ к клиническим перспективам. // Клиническая и экспериментальная тиреоидология. — 2020. — Т. 16, № 2. — С. 85–92. https://doi.org/10.14341/ket12645.
10. Unuane D., Tournaye H., Velkeniers B., Poppe K. Endocrine disorders & female infertility. // Best Pract Res Clin Endocrinol Metab. — 2011. — Vol. 25(6). — P. 861–873. https://doi.org/10.1016/j.beem.2011.08.001.
11. Крутова В.А., Александрова Г.А. Субклинический гипотиреоз и репродуктивная функция женщины. // Проблемы эндокринологии. — 2018. — Т. 64, № 4. — С. 250–257. https://doi.org/10.14341/probl9610.
12. Nicolaides N.C., Charmandari E., Chrousos G.P., Kino T. Circadian endocrine rhythms: the hypothalamic-pituitary-adrenal axis and its actions. // Ann N Y Acad Sci. — 2014. — Vol. 1318. — P. 71-80. https://doi.org/10.1111/nyas.12464.
13. Фадеев В.В., Мельниченко Г.А., Дедов И.И. Дегидроэпиандростерон: биологические эффекты и терапевтический потенциал. // Терапевтический архив. — 2015. — Т. 87, № 10. — С. 114–119. https://doi.org/10.17116/terarkh20158710114-119.
14. Gracia C.R., Freeman E.W. Acute consequences of the menopausal transition: the rise in common menopausal symptoms. // Endocrinol Metab Clin North Am. — 2015. — Vol. 44(3). — P. 663-680. https://doi.org/10.1016/j.ecl.2015.05.007.
15. Павлович С.В., Касян В.Н., Назаренко Т.А. Роль гормонального баланса в успешности программ ЭКО. // Акушерство, гинекология и репродукция. — 2020. — Т. 14, № 2. — С. 172–181. https://doi.org/10.17749/2313-7347.2020.14.2.172-181.
16. Коваленко Т.В., Ильина И.Ю. Циркадные ритмы и патология щитовидной железы. // Эндокринная хирургия. — 2019. — Т. 13, № 3. — С. 150–156. https://doi.org/10.14341/serg10137.
17. Лапшин О.В., Божедомов В.А. Кортизол и ДГЭА-С: клиническое значение соотношения. // Клиническая лабораторная диагностика. — 2018. — Т. 63, № 12. — С. 764–769. https://doi.org/10.18821/0869-2084-2018-63-12-764-769.
18. Reiter R.J., Tan D.X., Korkmaz A., Ma S. Obesity and metabolic syndrome: association with chronodisruption, sleep deprivation, and melatonin suppression. // Ann Med. — 2012. — Vol. 44(6). — P. 564–577. https://doi.org/10.3109/07853890.2011.586365.

19. Назаренко Т.А., Михалева Л.М. Бесплодие и возраст: возможности и ограничения ВРТ. // Доктор.Ру. — 2022. — Т. 21, № 3. — С. 6–12. https://doi.org/10.31550/1727-2378-2022-21-3-6-12.
20. Бурдули Н.М., Долгушина Н.В., Федорова Е.В. Молекулярные механизмы влияния мелатонина на оогенез. // Цитология. — 2021. — Т. 63, № 7. — С. 543–552. https://doi.org/10.31857/S004137712107003X.
21. Jamilian M., Foroozanfard F., Mirhosseini N., Kavossian E., Aghadavod E., Bahmani F., Asemi Z. Effects of Melatonin Supplementation on Hormonal, Inflammatory, Genetic, and Oxidative Stress Parameters in Women with Polycystic Ovary Syndrome. // Front Endocrinol (Lausanne). — 2019. — Vol. 10. — P. 273. https://doi.org/10.3389/fendo.2019.00273.
22. Тихомиров А.Л., Касабулатов Н.М., Овсянникова Т.В. Хронический эндометрит и репродуктивные неудачи. // Акушерство и гинекология. — 2019. — № S5. — С. 55–61. https://doi.org/10.18565/aig.2019.5.55-61.
23. Вихляева Е.М., Прилепская В.Н. Патофизиология репродуктивной системы женщины. — М.: МИА, 2018. — 448 с.
24. Andersen C.Y. Possible new mechanism of cortisol action in female reproductive organs: physiological implications of the free hormone hypothesis. // J Endocrinol. — 2002. — Vol. 173(2). — P. 211-217. https://doi.org/10.1677/joe.0.1730211.
25. Смирнова А.А., Ледина А.В., Петров Ю.А. Иммуногистохимическая диагностика хронического эндометрита. // Архив патологии. — 2020. — Т. 82, № 4. — С. 48–54. https://doi.org/10.17116/patol20208204148.
26. Labarta E., de Los Santos M.J., Escribá M.J., Pellicer A., Herraiz S. Mitochondria as a tool for oocyte rejuvenation. // Fertil Steril. — 2019. — Vol. 111(2). — P. 219–226. https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2018.10.036.
27. Громова О.А., Торшин И.Ю., Лиманова О.А. Витамин D и репродуктивное здоровье: обзор современных данных. // Вопросы гинекологии, акушерства и перинатологии. — 2017. — Т. 16, № 5. — С. 57–68. https://doi.org/10.20953/1726-1678-2017-5-57-68.
28. Chuffa L.G.A., Lupi-Júnior L.A., Costa A.B., de Arruda Amorim J.P., Seiva F.R.F. The role of melatonin in targeting cell signaling pathways in reproduction. // Ann N Y Acad Sci. — 2019. — Vol. 1448(1). — P. 21–31. https://doi.org/10.1111/nyas.14107.
29. Филиппов О.С., Гутик Ю.А. Антимюллеров гормон в оценке овариального резерва. // Лабораторная служба. — 2018. — Т. 7, № 4. — С. 22–28. https://doi.org/10.17116/labs201870422.
30. Palomba S., Daolio J., La Sala G.B. Oocyte Competence in Women with Polycystic Ovary Syndrome. // Trends Endocrinol Metab. — 2017. — Vol. 28(3). — P. 186–198. https://doi.org/10.1016/j.tem.2016.11.008.
31. Шляхто Е.В., Трошина Е.А., Бельцевич Д.Г. и др. Клинические рекомендации «Гипотиреоз». // Проблемы эндокринологии. — 2021. — Т. 67, № 6. — С. 10–104. https://doi.org/10.14341/probl12801.
32. Веселовский П.А., Корсак В.С., Гамисония Т.В. Генетические аспекты регуляции циркадных ритмов. // Медицинская генетика. — 2020. — Т. 19, № 11. — С. 3–10. https://doi.org/10.25557/2073-7998.2020.11.3-10.
33. Российская ассоциация репродукции человека (РАРЧ). Клинические рекомендации «Женское бесплодие». — М., 2021. — 78 с.
34. Cain D.W., Cidlowski J.A. Immune regulation by glucocorticoids. // Nat Rev Immunol. — 2017. — Vol. 17(4). — P. 233–247. https://doi.org/10.1038/nri.2017.1.
35. Калинченко С.Ю., Тишова Ю.А., Ворслов Л.О. Дефицит андрогенов у женщин: клиника, диагностика, лечение. // Эффективная фармакотерапия. — 2019. — Т. 15, № 38. — С. 36–44.
36. Soules M.R., Sherman S., Parrott E., Rebar R., Santoro N., Utian W., Woods N. Executive summary: Stages of Reproductive Aging Workshop (STRAW). // Fertil Steril. — 2001. — Vol. 76(5). — P. 874–878. https://doi.org/10.1016/s0015-0282(01)02909-0.
37. Мишиева Н.Г. Бесплодие у женщин позднего репродуктивного возраста: современные подходы к диагностике и лечению. // StatusPraesens. — 2018. — № 6. — С. 22–28.
38. Тарасова М.А., Донников А.Е. Полиморфизмы генов рецепторов мелатонина и их клиническое значение. // Молекулярная биология. — 2022. — Т. 56, № 1. — С. 3–15. https://doi.org/10.31857/S0026898422010162.

© Ичмелян Альберт Мисакович (ichmelyan@rambler.ru); Богдасаров Азат Юрьевич (azat-01@mail.ru);
Давидян Лиана Юрьевна (dliana2009@mail.ru); Богдасарова Регина Азатовна (bogdasarovar@bk.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.18

ДИВЕРТИКУЛ МЕККЕЛЯ У ДЕТЕЙ: ВОПРОСЫ ДИАГНОСТИКИ И ЛЕЧЕНИЯ

MECKEL'S DIVERTICULUM IN CHILDREN: DIAGNOSTIC AND TREATMENT ISSUES

A. Kazakov
A. Gorshkov
G. Rumyantseva
V. Kartashev
V. Yusufov
N. Burchenkova
A. Popova

Summary. The relevance of this study is due to the diverse clinical presentation of non-obliterated vitelline duct pathology in children and the diagnostic challenges in identifying this condition. The study was conducted in the Tver Region at the Tver Regional Clinical Hospital, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education, Tver Regional Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation. The study focused on clinical cases of patients with Meckel's diverticulum, their clinical manifestations, diagnosis, and treatment options. The study describes various methods for eliminating Meckel's diverticulum. Statistical data from inpatient hospital records from 2022 to 2025 was analyzed.

Keywords: Meckel's diverticulum, children, laparoscopy.

Казаков Александр Николаевич
Кандидат медицинский наук, ассистент,
Тверской государственный медицинский университет
drkazakov@mail.ru
Горшков Антон Юрьевич
Кандидат медицинский наук, доцент,
Тверской государственный медицинский университет
gorantur@yandex.ru
Румянцева Галина Николаевна
Доктор медицинский наук, профессор,
Тверской государственный медицинский университет
Rumyantsevagn@yandex.ru
Карташев Владимир Николаевич
Доктор медицинский наук, профессор,
Тверской государственный медицинский университет
vn_kartachev@mail.ru
Юсуфов Акиф Арифович
Доктор медицинский наук, доцент,
Тверской государственный медицинский университет
usufov@yandex.ru
Бурченкова Наталья Валерьевна
Кандидат медицинский наук, доцент,
Тверской государственный медицинский университет
semakina.natalia@mail.ru
Попова Анна Анатольевна
Ординатор,
Тверской государственный медицинский университет
Popowa.anyapopova@yandex.ru

Аннотация. Актуальность представленной работы связана с разнообразной клинической картиной патологии необлитерированного желточного протока у детей и диагностическими сложностями при выявлении данного заболевания. Исследование проводилось в Тверской области на базе ГБУЗ ДОКБ, ФГБОУ ВО ТВЕРСКОЙ ГМУ МИНЗДРАВА РОССИИ». Объектами исследования стали клинические случаи пациентов с дивертикулом Меккеля, особенности их клинической манифестации, диагностики и выбора лечебной тактики. В работе описаны различные способы ликвидации дивертикула Меккеля. Проведён анализ статистических данных карт пациентов, находившихся на стационарном лечении за период с 2022 года по 2025 год.

Ключевые слова: дивертикул Меккеля, дети, лапароскопия.

Введение

Дивертикул Меккеля (ДМ) — локальное мешковидное выпячивание стенки подвздошной кишки, образовавшееся вследствие неполного заращения желточного протока, который участвует в питании зародыша [1].

Дивертикул Меккеля (ДМ) был впервые описан немецким анатомом И.Ф. Меккелем (1781–1833 гг.). Однако эта патология была известна ранее — в 1598 г. необычный отросток кишки обнаружил Фабрикус Хилданус, но детально изучил его именно Меккель. Ученый опубликовал несколько работ (1808–1820 гг.), в которых подробно описал отросток и доказал, что он появился

в процессе порочного развития эмбриона [2]. Дивертикул Меккеля встречается у детей в 2,2 % случаев, а риск развития его осложнений составляет 4–6 %. Более 50 % симптоматических дивертикулов встречается в возрасте до 2-х лет, а у мальчиков дивертикул Меккеля встречается в 2,5 раза чаще [3].

Дивертикул Меккеля является истинным дивертикулом, образованным за счет всех слоев стенки подвздошной кишки. Формы дивертикула Меккеля разнообразны, но чаще он выглядит как выпячивание участка кишечной стенки на противоположной брыжеечной стороне подвздошной кишки. Возможно расположение дивертикула на брыжеечном крае и даже в толще брыжейки. Расстояние от дивертикула до илеоцекального клапана (баугиниевой заслонки) варьирует в широких пределах: от 10–30 до 120 см. Длина самого дивертикула также различна: от 1–2 до 15–20 см. Ширина дивертикула 1–5 см, обычно он свободно сообщается с просветом кишки. Дивертикул Меккеля, как правило, расположен свободно в брюшной полости, но в ряде случаев его верхушка соединена фиброзным тяжем с брыжейкой соседней кишечной петли или с париетальной брюшиной в области пупка [4].

Хирургические осложнения дивертикула Меккеля можно разделить на 4 группы:

1. Клиника воспалительного заболевания в брюшной полости, протекает как острый аппендицит с болевым синдромом и симптомами интоксикации. Причина «острого живота» устанавливается на операции в виде флегмонозного либо гангренозно-перфоративного дивертикулита.
2. Острая кишечная непроходимость, чаще всего странгуляционного характера в виде заворота кишечных петель вокруг фиксированного дивертикула или ущемления в ложной внутренней грыже, созданной патологической фиксацией дивертикула к брыжейке либо к париетальной брюшине. Другим видом кишечной непроходимости, является кишечная инвагинация, где дивертикул Меккеля выступает в роли «ведущей точки», формирующей кишечное внедрение.
3. Кишечное кровотечение — чаще протекает бессимптомно, манифестируя меленой и постгеморрагической анемией. Кровотечение возникает в результате арозии сосудов в слизистой дивертикула, так как в стенке последнего может располагаться зона эктопии бокаловидных клеток слизистой желудка, способных продуцировать кислоту и таким образом вызывать изъязвления.
4. Дивертикул Меккеля может служить резервуаром для проглоченных инородных тел пищеварительного тракта — рыбьих костей, металлических мелких изделий и др. Крайне редко в литературе встречаются описания случаев новообразований в дивертикуле Меккеля [5].

Диагностика дивертикула подвздошной кишки вызывает большие затруднения и осложняется отсутствием характерных симптомов, позволяющих вовремя поставить диагноз [6].

При хирургическом лечении используются различные оперативные способы — резекция части кишки, несущей дивертикул с наложением анастомоза конец-в-конец, клиновидная резекция как с использованием сшивающих аппаратов, так и без, и лигатурная дивертикулэктомия. Все оперативные пособия на современном этапе могут быть выполнены из лапаротомного и лапароскопического доступов, что зависит от предпочтений и опыта хирургов в клинике. [7].

Материалы и методы

Проведено ретроспективное одномоментное (поперечное) нерандомизированное исследование. В настоящей статье представлены результаты обследования 16 детей, находившихся на лечении с 2022 по 2025 гг. в ГБУЗ ДОКБ г. Твери в возрасте от 3 месяцев до 17 лет, из них мальчиков — 11(68,75 %), девочек — 5(31,25 %). Длительность госпитализации варьировала от 7 до 17 суток (медиана — 10 дней). Всем пациентам выполнялось комплексное клинико-лабораторное и инструментальное обследование. Лабораторные методы включали общий и биохимический анализы крови, коагулограмму. Инструментальная диагностика осуществлялась с применением ультразвуковых, эндоскопических и лапароскопических методик.

Ультразвуковое исследование (УЗИ) осуществлялось с помощью аппаратов APLIO 500 (Canon Toshiba, Япония), My Sono U6-RUS (Samsung Medison, Южная Корея), Arietta V 70 (Fujifilm Hitachi, Япония), Mindray DC-8/EXP (Mindray, Китай). Использовались мультичастотные датчики: конвексный (3,0–5,0 МГц) и линейный (7,5–14,0 МГц). Для исключения кровотечения из верхних отделов ЖКТ применялся эндоскопический диагностический прибор Olympus GIF-XPE-3 №2100107 (Olympus, Япония). Верифицирующим методом и/или этапом хирургического лечения являлась диагностическая и лечебная лапароскопия. Использовалось стандартное оборудование «Karl Storz» (Германия).

Статистический анализ материала осуществлялся с использованием компьютерных программ Microsoft Excel 2010 и пакета статистической обработки данных.

Результаты

Дивертикул Меккеля манифестировал у 9 детей (56,25 %) клинической картиной дивертикулита, перитонита. Диагноз был подтвержден лапароскопически при исключении острого аппендицита и ревизии под-

вздошной кишки. У 3(18,75 %) детей в связи вторичными изменениями червеобразного отростка (выраженная инъекция сосудов серозного слоя, ригидность при компрессии манипулятором, положительный симптом «карандаша») проведена лигатурная аппендэктомия.

Клинический пример. Ребенок К., 10 лет, поступил через 14 часов с момента заболевания с жалобами на боли в животе, слабость, тошноту, субфебрильную температуру тела. При осмотре клиника деструктивного аппендицита не вызывала сомнения. В анализах крови выраженный нейтрофильный лейкоцитоз, эхографически аппендикс визуализирован, утолщен, в диаметре до 7,5 мм, свободная жидкость не определялась. Выставлены показания к оперативному лечению. При обзорной лапароскопии выявлен аппендикс расположенный ретроцекально, улиткообразной формы — утолщен, ригидный, симптом «карандаша» положительный, серозный покров тусклый с инъекцией сосудов, диаметр у верхушки до 9 мм. Проведена лигатурная аппендэктомия. При ревизии подвздошной кишки обнаружен дивертикул на расстоянии 50–60 см от илеоцекального угла. Дивертикул размерами 2,0х0,8 см бугристый, темно-багрового цвета, имеющий собственную отечную брыжейку, у верхушки расположено перфорационное отверстие с инородным телом (скрученная шкурка от помидора), окутан сальником. Из перфорационного отверстия удалено инородное тело. Рис. 1. Учитывая узкое основание дивертикула до 0,8 см выполнена лигатурная дивертикуэктомия. Послеоперационный период гладкий. Ребенок выписан на 8 сутки.

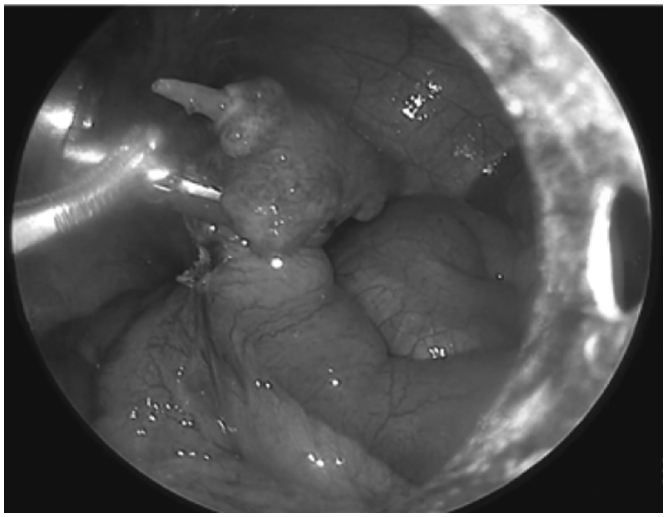


Рис. 1. Дивертикул Меккеля на узком основании с перфорацией верхушки инородным телом

Дивертикул Меккеля в 3 (18,75 %) случаях был причиной инвагинацией кишечника. Заболевание у детей начиналось с классических симптомов — приступообразных болей в животе и рвоты. Диагноз инвагинации кишечника подтверждался эхографически благодаря визуализации патогномоничных эхографических признаков: симптомов «мишени» и «псевдопочки». У двух детей осуществлялась попытки неоперативного лечения путем гидростатической дезинвагинации (гидроэхоколоноскопии), которые были неэффективны и потребовали ликвидации непроходимости оперативным способом. У одного ребенка с признаками инвагинации и перитонита были выставлены показания к оперативному лечению. Еще у 3 пациентов (18,75 %) ДМ обнаружен как случайная находка во время оперативного вмешательства по поводу деструктивного аппендицита.

В одном (6,25 %) случае ребенок поступил с клинической картиной кишечного кровотечения.

Всем больным проводилось УЗИ органов брюшной полости. Эхографический потенциал в диагностике ДМ невелик, в наших наблюдениях был выявлен у 2 детей (12,5 %) и был представлен в виде ригидной гипоэхогенной тубулярной и овальной формы структуры диаметром от 10 до 25 мм с перифокальной инфильтрацией тканей (брыжейка, сальник, мезентериальные лимфоузлы). Рис. 2 Это неспецифические ультразвуковые признаки, только благодаря визуализации неизмененного аппендикса в типичном месте устанавливалось заключение дивертикула Меккеля в протоколе исследования. У трех детей при УЗИ выявлены инвагинаты брюшной полости, которые детально оценивались — локализация, размеры и протяженность, толщина и четкость слоев инвагината, наличие кровотока и органических образований. Ни в одном случае не был обнаружен дивертикул Меккеля.

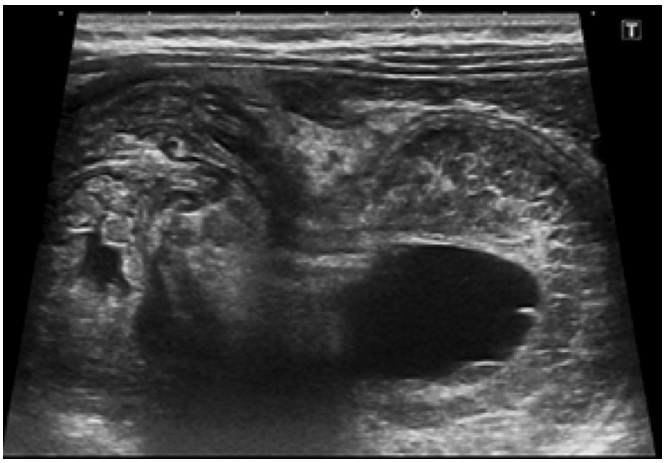


Рис. 2. Тубулярная неоднородная структура с четкими ровными контурами серповидной формы исходящая из стенки тонкой кишки

У 11 детей (68,8 %) с дивертикулом Меккеля не было выявлено изменений на УЗИ.

Одному (6,25 %) пациенту с диагнозом кишечного кровотечения выполнялось ЭГДС, на которой источника кровотечения не обнаружено.

Всем 16 (100 %) пациентам было проведено оперативное лечение из разных доступов. Дивертикулэктомия из лапаротомного доступа проведена в 8 (50 %) случаях. Из них 2 (12,5,0 %) детям была выполнена резекция кишки, несущей дивертикул с анастомозом конец-в-конец, а 6 (37,5 %) — клиновидная резекция дивертикула. Лапароскопическая дивертикулэктомия была проведена 8 (50,0 %) детям, из которых у 7 (43,8 %) применен лигатурный способ. После коагуляции брыжейки дивертикула оценивалось состояние и ширина его основания. Если воспалительные изменения в основании отсутствовали, и его ширина не превышала 1,5–2 см в диаметре, то осуществлялась лигатурная дивертикулэктомия с помощью петель Редера, аналогично лигатурной аппендэктомии [8]. После удаления ДМ проверялась герметичность и проходимость кишки, дополнительную перитонизацию культи не проводили. Одному ребенку с широким основанием дивертикула была выполнена клиновидная резекция из лапароскопического доступа с ушиванием дефекта в поперечном направлении. Кишка, несущая ДМ, позиционировалась тракционными транспариетальными швами, затем с помощью биполярного коагулятора выполнялась клиновидная резекция дивертикула с последующим ушиванием дефекта кишки в поперечном направлении двухрядным интракорпоральным швом. Сшивающие аппараты, широко применяющиеся при выполнении резекции дивертикула Меккеля в клинике не использовались, ввиду отсутствия последних.

Анализ гистологического материала показал, что у 6 (37,5 %) детей дивертикул Меккеля не был изменен, у 6 (37,5 %) пациентов выявлен флегмонозный дивертикулит, в 3(18,8 %) случаях — гангренозный дивертикулит. Морфологического подтверждения эктопии желез желудка и поджелудочной железы в дивертикуле Меккеля не обнаружено ни в одном случае.

Обсуждение

Дооперационное выявление дивертикула Меккеля относится к сложной проблеме, несмотря на большой диагностический арсенал современных клиник. Также сохраняется большое количество диагностических ошибок, которые связаны в первую очередь с разной клинической палитрой симптомов. Известное утверждение С.Я. Долецкого о диагностике кистозных дупликаций кишечника как «необычное сочетание обычных симптомов», позволяет нам сказать о дивертикуле Меккеля как «необычная операционная находка при обычных симптомах». Широкий круг нозологий, под маской которых манифестирует дивертикул Меккеля, подтверждает наше высказывание. Ультразвуковой метод исследования имеет низкую ценность в диагностике ДМ. При данном виде исследования в нижнем этаже брюшной полости выявляется округлое или трубчатое гипоэхогенное кистоподобное образование с внутренним гиперэхогенным слоем (слизистая оболочка) и наружным гипоэхогенным слоем (мышечная оболочка), с однородным, анэхогенным содержимым, сходным с содержимым подвздошной кишки, которое поддается компрессии при надавливании датчиком из-за широкого сообщения с подвздошной кишкой. Зачастую только визуализация неизмененного аппендикса позволяет заподозрить дивертикул Меккеля.

ЭГДС является важным диагностическим этапом, но только как метод исключения кровотечения из верхних отделов ЖКТ.

Сцинтиграфия, описанная в литературе в качестве «золотого стандарта» в диагностике дивертикула Меккеля в настоящее время вызывает сомнения, особенно в ургентных условиях [9].

Актуальным и единственно верным методом диагностики ДМ, на наш взгляд, служит лапароскопия, позволяющая установить диагноз и ликвидировать проблему.

Выводы

1. Дивертикул Меккеля относится к сложно выявляемой патологии, которая чаще манифестирует дивертикулитом под маской острого «живота».
2. Лапароскопическая лигатурная дивертикулэктомия является операцией выбора при узком основании, в ином случае приоритетна клиновидная резекция кишки с дивертикулом Меккеля.
3. Резекция участка кишечника, несущей дивертикул с формированием анастомоза обоснована при нежизнеспособной стенке кишки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клинические рекомендации по диагностике и лечению дивертикула Меккеля у детей / Союз педиатров России, Ассоциация детских хирургов России. — М.: OMS, 2018.
2. Е.В. Дмитриева, М.Н. Буланов, И.А. Блинов, В.Х. Набиев, М.Д. Митькова. Ультразвуковая диагностика дивертикула Меккеля у детей [Текст] / Е.В. Дмитриева, М.Н. Буланов, И.А. Блинов, В.Х. Набиев, М.Д. Митькова // Ультразвуковая и функциональная диагностика. — 2015. — № 2. — С. 68–84.
3. А.Л. Юдин; Е.А. Юматова; А.А. Учеваткин; Р.Х. Азимов; Д.С. Мельченко. Возможности мультидетекторной компьютерной томографии в диагностике дивертикула Меккеля [Текст] / А.Л. Юдин; Е.А. Юматова; А.А. Учеваткин; Р.Х. Азимов; Д.С. Мельченко // Russian Journal of Radiology. — 2017. — № 98 (5). — С. 256–262.

4. В.А. Саввина, М.А. Парников, А.Р. Варфоломеев, В.Н. Николаев. Клинические проявления дивертикула меккеля у детей [Текст] / В.А. Саввина, М.А. Парников, А.Р. Варфоломеев, В.Н. Николаев // Вестник Северо-восточного федерального университета имени М.К. Аммосова. — 2020. — № 3 (20). — С. 28–33.
5. Магомедов М.М., Гаджиев Дж.И., Магомедова З.М. Дивертикул Меккеля у детей // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. — 2022. — № 1.
6. Подкаменев В.В. Патология дивертикула Меккеля у детей [Текст] / В.В. Подкаменев // Российский вестник детской хирургии, анестезиологии и реаниматологии. — 2012. — № 4. — С. 28–33.
7. Лучевая диагностика заболеваний желудочно-кишечного тракта у детей / под ред. М.К. Бронниковой, Н.С. Семичовой, А.А. Зубарева, И.Е. Красиковой. — Москва: МЕДпресс-информ, 2020.
8. Лапароскопические операции при патологии дивертикула Меккеля / И.В. Поддубный, Е.Ю. Дьяконова, М.У. Исмаилов [и др.] // Детская хирургия. — 2015. — Т. 19, № 5. — С. 4–6
9. Подкаменев В.В. Патология дивертикула Меккеля у детей / В.В. Подкаменев // Российский вестник детской хирургии, анестезиологии и реаниматологии. — 2012. — Т. 2, № 4. — С. 28–33.

© Казаков Александр Николаевич (drkazakov@mail.ru); Горшков Антон Юрьевич (gorantur@yandex.ru);
Румянцева Галина Николаевна (Rumyantsevagn@yandex.ru); Карташев Владимир Николаевич (vn_kartachev@mail.ru);
Юсуфов Акиф Арифович (usufov@yandex.ru); Бурченкова Наталья Валерьевна (semakina.natalia@mail.ru);
Попова Анна Анатольевна (Popowa.anyapopova@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.19

ИНТЕРАКТИВНЫЙ ОПРОС И ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ВРАЧЕБНЫХ РЕШЕНИЙ В ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКЕ ЗАБОЛЕВАНИЙ ВЕРХНЕГО ОТДЕЛА ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОГО ТРАКТА

Каткова Анастасия Вениаминовна
кандидат медицинских наук, доцент,
ФГБОУ ВО Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера
sav02.80@mail.ru

INTERACTIVE QUESTIONNAIRE AND DIGITAL CLINICAL DECISION SUPPORT SYSTEM IN PRELIMINARY DIFFERENTIAL DIAGNOSIS OF DISEASES OF THE UPPER GASTROINTESTINAL TRACT

A. Katkova

Summary. The aim of the study is to determine the diagnostic and prognostic significance of individual signs detected by an automated interactive survey system in the preliminary differential diagnosis of diseases of the upper gastrointestinal tract. The analysis of interactive questionnaire data using the gastroenterological module of the automated medical survey system was carried out in 192 patients with verified diseases of the upper gastrointestinal tract: 47 with chronic gastritis and/or duodenitis, 43 with peptic ulcer of the stomach or duodenum, 35 with chronic pancreatitis, 34 with chronic cholecystitis and 33 with with stage I-III gastric cancer. The logistic regression method was used to build predictive models for binary dependent variables. According to the results of an interactive survey, patients with stomach cancer were statistically significantly more likely to experience pain of combined localization and a high prevalence of non-gastroenterological symptoms such as fever and weight loss; and gastric dyspepsia syndrome was significantly more common in non-cancerous diseases of the upper gastrointestinal tract than in stomach cancer. Regression models of diseases of the upper gastrointestinal tract, obtained based on the results of an automated interactive survey system, have demonstrated high diagnostic effectiveness, and can be used for a preliminary differentiated approach to choosing an individual plan for further examination of the patient at the stage of additional laboratory and instrumental studies.

Keywords: interactive survey, digital medical decision support system, preliminary differential diagnostics of digestive system diseases.

Аннотация. Цель исследования — определить диагностическую и прогностическую значимость отдельных признаков, выявляемых с помощью автоматизированной системы интерактивного опроса, в предварительной дифференциальной диагностике заболеваний верхнего отдела желудочно-кишечного тракта. Проведен анализ данных интерактивного анкетирования с помощью гастроэнтерологического модуля автоматизированной системы медицинского опроса 192 больных с верифицированными заболеваниями органов верхнего отдела желудочно-кишечного тракта: 47 — с хроническим гастритом и/или дуоденитом, 43 — с язвенной болезнью желудка или двенадцатиперстной кишки, 35 — с хроническим панкреатитом, 34 — с хроническим холециститом и 33 — с раком желудка I-III стадии. При построении прогностических моделей для бинарных зависимых переменных использовался метод логистической регрессии. По результатам интерактивного опроса у больных с раком желудка статистически значимо чаще наблюдалась боль сочетанных локализаций и высокая распространенность таких не гастроэнтерологических симптомов, как повышение температуры тела и снижение массы тела; а синдром желудочной диспепсии достоверно чаще имел место при неопухолевых заболеваниях органов верхнего отдела ЖКТ, чем при раке желудка. Регрессионные модели заболеваний органов верхнего отдела ЖКТ, полученные на основе результатов автоматизированной системы интерактивного опроса, продемонстрировали высокую диагностическую эффективность и могут быть использованы для предварительного дифференцированного подхода к выбору индивидуального плана дальнейшего обследования пациента на этапе выполнения дополнительных лабораторно-инструментальных исследований.

Ключевые слова: интерактивный опрос, цифровая система поддержки принятия врачебных решений, предварительная дифференциальная диагностика заболеваний системы пищеварения.

Введение

Актуальность проведенного исследования определяется не только стабильно высокой распространенностью болезней органов пищеварения: 7,1–7,7 % в структуре общей заболеваемости [1], но и продолжающимся ростом численности взрослого населения, страдающего заболеваниями желудочно-кишечного тракта [2]. Как правило, клиническая картина различных гастроэнтерологических заболеваний во

многом характеризуется сходной симптоматологией, и опухолевые заболевания могут маскироваться симптомами хронической патологии неопухолевого происхождения, особенно на ранних стадиях опухолевого процесса [3, 4, 5, 6].

Вопросы цифровизации и модернизации диагностического процесса заболеваний внутренних органов являются приоритетным направлением развития науки и технологий в настоящее время [7, 8, 9].

В настоящее время выполняется все возрастающее число работ по задачам математического моделирования в вопросах диагностики и прогнозирования клинических событий с целью их первичной, вторичной профилактики, повышения эффективности лечения [10, 11] и различные средства электронной медицины: компьютерные программы, системы поддержки принятия врачебных решений — являются неотъемлемой частью современного лечебно-диагностического процесса [12, 13]. Но, несмотря на накопленный опыт исследователей, автоматизированные системы остаются недостаточно внедренными в клиническую практику, в том числе, в вопросах предварительной и дифференциальной диагностики, по причине необходимости клинической валидации и убедительной доказательной базы их эффективности.

Цель исследования — определить диагностическую и прогностическую значимость отдельных признаков, выявляемых с помощью автоматизированной системы интерактивного опроса, в предварительной дифференциальной диагностике заболеваний верхнего отдела желудочно-кишечного тракта.

Материал и методы

В ходе исследования был проведен анализ данных интерактивного анкетирования 192 больных (из них 99 мужчин, 93 женщины; в возрасте 19–80 лет) с верифицированными заболеваниями органов верхнего отдела желудочно-кишечного тракта (ВО ЖКТ): 47 — с хроническим гастритом и/или дуоденитом (ХГД), 43 — с язвенной болезнью (ЯБ) желудка или двенадцатиперстной кишки (ДПК), 35 — с хроническим панкреатитом (ХП), 34 — с хроническим холециститом (ХХ) — на базе терапевтического отделения ГАУЗ ПК «Городская клиническая больница №4» и 33 — с раком желудка (РЖ) I–III стадии — на базе ГБУЗ ПК «Пермский краевой онкологический диспансер». В ряде случаев, для изучения клинической значимости некоторых симптомов и их совокупностей, пациенты с хроническими заболеваниями органов ВО ЖКТ неопухолевого происхождения объединялись в одну группу (n=159), данные интерактивного анкетирования в которой сравнивались с аналогичными результатами в группе больных с раком желудка (n=33).

Изучение принципов эффективности интерактивного опроса и цифровой системы поддержки принятия клинических решений в исследовании осуществлялось на примере интерфейса — структурированного интерактивного опроса с помощью гастроэнтерологического модуля автоматизированной системы «Электронная поликлиника» [14], в которой использован метод проблемной диагностики и калькулятор (счетчик) баллов на основании выявленных симптомов и клинических признаков.

Гастроэнтерологический модуль автоматизированной системы позволял выявить 28 возможных клинических проблем, осуществить балльную оценку каждого симптома заболевания органов ЖКТ. Общее количество вопросов первого этапа обследования гастроэнтерологического модуля составляет 87, с детализацией симптомов — 222.

Статистический анализ результатов исследования проводился с использованием программы Statistica 10.0. При описании качественных данных использовались частоты и доли: в каком проценте (%) случаев те или иные значения качественных признаков встречались в выборке. Сравнение качественных признаков производили с составлением таблиц сопряженности и вычислением непараметрического критерия χ^2 (хи-квадрат). При таблице сопряженности размером 2 х 2 (то есть при 1 степени свободы), применяли поправку Йейтса. При анализе таблиц сопряженности 2 х 2 — при наличии в них абсолютных частот (ожидаемого числа в любой из клеток) меньше 5 — использовался двусторонний вариант точного критерия Фишера [15]. При построении прогностических моделей для бинарных зависимых переменных использовался метод логистической регрессии. Для определения ценности прогностических признаков (моделей) в отношении зависимой переменной определялись их чувствительность (Se) и специфичность (Sp) по стандартной методике, положительная (PVP), негативная прогностическая ценность (NVP) и точность (Ac) [16]. Для непрерывных или интервальных рядов значений признака строились характеристические кривые (ROC-кривые) с расчетом коэффициента — AUROC — площадь под кривой (ППК) и его 95 % доверительного интервала. Прогностическая точность признаков считалась отличной при значениях ППК от 0,9 до 1,0, очень хорошей — от 0,8 до 0,9, хорошей — от 0,7 до 0,8, средней — от 0,6 до 0,7, неудовлетворительной от 0,5 до 0,6. Достоверность различий считалась при $p < 0,05$. принималась альтернативная нулевой статистическая гипотеза.

Результаты и их обсуждение

При изучении эффективности интерактивного опроса в предварительной дифференциальной диагностике заболеваний ВО ЖКТ с помощью гастроэнтерологическо-

го модуля удалось обнаружить достоверные различия между группами больных в зависимости от нозологической формы заболевания и локализации боли в животе. В тех случаях, когда боль носила распространенный характер, интерактивный вопросник давал возможность определения сочетанных локализаций боли (двух, трех и даже более локализаций одновременно). По результатам анкетирования у больных с раком желудка статистически значимо чаще наблюдалась боль сочетанных локализаций в сравнении как с любой другой группой пациентов, имеющих патологию ЖКТ неопухолевого происхождения в отдельности (χ^2 =10,82, p=0,0010), так и при объединении всех больных с неопухолевыми заболеваниями (χ^2 =42,27, p <0,0001). При этом, более чем половина группы пациентов (55,4 % случаев) с патологией ЖКТ неопухолевого происхождения отмечали у себя боль одной локализации, а у больных с раком желудка статистически значимо чаще отмечались случаи локализации боли более, чем в 1-й области, а также случаи трех и более локализаций одновременно (таблица 1).

Таблица 1.

Частота выявления боли одной и сочетанных локализаций в группах больных с раком желудка и другими неопухолевыми заболеваниями органов ВО ЖКТ (n=192)

Количество локализаций	Неопухолевые заболевания органов ВО ЖКТ (n=159)		Рак желудка (n=33)		χ2	p
	n	%	n	%		
1 локализация	88	55,35	4	12,12	20,46	**<0,0001**
2–3 локализации	48	30,19	17	51,52	5,55	**0,0185**
4–5 локализаций	10	6,29	8	24,24	10,37	**0,0013**

p — статистически значимые различия выделены полужирным шрифтом

Наряду с различиями в распространенности боли сочетанных локализаций, синдром желудочной диспепсии достоверно чаще, в 47,6 % случаев (χ^2=5,24; p=0,0221) имел место при неопухолевых заболеваниях органов ВО ЖКТ, чем при раке желудка (24,3 % случаев). Аналогичные результаты получены в ряде исследований [3, 4].

Интерактивное анкетирование позволило обнаружить статистически значимые различия в высокой распространенности у больных раком желудка, в отличие от других заболеваний неопухолевого происхождения, таких негастроэнтерологических симптомов, как повышение температуры тела (87,9 % случаев) и снижение массы тела (69,7 %). По данным немалого количества научных работ, лихорадка сопутствует опухоли той или иной локализации, на том или ином этапе ее развития [17]. По результатам одного из исследований [4], более, чем у трети пациентов с раком желудка, отмечалось снижение массы тела (от 8 до 20 кг) за период от 2-х-3-х до 6 месяцев на фоне избыточной массы тела у значительной доли больных (53,9 %). Факт избыточной массы тела исходно и после похудания у больных с раком желудка в вышеуказанном исследовании обратил наше внимание и нашел свое подтверждение и в нашем исследовании (по индексу массы тела наших пациентов).

Для решения задач предварительной дифференциальной диагностики нами также был применен метод регрессионного анализа. В качестве переменных были отобраны показатели, имеющие статистическую значимость по результатам интерактивного опроса. На основе отобранных, наиболее часто встречающихся и значимых признаков заболеваний были созданы классификационные регрессионные модели, которые при заданном уровне значимости (p <0,05, χ^2), позволяют осуществлять дифференциальную диагностику описанных выше заболеваний.

Для хронического гастрита и/или дуоденита уравнение логистической регрессии имеет следующий вид:

$$y = \frac{1}{1 + e^{-(0{,}2*x_1+0{,}5*x_2+1{,}2*x_3+0{,}6*x_4+0{,}5*x_5+0{,}1*x_6-0{,}2*x_7-1{,}9)}}$$

где x_1 — боль в подложечной области и правом подреберье, x_2 — боль через 20–30 минут после еды, x_3 — «голодные» боли, x_4 — отрыжка кислым, x_5 — изжога, x_6 — рвота кислым содержимым, x_7 — запоры.

Уравнение логистической регрессии для язвенной болезни:

$$y = \frac{1}{1 + e^{-\left(\begin{matrix}-18{,}7*x_1+26{,}3*x_2+1{,}1*x_3+2{,}9*x_4+0{,}9*x_5+1{,}5*x_6-3{,}7*x_7- \\ -2{,}3*x_8+2{,}5*x_9-2{,}7\end{matrix}\right)}}$$

где x_1 — боль в подложечной области, x_2 — локальная (точечная) боль, x_3 — боль через 20–30 минут после еды, x_4 — «голодные» боли, x_5 — отрыжка кислым, x_6 — рвота кислым содержимым, x_7 — изжога, x_8 — запоры, x_9 — «овечий» кал.

Ниже представлено уравнение логистической регрессии для хронического панкреатита:

$$y = \frac{1}{1 + e^{\begin{matrix}-(3{,}2*x_1+7{,}3*x_2-0{,}7*x_3-2{,}0*x_4+4{,}9*x_5+1{,}1*x_6+ \\ +9{,}7*x_7+0{,}6*x_8+0{,}9*x_9-0{,}6*x_{10}+3{,}7*x_{11}-5{,}3*x_{12}-2{,}7)\end{matrix}}}$$

где x_1 — боль преимущественно в левом подреберье, x_2 — опоясывающие боли, x_3 — отсроченные боли, x_4 — нарушение аппетита, x_5 — рвота съеденной пищей, x_6 — диарея, x_7 — кашицеобразный стул, x_8 — метеоризм, x_9 — урчание в животе, x_{10} — повышение температуры тела, x_{11} — потливость, x_{12} — снижение массы тела.

Для хронического холецистита уравнение логистической регрессии имеет следующий вид:

$$y = \frac{1}{1 + e^{-(4,3*x_1+0,9*x_2+2,8*x_3+2,6*x_4-0,04*x_5-1,1*x_6+0,5*x_7-4,9)}}$$

где x_1 — боль в правом подреберье, x_2 — боль отсроченная (через 2–3 часа после приёма пищи), x_3 — отрыжка горьким, x_4 — рвота с желчью, x_5 — урчание в животе, x_6 — метеоризм, x_7 — повышение температуры тела.

Ниже представлено уравнение логистической регрессии для рака желудка:

$$y = \frac{1}{1 + e^{-(2,6*x_1+1,6*x_2+2,4*x_3+2,2*x_4)}}$$

где x_1 — сочетанная локализация боли, x_2 — боль преимущественно сразу после еды, x_3 — повышение температуры тела, x_4 — снижение массы тела.

В таблице 2 представлена эффективность регрессионных моделей для дифференциальной диагностики заболеваний органов ВО ЖКТ.

Таблица 2.

Операционные характеристики регрессионных моделей для дифференциальной диагностики заболеваний ВО ЖКТ

Характеристика	ХГД	ЯБ	ХП	ХХ	РЖ
Se, %	8,5 (3,0; 14,0)	90,2 (79,5; 96,3)	82,9 (70,9; 88,9)	76,5 (62,9; 85,5)	63,6 (50,2; 71,5)
Sp, %	97,2 (95,5; 99,0)	96,0% (93,1; 97,7)	98,1 (95,4; 99,4)	96,2 (93,3; 98,1)	97,5 (94,7; 99,1)
PVP, %	50,0 (17,7; 82,3)	86,0 (75,8; 91,8)	90,6 (77,6; 97,3)	81,3% (66,8; 90,8)	84,0 (66,2; 94,4)
NVP, %	76,6 (75,2; 78,0)	97,3 (94,4; 99,0)	96,3 (93,6; 97,6)	95,0 (92,1; 96,9)	92,8 (90,1; 94,4)
Ac, %	75,5 (72,8; 78,2)	94,8 (90,2; 97,4)	95,3 (91,0; 97,5)	92,7 (87,9; 95,9)	91,7 (87,0; 94,4)
AUROC	0,6 (0,5; 0,7) p = 0,041	0,90 (0,85; 0,98) p <0,001	0,94 (0,89; 0,98) p <0,001	0,74 (0,63; 0,85) p <0,001	0,81 (0,70; 0,91) p <0,001

Как видно из таблицы, полученные регрессионные модели демонстрируют высокую точность дифференциальной диагностики рассматриваемых заболеваний: общая точность для моделей превышает 75 %. Что касается диагностической чувствительности, т.е. способности тест-системы верно определять фактическое наличие болезни, то следует отметить достаточно низкий и неинформативный (менее 50 %) показатель для модели, направленной на диагностику хронического гастрита и/или дуоденита. Это может быть связано с большим числом неспецифических клинических проявлений, характерных для данного заболевания, таких как диспепсические симптомы или нейровегетативные реакции, которые могут маскировать данное заболевание под другие заболевания ЖКТ, тем самым уменьшая качество специфической диагностики. Однако созданная модель зарекомендовала себя как высокоточный метод скрининга (специфичность = 97,2 %) для хронического гастрита и/или дуоденита, что позволяет использовать её в рамках профилактических мероприятий и при составлении вопросников, использующихся на периодических профилактических осмотрах в медицинских организациях амбулаторно-поликлинического типа.

Чувствительность других моделей в среднем высокая, что свидетельствует о высокой точности диагностики язвенной болезни, хронического холецистита и панкреатита, а также опухолевого заболевания желудка (средняя чувствительность моделей, описывающих указанные заболевания, равна 78,3 % при минимальном значении 63,6 % для рака желудка и 90,2 % для язвенной болезни). Способность верно определять здоровых лиц при фактическом отсутствии у них болезни, т.е. значение диагностической специфичности, в среднем превышает 95,0 %, что позволяет рассматривать полученные регрессионные модели как самостоятельные классификационные инструменты, которые при рутинном использовании в клинической практике могут позволить значимо повысить качество скрининговых мероприятий рассматриваемых заболеваний верхних отделов ЖКТ.

Среднее значение AUROC для хронического панкреатита, холецистита, язвенной болезни и рака желудка, превышающее 0,85, свидетельствует о значимом потенциале полученных тест-систем как классификаторов для предварительной дифференциальной диагностики упомянутых заболеваний. Что касается определения наличия хронического гастрита и/или дуоденита, то, как уже было упомянуто выше, наличие неспецифических симптомов данного заболевания ощутимо снижает качество дифференциальной диагностики, не исключая гастрит из списка возможных патологий у пациента. Рассчитанная регрессионная модель значима (p>0,05) и информативна для клинического применения, однако AUROC, равная 0,6, не позволяет рекомендовать её как элемент автоматизированной диагностической системы. В противовес этой системе, модели, описывающие другие рассматриваемые патологии: хронические панкреатит и холецистит, язвенную болезнь и рак желудка, могут быть рассмотрены как самостоятельные элементы потенциальных систем поддержки принятия врачебных решений.

Таким образом, средняя чувствительность моделей составила 78,3 %, средняя общая точность превысила 75 %, специфичность — 95 %, а также, среднее значение AUROC превысило для большинства моделей: при хроническом панкреатите, холецистите, язвенной болезни и раке желудка — 0,85.

Выводы

Регрессионные модели заболеваний органов верхнего отдела ЖКТ, полученные на основе результатов автоматизированной системы интерактивного опроса, продемонстрировали высокую диагностическую эффективность и могут быть использованы для предварительного дифференцированного подхода к выбору индивидуального плана дальнейшего обследования пациента на этапе выполнения дополнительных лабораторно-инструментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болкисева П.С., Фазылзянова А.Р., Ямщикова Т.В., Гурьянова Н.Е. Выявление факторов риска возникновения заболеваний органов пищеварения. Modern Science. 2020. № 12–2. С. 48–50. https://elibrary.ru/download/elibrary_44379121_52906777.pdf.
2. Суслин С.А., Трибунская С.А., Колсанова О.А., Алехин И.А., Виргильев П.С. Болезни органов пищеварения как проблема общественного здоровья в современных условиях. Международный научно-исследовательский журнал. 2025. №12 (162). https://elibrary.ru/download/elibrary_87614990_43219582.pdf.
3. Трухан Д.И., Тарасова Л.В., Диомидова В.Н., [и др.]. Болезни органов пищеварения. Диагностика и принципы лечения: учебное пособие. ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Чебоксары, 2024. 342 с.
4. Наумова Л.А., Осипова О.Н. Ведущие симптомы и особенности коморбидного фона при раке желудка. Вестник СурГУ. Медицина. 2014; (1): 31–34. https://cyberleninka.ru/article/n/veduschie-simptomy-i-osobennosti-komorbidnogo-fona-pri-rake-zheludka/viewer.
5. Айталиев М.С., Земляной В.П., Непомнящая С.Л., [и др.]. Особенности клинических проявлений рака проксимального отдела желудка с инфильтрацией кардии и пищевода. Сибирское медицинское обозрение. 2004; (4): 24–26. https://elibrary.ru/item.asp?id=12567860.
6. Шульпекова Ю.О., Русяев В.Ю., Шептулин Д.А., [и др.]. Сочетание функциональных заболеваний органов пищеварения. Медицинский совет. 2020; (5): 96–102. https://doi.org/10.21518/2079-701X-2020-5-96-102.
7. Козенко Ю.А., Козенко Т.Е. Роль искусственного интеллекта в построении цифровой медицины. Сибирская финансовая школа. 2020; 1 (137): 83–86. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42873388.
8. Минаева Ю.В., Романова И.В., Кириллова Т.С. Компьютерные технологии в практической медицине. Альманах мировой науки. 2020; 4 (40): 8–10. https://elibrary.ru/item.asp?id=44247671.
9. Мишланов В.Ю., Зуев А.Л., Фазрахманов Р.А. Биоэтика как основа развития систем искусственного интеллекта в медицине. В сборнике: Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века. Сборник статей по материалам Четвертой всероссийской научно-практической конференции, проводимой в рамках Пермского естественнонаучного форума «Математика и глобальные вызовы XXI века». 2019: 223–227. https://permai.ru/files/sbornik_trudov_2019_1.pdf.
10. Богдановский М.А. Использование методов математического моделирования в медицине. В сборнике: Старт в науке 2024. Сборник статей VII международного научно-исследовательского конкурса. Пенза, 2024: 7–11.
11. Шутова С.В. Гойдин А.П., Савилов П.Н. Применение математического моделирования и прогнозирования в физиологии и медицине. Биология и интегративная медицина. 2024; 3 (68): 417–426. https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-matematicheskogo-modelirovaniya-v-fiziologii-i-meditsine/viewer.
12. Наумович С.А., Наумович С.С. Системы поддержки принятия врачебных решений. Современная стоматология. 2023; (2): 2–7. https://cyberleninka.ru/article/n/sistemy-podderzhki-prinyatiya-vrachebnyh-resheniy-1/viewer.
13. Березин Д.Д. Исследование проектирования современных систем помощи принятия врачебных решений, их история развития в России и мире. Актуальные исследования. 2023; 3 (184): 73–77. https://elibrary.ru/item.asp?id=59744108.
14. Мишланов Я.В., Мишланов В.Ю., Мишланова И.В., Мишланова С.Л. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Электронная поликлиника» №2012614202; опубл. 12.05.12.
15. Тишков А.В., Хромов-Борисов Н.Н., Комашня А.В., [и др.]. Статистический анализ таблиц 2×2 в диагностических исследованиях. СПб.: Издательство СПбГМУ, 2013. 20 с. https://studfile.net/preview/11603589/
16. Кочетов А.Г., Лянг О.В., Масенко В.П., [и др.]. Методы статистической обработки медицинских данных: Методические рекомендации для ординаторов и аспирантов медицинских учебных заведений, научных работников. М.: РКНПК, 2012. 42 с. https://www.fedlab.ru/upload/medialibrary/e05/_.pdf.
17. Лалим О.А., Однокозова Ю.С. Субфебриллитет, как паранеопластическая реакция. Бюллетень медицинских интернет-конференций. 2014; 4(5): 514. https://cyberleninka.ru/article/n/subfebrilitet-kak-paraneoplasticheskaya-reaktsiya/viewer.

© Каткова Анастасия Вениаминовна (sav02.80@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.25

О РОЛИ ВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ В РАЗВИТИИ ОДОНТОГЕННОГО ВЕРХНЕЧЕЛЮСТНОГО СИНУСИТА

THE ROLE OF VIRAL INFECTION IN THE DEVELOPMENT OF ODONTOGENIC MAXILLARY SINUSITIS

S. Mammedov
R. Bersanov
B. Serdarov

Summary. *Objective*. To evaluate the possible role of viral infection in the pathogenesis of catarrhal odontogenic sinusitis (OS) and to analyze the effectiveness of including immunomodulatory and antiviral therapy (Immunofan and Cycloferon) in comprehensive treatment.
Materials and Methods. A total of 60 patients with catarrhal OS (32 men and 28 women) aged 25 to 60 years (mean age 42.3 ± 9.7 years) were examined, as well as 40 apparently healthy individuals (AHI) in the control group (19 men and 21 women; mean age 39.8 ± 8.5 years), comparable by sex and age ($p > 0.05$). All patients underwent clinical and laboratory evaluation, including a complete blood count with leukocyte differential, assessment of the granulocyte index (GI), platelet count, and mean platelet volume (MPV). PCR diagnostics for Epstein–Barr virus DNA, cytomegalovirus, and respiratory viruses was performed in 52 patients with OS. Patients were divided into two subgroups: the main group (n = 29) received standard surgical and pharmacological treatment combined with Immunofan and Cycloferon, while the comparison group (n = 31) received only standard therapy.
Results. Compared with AHI, patients with OS demonstrated a significant increase in relative lymphocyte counts (37.4 ± 7.3 % vs. 28.1 ± 4.9 %; $p < 0.001$) and monocytes (8.9 ± 2.2 % vs. 6.1 ± 1.5 %; $p < 0.001$), along with a decrease in granulocyte proportion and GI (1.29 ± 0.35 vs. 1.78 ± 0.30; $p < 0.001$). Platelet count and MPV were also higher in OS patients compared to controls (320 ± 65 × 10^9/L and 10.7 ± 1.1 fL vs. 260 ± 55 × 10^9/L and 9.6 ± 0.8 fL, respectively; $p < 0.01$). PCR analysis detected DNA of at least one virus in 36 (69.2 %) of 52 examined patients: Epstein–Barr virus in 24 (46.2 %), cytomegalovirus in 10 (19.2 %), respiratory viruses in 8 (15.4 %); mixed infections were identified in some cases. The duration of hospitalization was significantly shorter in the main group than in the comparison group (4.3 ± 1.1 vs. 7.2 ± 1.5 days; $p < 0.001$), with faster resolution of clinical symptoms.
Conclusion. The observed changes in leukocyte differential and platelet indices in patients with catarrhal OS may reflect activation of antiviral immune responses and indicate a possible involvement of viral infection in disease pathogenesis. The inclusion of Immunofan and Cycloferon in комплекс treatment of catarrhal OS is associated with reduced hospital stay and accelerated clinical recovery, which requires confirmation in randomized controlled trials with mandatory laboratory verification of viral infection.

Keywords: odontogenic sinusitis, viral infection, leukocyte differential, platelets, Immunofan, Cycloferon.

Маммедов Сердар Марсович
Аспирант, младший научный сотрудник, ФГБОУ ВО Чеченский государственный университет им А.А. Кадырова; ФГБУН КНИИ им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук, г. Грозный
serdar020396@gmail.com
Берсанов Руслан Увайсович
Доктор медицинских наук, профессор, ФГБОУ ВО Чеченский государственный университет им А.А. Кадырова; ФГБУН КНИИ им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук, г. Грозный
bersanovr@mail.ru
Сердаров Бегенч Атаевич
Ассистент, Туркменский государственный медицинский университет им. М. Гаррыева, г. Ашхабад
begaserdar17@yandex.ru

Аннотация. Цель. Оценить возможную роль вирусной инфекции в патогенезе катарального одонтогенного синусита (ОС) и проанализировать эффективность включения иммуномодулирующей и противовирусной терапии (иммунофан и циклоферон) в комплексное лечение.
Материалы и методы. Обследовано 60 пациентов с катаральным ОС (32 мужчины, 28 женщин) в возрасте от 25 до 60 лет (средний возраст 42,3±9,7 года) и 40 практически здоровых лиц (ПЗЛ) контрольной группы (19 мужчин, 21 женщина; 39,8±8,5 года), сопоставимых по полу и возрасту ($p>0,05$). Всем пациентам проводили клинико-лабораторное обследование, включавшее общий анализ крови с лейкоцитарной формулой, оценку гранулоцитарного индекса (ГИ), числа тромбоцитов и среднего объёма тромбоцитов (СОТ). У 52 пациентов с ОС выполнялась ПЦР-диагностика для выявления ДНК вируса Эпштейна–Барр, цитомегаловируса и респираторных вирусов. Пациенты с ОС были разделены на две подгруппы: основная группа (n=29) получала стандартное хирургическое и медикаментозное лечение в сочетании с иммунофаном и циклофероном, группа сравнения (n=31) — только стандартную терапию.
Результаты. У пациентов с ОС по сравнению с ПЗЛ отмечено достоверное повышение относительного содержания лимфоцитов (37,4±7,3 % против 28,1±4,9 %; $p <0,001$) и моноцитов (8,9±2,2 % против 6,1±1,5 %; $p <0,001$) на фоне снижения доли гранулоцитов и ГИ (1,29±0,35 против 1,78±0,30; $p <0,001$). Число тромбоцитов и СОТ у больных ОС также были выше, чем в контрольной группе (320±65·10^9/л и 10,7±1,1 фл против 260±55·10^9/л и 9,6±0,8 фл соответственно; $p <0,01$). ПЦР-диагностика выявила ДНК хотя бы одного вируса у 36 (69,2 %) из 52 обследованных пациентов: вирус Эпштейна–Барр — у 24 (46,2 %), цитомегаловирус — у 10 (19,2 %), респираторные вирусы — у 8 (15,4 %), у части больных определялись сочетанные инфекции. Длительность госпитализации в основной группе была меньше, чем в группе сравнения (4,3±1,1 против 7,2±1,5 дня; $p <0,001$), отмечалось более быстрое купирование клинических симптомов.
Заключение. Выявленные изменения лейкоформулы и тромбоцитарных индексов у пациентов с катаральным ОС могут отражать активацию противо-

вирусного иммунного ответа и указывать на возможное участие вирусной инфекции в патогенезе заболевания. Включение иммунофана и циклоферона в комплексное лечение катарального ОС ассоциируется с сокращением длительности госпитализации и ускорением регресса клинической симптоматики, что требует подтверждения в рандомизированных контролируемых исследованиях с обязательной лабораторной верификацией вирусной инфекции.

Ключевые слова: одонтогенный синусит, вирусная инфекция, лейкоцитарная формула, тромбоциты, иммунофан, циклоферон.

Введение

Одонтогенный синусит (ОС) представляет собой воспалительное поражение слизистой оболочки верхнечелюстной пазухи, обусловленное инфекцией, исходящей из очагов в области верхней челюсти (хронический периодонтит, перирадикулярные кисты, осложнения стоматологических вмешательств и др.). В последние годы одонтогенный синусит рассматривается как отдельная клинико-патогенетическая форма синусита, отличающаяся от риносинусита по этиологической структуре, микробиоте и подходам к лечению [1,2].

Традиционно основное внимание уделяется бактериальному компоненту одонтогенной инфекции, однако накопление данных о роли вирусов при заболеваниях ЛОР-органов и полости рта позволяет предполагать возможное участие вирусной инфекции в формировании воспалительного процесса в верхнечелюстной пазухе. Вирусы, поражающие эпителий верхних дыхательных путей, могут нарушать мукоцилиарный клиренс, изменять локальный иммунный ответ и создавать благоприятные условия для персистенции и распространения бактериальной флоры.

Косвенными маркерами вирусной инфекции являются характерные изменения в лейкоцитарной формуле (лимфомоноцитоз при относительном уменьшении гранулоцитов и ГИ), а также изменения тромбоцитарных индексов, включая число тромбоцитов и средний объём тромбоцита (СОТ). Однако данные о состоянии периферической крови и возможной роли вирусной инфекции именно при катаральном одонтогенном синусите ограничены. Особый интерес представляет оценка эффективности комплексного лечения катарального ОС с включением препаратов, обладающих иммуномодулирующей и потенциально противовирусной активностью, таких как иммунофан и циклоферон [3,4].

Цель исследования

Оценить возможную роль вирусной инфекции в патогенезе катарального одонтогенного синусита на основании данных периферической крови и ПЦР-диагностики, а также провести статистически обоснованную оценку эффективности включения иммунофана и циклоферона в комплексное лечение данного состояния.

Материалы и методы

Характеристика выборки. В исследование включено 60 пациентов с катаральным одонтогенным синуситом (ОС) в возрасте от 25 до 60 лет (42,3±9,7 года); 32 (53,3 %) пациента были мужчинами и 28 (46,7 %) — женщинами. Диагноз ОС устанавливался на основании стоматологического осмотра, данных ЛОР-обследования и лучевых методов диагностики (рентгенография и КЛКТ верхнечелюстных пазух).

Критерии включения:
- клинико-инструментально подтверждённый одонтогенный характер поражения верхнечелюстной пазухи;
- катаральная форма воспаления слизистой оболочки;
- возраст 25–60 лет;
- согласие пациента на участие в исследовании.

Критерии исключения:
- острые бактериальные риносинуситы не одонтогенного происхождения;
- тяжёлая соматическая патология в стадии декомпенсации;
- первичные и вторичные иммунодефицитные состояния;
- длительный приём системных глюкокортикостероидов или цитостатиков;
- беременность и лактация.

Контрольную группу составили 40 практически здоровых лиц (ПЗЛ) без клинических и инструментальных признаков заболеваний ЛОР-органов и полости рта, сопоставимых по полу и возрасту с пациентами с ОС (39,8±8,5 года; $p>0,05$).

У пациентов с ОС дополнительно оценивалась частота эпизодов острых респираторных вирусных инфекций (ОРВИ) в анамнезе за последний год. Условно частыми эпизодами считали ≥3 эпизодов ОРВИ в год.

Подгруппы по характеру терапии

Пациенты с ОС были разделены на две подгруппы:
— Основная группа (n=29) получала стандартное хирургическое и медикаментозное лечение одонтогенного синусита (устранение источника одонтогенной инфекции, санация верхнечелюстной пазухи, антибактериальная терапия, местные противовоспалительные средства) в сочетании с иммунофаном и циклофероном по стандартным схемам.
— Группа сравнения (n=31) получала только стандартную терапию без иммуномодуляторов и противовирусных препаратов.

Группы были сопоставимы по полу, возрасту, длительности заболевания, частоте эпизодов ОРВИ и выраженности клинических проявлений на момент включения в исследование (p>0,05 по всем указанным параметрам).

Лабораторные исследования. Всем пациентам с ОС и ПЗЛ проводился общий анализ крови с определением количества лейкоцитов, эритроцитов, гемоглобина, тромбоцитов, а также развернутой лейкоцитарной формулы. Оценивали относительное и абсолютное содержание нейтрофилов, лимфоцитов, моноцитов, эозинофилов и базофилов [5,6].

Гранулоцитарный индекс (ГИ) рассчитывали, как отношение суммарной доли гранулоцитов к суммарной доле агранулоцитов. Дополнительно анализировали число тромбоцитов и средний объём тромбоцитов (СОТ).

У 52 из 60 пациентов с ОС при помощи полимеразной цепной реакции (ПЦР) в мазках со слизистой оболочки носа и ротоглотки проводили выявление ДНК вируса Эпштейна–Барр, цитомегаловируса и наиболее распространённых респираторных вирусов [7,8].

Оценка эффективности терапии. Эффективность терапии оценивали по следующим показателям:
— длительность госпитализации;
— время купирования болевого синдрома;
— время нормализации температуры тела;
— динамика рентгенологических и КЛКТ-признаков воспаления в верхнечелюстной пазухе (по данным контрольного исследования).

Клиническое обследование проводилось при поступлении, на 3–4-е и 7–10-е сутки лечения [9,10].

Статистический анализ. Статистическую обработку данных проводили с использованием пакета Statistica 6.0 for Windows. Для количественных показателей рассчитывали среднее значение и стандартное отклонение (M±SD). Нормальность распределения оценивали с помощью критерия Шапиро–Уилка. При нормальном распределении для сравнения двух независимых групп применяли t-критерий Стьюдента, при ненормальном — критерий Манна–Уитни. Для сравнения долей использовали критерий χ^2 с поправкой Йейтса. Статистически значимыми считали различия при p <0,05.

Результаты

У большинства пациентов с катаральным ОС отмечались жалобы на одностороннюю заложенность носа, чувство тяжести и боли в проекции верхнечелюстной пазухи, усиливающиеся при наклоне головы, а также патологические выделения из носа. В анамнезе у 45 (75,0 %) пациентов с ОС было не менее трёх эпизодов ОРВИ в течение последнего года (медиана 4 [3;6] эпизодов), тогда как среди ПЗЛ частые эпизоды ОРВИ регистрировались лишь у 6 (15,0 %) человек (медиана 1 [0;2]; p<0,001).

У пациентов с ОС общее количество лейкоцитов не отличалось от такового у ПЗЛ (примерно 6,8±1,4·10^9/л против 6,3±1,2·10^9/л; p>0,05), однако отмечались выраженные сдвиги в лейкоцитарной формуле. Относительное содержание нейтрофилов было снижено по сравнению с контролем (48,2±8,0 % против 60,5±5,5 %; p <0,001).

— Доля лимфоцитов, напротив, была повышена (37,4±7,3 % против 28,1±4,9 %; p <0,001).
— Относительное содержание моноцитов также было выше у больных ОС (8,9±2,2 % против 6,1±1,5 %; p <0,001).

В результате гранулоцитарный индекс у пациентов с ОС был достоверно ниже, чем у ПЗЛ (1,29±0,35 против 1,78±0,30; p <0,001), что отражает сдвиг лейкоцитарной формулы в сторону агранулоцитов и соответствует картине вирусной инфекции.

Число тромбоцитов у пациентов с ОС превышало соответствующий показатель у ПЗЛ (320±65·10^9/л против 260±55·10^9/л; p <0,01). Средний объём тромбоцитов (СОТ) также был выше в группе ОС (10,7±1,1 фл против 9,6±0,8 фл; p <0,001), что может свидетельствовать об активации тромбоцитарного звена и участии тромбоцитов в воспалительном процессе.

По данным ПЦР-исследования у 36 (69,2 %) из 52 обследованных пациентов с ОС была выявлена ДНК хотя бы одного из исследованных вирусов.

— ДНК вируса Эпштейна–Барр обнаружена у 24 (46,2 %) пациентов.
— ДНК цитомегаловируса — у 10 (19,2 %).
— Респираторные вирусы (аденовирус, риновирус и др.) — у 8 (15,4 %).

У 10 (19,2 %) пациентов отмечено сочетанное выявление двух и более вирусов. Наличие вирусной инфекции ассоциировалось с более выраженными изменениями лейкоцитарной формулы (более высокий лимфоцитоз и моноцитоз, более низкий ГИ) и увеличением СОТ ($p < 0,05$).

Включение иммунофана и циклоферона в комплексное лечение катарального ОС способствовало более быстрому регрессу клинических симптомов. В основной группе длительность госпитализации составила 4,3±1,1 дня, тогда как в группе сравнения — 7,2±1,5 дня ($p < 0,001$). В основной группе отмечалось более быстрое купирование болевого синдрома (3,1±0,9 против 4,7±1,2 дня; $p < 0,001$) и нормализация температуры (2,4±0,8 против 3,5±1,0 дня; $p=0,002$). К 7–10-му дню лечения полное рентгенологическое или КЛКТ-разрешение воспалительных изменений в верхнечелюстной пазухе регистрировалось у 80,0 % пациентов основной группы и у 56,7 % пациентов группы сравнения ($p=0,03$).

Обсуждение

Полученные данные свидетельствуют о том, что у пациентов с катаральным одонтогенным синуситом имеются характерные изменения периферической крови, более типичные для вирусной, чем для чисто бактериальной инфекции. Повышение относительного содержания лимфоцитов и моноцитов, снижение доли гранулоцитов и ГИ, а также увеличение числа тромбоцитов и среднего объёма тромбоцитов отражают активацию противовирусного и воспалительного ответа организма.

Выявленная высокая частота лабораторных признаков вирусной инфекции по данным ПЦР-диагностики (около 70 % обследованных пациентов) в сочетании с анамнестическими сведениями о частых эпизодах ОРВИ и изменениями лейкоформулы позволяет предполагать, что вирусы могут играть важную роль в инициировании и поддержании воспалительного процесса при катаральном ОС. Вирусное поражение слизистой оболочки носа и верхнечелюстной пазухи потенциально нарушает мукоцилиарный клиренс, способствует колонизации одонтогенной бактериальной флорой и углублению воспаления.

Особый интерес представляет наблюдаемая ассоциация между наличием вирусной инфекции и изменениями тромбоцитарных индексов, в частности увеличением среднего объёма тромбоцитов. Это может косвенно указывать на участие тромбоцитов в противовирусном и воспалительном ответе при одонтогенном синусите и открывает перспективы для дальнейшего изучения СОТ в качестве возможного маркера активности процесса.

Сравнительный анализ эффективности комплексной терапии показал, что включение иммунофана и циклоферона в стандартную схему лечения катарального ОС ассоциируется с сокращением сроков госпитализации и более быстрым регрессом клинических и рентгенологических проявлений заболевания. Учитывая предполагаемую роль вирусной инфекции в патогенезе катарального ОС, такая терапевтическая тактика выглядит патогенетически обоснованной.

Выводы

1. У пациентов с катаральным одонтогенным синуситом по сравнению с практически здоровыми лицами выявлены достоверные изменения лейкоцитарной формулы периферической крови, характеризующиеся повышением содержания лимфоцитов и моноцитов, снижением доли гранулоцитов и ГИ, а также увеличением числа тромбоцитов и среднего объёма тромбоцитов (СОТ). Эти изменения могут отражать активацию противовирусного иммунного ответа и указывать на возможную роль вирусной инфекции в патогенезе катарального ОС.
2. По данным ПЦР-диагностики у значительной части пациентов с катаральным ОС выявляются маркеры активной или латентной вирусной инфекции (вирус Эпштейна–Барр, цитомегаловирус, респираторные вирусы), что в совокупности с гематологическими и клиническими данными подтверждает предположение о вовлечении вирусного компонента в развитие и течение заболевания.
3. Включение иммунофана и циклоферона в комплексное лечение катарального одонтогенного синусита ассоциируется с сокращением длительности госпитализации и ускорением регресса клинических и рентгенологических проявлений заболевания. Однако для окончательной оценки эффективности и безопасности такой схемы терапии необходимы рандомизированные контролируемые исследования с достаточной статистической мощностью и обязательной лабораторной верификацией вирусной инфекции.
4. Показатель среднего объёма тромбоцитов (СОТ) в сочетании с данными лейкоцитарной формулы может рассматриваться как потенциальный предиктор участия вирусной инфекции в патогенезе катарального одонтогенного синусита; его клиническая значимость требует дальнейшего изучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берсанов Р.У. Осложнения при резекции корней моляров на верхней челюсти / Р.У. Берсанов, С.М. Маммедов, Л.С. Такаева // Киндаровские чтения: Материалы и доклады Международной научно-практической конференции, Грозный, 25 сентября 2024 года. — Грозный: Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова, 2024. — С. 157–161. — DOI 10.36684/137-1-2024-157-161. — edn phtqss.
2. Определение характера микрофлоры верхнечелюстного синуса до и после лечения одонтогенного верхнечелюстного синуса с применением зубосохраняющих технологий / С.М. Маммедов, Р.У. Берсанов, М.Р. Берсанова, Б.А. Сердаров // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2025. — № 3. — С. 204–207. — DOI 10.37882/2223–2966.2025.03.29. — edn sodhwk.
3. Маммедов С.М. Статистический анализ эффективности зубосохраняющих вмешательств при одонтогенном синусите / С.М. Маммедов, Р.У. Берсанов // Медико-фармацевтический журнал Пульс. — 2025. — Т. 27, № 10. — С. 25–31. — DOI 10.26787/nydha-2686-6838-2025-27-10-25-31. — edn khcswu.
4. Маммедов С.М. Комплексный анализ терапевтической эффективности тромбоцитарных биоматериалов в модуляции репаративного остеогенеза и оптимизации послеоперационной реабилитации при одонтогенном синусите / С.М. Маммедов, Р.У. Берсанов // Вестник КНИИ РАН. Серия: Естественные и технические науки. — 2025. — № 3(22). — С. 65–76. — DOI 10.69537/VKNIIRAN.2025.22.3.006. — edn aegrre.
5. Кабак С.Л. и др. Хронический одонтогенный верхнечелюстной синусит с остеитом: клинический случай //Otorhinolaryngology Eastern Europe. — 2025. — С. 245
6. Крюков А.И., Котов М.А., Махмутов Р.Д. Применение методики синус-диализа верхнечелюстной пазухи при хроническом одонтогенном верхнечелюстном синусите. Клинический случай //Вестник оториноларингологии. — 2025. — Т. 90. — №. 3. — С. 84–87.
7. Мирзоев М.Ш. и др. Этиология, патогенез и методы диагностики одонтогенного перфоративного верхнечелюстного синусита //Здравоохранение Таджикистана. — 2025. — №. 1 (364). — С. 106–114.
8. Нармахматов Б.Т., Махмудов А.А. Имунофан в комплексном лечении больных с флегмонами дна полости рта //Central Asian Research Journal for Interdisciplinary Studies (CARJIS). — 2025. — Т. 4. — №. 2. — С. 44–51.
9. Дворянчиков В.В., Исаченко В.С., Сыроежкин Ф.А., Балин В.В., Шафигуллин А.В. Одонтогенный верхнечелюстной синусит: исследования в начале 21 столетия. Российская оториноларингология. 2025;24(3):88–100. https://doi.org/10.18692/1810-4800-2025-3-88-100.
10. Thomas D.C. et al. Toothaches of Non-odontogenic Origin //Dental Clinics. — 2026. — Т. 70. — №. 1. — С. 209–224.

© Маммедов Сердар Марсович (serdar020396@gmail.com); Берсанов Руслан Увайсович (bersanovr@mail.ru);
Сердаров Бегенч Атаевич (begaserdar17@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.26

СОВРЕМЕННЫЙ ВЗГЛЯД НА ПРОБЛЕМУ СИНДРОМА ПОЛИКИСТОЗНЫХ ЯИЧНИКОВ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

A MODERN VIEW ON THE PROBLEM OF POLYCYSTIC OVARIAN SYNDROME (LITERATURE REVIEW)

L. Mamontova
I. Korotkikh
E. Khodasevich

Summary. Polycystic ovary syndrome (PCOS) is a complex multifactorial disease that requires a comprehensive approach to understanding its etiology and pathogenesis. This article explores the heterogeneous nature of PCOS, which is influenced by both genetic and environmental factors. OHSS is characterized by complex interactions between various components of the endocrine system, psychoemotional state, and metabolic changes. The article provides an overview of the current scientific literature on the etiopathogenesis and treatment of OHSS, discussing the various factors that contribute to its development and the need for a comprehensive approach to its management. The relevance of this topic is further emphasized by the increasing prevalence of OHSS among women of reproductive age. In addition to developing new approaches to the pharmacological treatment of OHSS, it is crucial to promote awareness and provide psychological support to women affected by this syndrome.

Keywords: polycystic ovaries, genetic factors, environmental factors, endocrine system, metabolic changes, reproductive age, drug therapy, inositol, psychological support.

Мамонтова Лейла Николаевна
Аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н. Бурденко
leyla.mamontova.96@inbox.ru
Коротких Ирина Николаевна
доктор медицинских наук, профессор, заслуженный врач Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н. Бурденко
korotkikh_1950@mail.ru
Ходасевич Эллина Валерьевна
Кандидат медицинских наук, ассистент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н. Бурденко
elina.hodasevich@yandex.ru

Аннотация. Синдром поликистозных яичников (СПЯ) представляет собой сложное мультифакториальное заболевание, которое требует комплексного подхода к пониманию его этиологии и патогенеза. В статье рассматривается, гетерогенная природа СПЯ, в развитии которого задействованы как генетические, так и экологические факторы. СПЯ характеризуется сложными взаимодействиями между различными звеньями эндокринной системой, психоэмоциональным состоянием и метаболическими изменениями. В статье дан обзор современной научной литературы по этиопатогенезу и лечению СПЯ, рассматривается многообразие факторов, влияющих на его развитие и необходимость комплексного подхода в его лечении. Актуальность темы повышается в свете роста частоты СПЯ среди пациенток репродуктивного возраста. Важным является не только разработка новых подходов к медикаментозной терапии СПЯ, но и проведение активной просветительной работы и оказание психологической поддержки женщинам, страдающим от этого синдрома.

Ключевые слова: поликистозные яичники, генетические факторы, экологические факторы, эндокринная система, метаболические изменения, репродуктивный возраст, медикаментозная терапия, инозитол, психологическая поддержка.

Введение

Синдром поликистозных яичников (СПЯ) — мультифакторная гетерогенная патология, характеризующаяся нарушениями менструального цикла, хронической ановуляцией, гиперандрогенией, кистозным изменением яичников и бесплодием. СПЯ признан наиболее распространенным эндокринным заболеванием у женщин репродуктивного возраста во всем мире. Частота СПЯ среди женщин репродуктивного возраста составляет 8–15 %, среди причин бесплодия — 20–22 %, среди женщин с эндокринным бесплодием — 50–60 % [1].

Современные представления об этиологии и патогенезе СПЯ

Впервые СПЯ описан Д. Штейном и Д. Левенталем в 1935 г. За 90 лет изучения синдрома, этиология заболевания остаётся до конца невыясненной. Данный синдром на протяжении многих лет был одним из самых противоречивых явлений в гинекологической эндокринологии. Но многие авторы сходятся во мнении, что в этиологии СПЯ большую роль играет генетическая предрасположенность. Первыми эту теорию предложили американские ученые. Данная предрасположенность сходна со склонностью к сахарному диабету II типа, ожирению. По мнению исследователей из Университета Аристотеля, в Салониках доказано, что синдром поликистозных яичников является семейным заболеванием [8]. Хотя роль генетических факторов в СПЯ решительно поддерживается, гены, которые участвуют в этиологии синдрома, до сих пор не были полностью исследованы.

По мнению отечественных учёных [4], факторы окружающей среды влияют на экспрессию генов, обуславливая генетический полиморфизм СПЯ. Однако данный вопрос также нельзя считать до конца изученным.

Ряд авторов [2] рассматривают следующие факторы, имеющие наибольшее значение в развитии СПЯ:

- патологическое течение беременности и/или родов у матери пациентки (отводится особая роль угрозе прерывания беременности, преэклампсии, преждевременному излитию околоплодных вод, длительному безводному промежутку, слабости родовой деятельности, преждевременной отслойке нормально расположенной плаценты, острой асфиксии и хронической гипоксии плода);
- перенесенные девочкой в различные периоды жизни, особенно в пубертатном возрасте, острые или хронические инфекции; лидирующее место в этом плане занимают заболевания рото— и носоглотки (частые ангины, хронический тонзиллит, корь, краснуха, туберкулез, вирусный гепатит А), нейроинфекции, а также интоксикации;
- черепно-мозговые травмы (сотрясения, контузии, ушибы головного мозга).
- психоэмоциональное напряжение, стрессы, психические травмы, повышенные учебные нагрузки и хронический информационный стресс;
- хронические рецидивирующие воспалительные заболевания внутренних половых органов;
- врожденный генетически детерминированный дефект ферментативных систем яичника;
- наследственный фактор.

В современной литературе все больше убедительных данных об увеличении распространенности психологических расстройств, таких как тревога, депрессия и беспомощность у пациентов с СПЯ. Кроме того, учеными Monash University (Мельбурн, Австралия) было обнаружено, что женщины с СПЯ подвержены повышенному риску социальной фобии, болезненного эмоционального стресса, суицидальных мыслей, биполярного расстройства, синдрома дефицита внимания либо гиперактивности [9]. Тревога и депрессия являются двумя основными сопутствующими психологическими состояниями, связанными с СПЯ, и высокая частота этих расстройств является существенной проблемой для здравоохранения.

Большой интерес представляет работа о взаимосвязи СПЯ и риска развития кардиометаболических нарушений, инсулинорезистентности, метаболического синдрома, ожирения, ночного апноэ, которую провели исследователи Великобритании, проанализировав более 1000 статей по данной проблеме [10]. В целом, женщины живут дольше мужчин и в более старшем возрасте у них развиваются сердечно-сосудистые заболевания. Однако женщины с СПЯ, по сравнению с женщинами без синдрома, сопоставимыми по возрасту и индексу массы тела, имеют более высокий риск резистентности к инсулину, гиперинсулинемии, дислипидемии и повышенного протромботического состояния, что может привести к более высокому уровню сахарного диабета 2 типа, жировой болезни печени, субклинического атеросклероза, сосудистой дисфункции, сердечно-сосудистых заболеваний и смертности. Дальнейшие изменения при СПЯ включают повышенную распространенность апноэ во сне, а также различные изменения в секреции и/или функции адипокинов, провоспалительных факторов жировой ткани и гормонов кишечника, все из которых оказывают прямое или косвенное влияние на сложную сигнальную сеть, которая регулирует метаболизм, чувствительность к инсулину и энергетический гомеостаз.

Доктор Alexandros N. Vgontzas, профессор психиатрии и специалист по расстройствам сна в Государственном медицинском колледже штата Пенсильвания, считает, что женщины с СПЯ подвержены риску синдрома обструктивного апноэ сна (СОАС) и чрезмерной сонливости в дневное время [11]. Он обследовал в лаборатории сна 53 женщины с СПЯ (возрастной диапазон 16–45 лет) и 452 контрольные женщины в пременопаузе (воз-

растной диапазон 20–42 года) из общей рандомизированной выборки для оценки распространенности СОАС в течение 1 ночи. Кроме того, у женщин с СПЯ были проведены тесты на свободный и слабо связанный тестостерон в плазме, общий тестостерон и концентрацию глюкозы и инсулина в крови натощак. У молодых женщин с ожирением и СПЯ успешное лечение СОАС улучшает чувствительность к инсулину, уменьшает симпатический выброс и снижает диастолическое артериальное давление. Это также доказали своим исследованием профессора Чикагского университета Esra Tasali и Florian Chapotot [12].

Множество исследований проводились и проводятся до настоящего времени по выяснению связи артериальной гипертензии и СПЯ [13]. Чешские эндокринологи провели исследование, в котором участвовало 50 женщин с СПЯ и 335 женщин контроля с сопоставимым средним возрастом, случайно выбранные из населения девяти районов Чешской Республики. Они были сопоставлены по основным антропометрическим характеристикам, кровяному давлению, липидам плазмы и глюкозе натощак. Женщины с СПЯ имели значительно более высокий индекс массы тела (ИМТ). После корректировки на ИМТ у женщин с СПЯ было более высокое кровяное давление и уровень холестерина ЛПНП, а также более низкое соотношение ЛПВП и холестерина. Артериальная гипертензия была более распространена у женщин с СПЯ, чем в контрольной группе. Не было существенного различия в частоте нарушения уровня глюкозы натощак между обеими группами. Нарушение толерантности к глюкозе было обнаружено у 11,8 % женщин с СПЯ. Сахарный диабет чаще встречался в семьях с СПЯ. Чешские женщины с СПЯ, даже в возрасте тридцати лет, демонстрируют значительно худший профиль сердечно-сосудистого риска, чем контрольная группа, сформированная из случайной выборки населения. Авторы считают, что различия не могут быть объяснены ожирением.

Голландские исследователи [14] изучали эпидемиологию сахарного диабета, гипертонии и сердечных жалоб в популяции с синдромом поликистозных яичников. Всего по телефону было опрошено 346 пациентов с СПЯ, средний возраст которых составил 38,7 года (диапазон 30,3–55,7 лет), а средний индекс массы тела — 24,4 кг/м^2 (диапазон 17,5–55,8 кг/м^2). Диабет наблюдался у восьми (2,3 %), гипертония у 31 (9 %) и сердечные жалобы у 3 (0,9 %) женщин. Среди женского населения Нидерландов гипертоническая болезнь встречалась в 2,5 чаще у женщин, в анамнезе которых имелся СПЯ, что может объясняться также наличием избыточной массы тела у женщин с СПЯ.

В литературе описывают разнообразные теории возникновения СПЯ, связанные с функционированием гипофиза, гипоталамуса, надпочечников и ферментативной системы организма. Поскольку большинство женщин с СПЯ имеют либо избыточный вес, либо страдают ожирением, вполне возможен триггер, связанный с питанием или жировой тканью, для развития синдрома. В настоящее время хорошо установлено, что, СПЯ характеризуется хроническим состоянием воспаления и резистентностью к инсулину, но точные причины, лежащие в основе этих двух ключевых биохимических нарушений, в настоящее время неизвестны. Австралийские исследователи представляют поддержку микробиологической гипотезы о развитии СПЯ. Эта новая парадигма в этиологии СПЯ предполагает, что нарушения бактериальной флоры кишечника («дисбактериоз кишечной микробиоты»), вызванные неправильным питанием, приводят к увеличению проницаемости слизистой оболочки кишечника, в результате чего увеличивается прохождение липополисахарида из грамотрицательных бактерий толстой кишки в системный кровоток. Возникающая в результате активация иммунной системы нарушает функцию рецепторов инсулина, повышая уровень инсулина в сыворотке крови, что, в свою очередь, увеличивает выработку андрогенов яичниками и препятствует нормальному развитию фолликулов. Таким образом, теория дисбактериоза кишечной микробиоты при СПЯ может объяснить все три компонента синдрома — ановуляцию/нарушение менструального цикла, гиперандрогенизм (акне, гирсутизм) и развитие множественных мелких кист яичников [15].

Ученые из Китая [16] также подтверждают роль микробиоты кишечника в патогенезе и лечении СПЯ. С помощью летрозола (нестероидного ингибитора ароматазы) они индуцировали СПЯ у экспериментальных крыс. Были определены изменения в эстральных циклах, гормональном уровне, морфологии яичников и микробиоте кишечника с помощью ПЦР-DGGE и ПЦР в реальном времени. Результаты показали, что у крыс с СПЯ наблюдались аномальные эстральные циклы с увеличением биосинтеза андрогенов и наблюдались множественные большие кисты с уменьшением гранулезных слоев в тканях яичников. Между тем состав микробиоты кишечника крыс, получавших летрозол, отличался от такового в контроле. Лактобактерии, руминококки и клостридии были ниже, в то время как превотелла была выше у крыс с СПЯ по сравнению с контрольными крысами. После лечения крыс с СПЯ трансплантацией лактобацилл и фекальной микробиоты (FMT) от здоровых крыс было обнаружено, что эстральные циклы улучшились у всех 8 крыс и у 6 из 8 крыс в группе трансплантации лактобацилл со снижением биосинтеза андрогенов. Морфология их яичников нормализовалась. Состав микробиоты кишечника восстановился как в группах, обработанных FMT, так и в группах, обработанных лактобациллами, с увеличением лактобацилл и клостридий и уменьшением превотеллы. Эти результаты показали, что дисбактериоз микробиоты кишечника был связан с патогенезом СПЯ. Вмешатель-

ства в микробиологию с помощью FMT и трансплантации лактобацилл были полезны для лечения крыс с СПЯ.

Группа американских ученых под руководством Dr. Scott T. Kelley [17], провели похожий эксперимент. Использовали мышей одного возраста с СПЯ, индуцированного летрозолом, они продемонстрировали значительные изменения микробиоты кишечника, не зависящие от диеты, что позволяет предположить, что дисбактериоз кишечника может также наблюдаться у женщин с СПЯ. Лечение летрозолом было связано с зависящим от времени сдвигом в микробиоте кишечника и существенным снижением обще видового и филогенетического богатства. Лечение летрозолом также коррелировало со значительными изменениями в обилии специфических Bacteroidetes и Firmicutes, ранее вовлеченных в другие эксперименты на подопытных мышах. Их результаты показывают, что гиперандрогенемия, наблюдаемая при СПЯ, может значительно изменить микробиот кишечника независимо от диеты.

Интересное исследование было проведено турецкими авторами под руководством G. Arusoglu и G. Koksal [18]. Они предположили, что у женщин с СПЯ имеются изменения в регуляции аппетита. Ученые изучали изменение реакции на орексигенные (грелин), анорексигенные пептиды (PYY, CCK) и чувство сытости натощак и при приеме пищи. Они также пытались отследить влияние использования КОК на эти гормоны и реакцию на чувство сытости. В исследовании участвовали 2 группы женщин: 18 худых пациенток с диагнозом СПЯ и 18 соматически здоровых женщин контрольной группы. Показатели индекса массы тела и возраст женщин были приблизительно одинаковые. Суть эксперимента заключалась в оценке уровней гормонов гастроинтестинального тракта, конкретно грелина, пептида YY (PYY) и холецистокинина (CCK), а также измерение уровня сытости (SI) на 0, 15, 30, 45, 60, 90, 120-й и 180-й минуте, после приема стандартной порции пищи. Изначально значения грелина, PYY, CCK и SI натощак у пациенток с СПЯ не отличались от показателей контрольной группы. Показатели PYY, CCK и SI, после приемов пищи, также не различались между группами, в то время как у пациенток с СПЯ уровни грелина, после приемов пищи, были значительно ниже по сравнению с группой контроля. Опять-таки, другой важной задачей эксперимента была оценка возможного воздействия КОК на уровень грелина, PYY, CCK и SI у пациенток, принимающих в течение 3 месяцев комбинированные оральные контрацептивы (этинилэстрадиол 30 мкг+дроспиренон 3 мг). Грелин, PYY, CCK и SI не показали существенных изменений после приема КОК в течение 3 месяцев. Можно сделать вывод, что показатели стимулируемых гормонов голода и насыщения у худых пациенток с СПЯ не отличаются от показателей гормонов у здоровых женщин, за исключением более низкой реакции на грелин, стимулируемой приемом пищи. Кратковременное применение низких доз оральных контрацептивов не оказывает влияния на регуляцию аппетита при СПЯ [18].

Подобное исследование было проведено и в Австралии [19]. Цель исследования заключалась в изучении аппетита, гормонов аппетита и неограниченного потребления пищи до и после похудения у женщин с избыточным весом с СПЯ и без него. В эксперименте приняли участие женщины с избыточным весом, в пределах одного возраста и массы тела. В каждой группе было по 14 человек — женщины с СПЯ и здоровые женщины, как группа контроля. Изучались показатели уровней глюкозы, инсулина, грелина, холецистокинина, пептида YY до и после приема пищи, сбалансированной по содержанию белков, жиров и углеводов. Участницы эксперимента соблюдали сбалансированную диету с ограниченным потреблением энергии в течение 8 недель (5185,3 ± 141,6 кДж / сут). Также для оценки неограниченного потребления пищи был предложен комплексный обед «Шведский стол». Между двумя группами не было существенных различий в реакции на аппетит, потреблении «шведского стола» или натощак, а также в постпрандиальном пептиде YY и холецистокинине до или после похудения. Главным выводом изучения стали данные, что уровень концентрации грелина у женщин с диагнозом СПЯ значительно ниже ($p = 0,023$) чем у женщин без СПЯ. Вопрос о нарушении регуляция аппетита при СПЯ остается неясным [18].

Современные подходы к терапии СПЯ

Методы лечения СПЯ разнообразны, поскольку заболевание имеет сложную природу, а также существуют различные клинические проявления, характеризующиеся преобладанием определенных симптомов. Выбор метода лечения зависит от желания пациентки иметь детей.

Для коррекции нарушений обмена веществ, которые возникают при синдроме поликистозных яичников, применяются методы, направленные на изменение образа жизни. Они включают в себя физическую активность и коррекцию питания. Эти меры помогают снизить инсулинорезистентность и восстановить регулярный менструальный цикл [7].

Интерес представляют исследования английской команды ученых под руководством M.O. Weickert [20]. В своей работе они осветили различные эффекты влияния метформина на организм женщин, страдающих СПЯ. Было показано, что лечение женщин с СПЯ метформином снижает уровень глюкозы натощак, нормализует уровень артериального давления и уменьшает сывороточные андрогены. Авторы в своей работе показывают, что дальнейшие эффекты приема метформина у женщин

с СПЯ могут включать прямое воздействие на центральную нервную систему и косвенные эффекты через модификацию синтеза или секреции кишечных гормонов и адипокинов.

В настоящее время опубликовано множество работ [21, 22, 23] об использовании метформина в схемах лечения СПЯ, но этот препарат используют off-label.

Греческие исследователи [21] изучали механизм потери веса у женщин, принимающих препараты метформина. Основным объектом исследования стал один из гормонов гастроинтестинального тракта — пептид YY. Главным его свойством является регуляция аппетита в сторону его снижения за счет замедления желудочной, желчной и панкреатической секреции, а также уменьшения моторной активности желудочно-кишечного тракта, что способствует более длительному нахождению переваренной пищи в кишечнике. Проводилось изучение уровня данного гормона у 20 женщин с СПЯ и избыточным весом на протяжении 6 недель с обязательным контролем антропометрических данных (измерение окружности талии, массы тела, ИМТ), уровня глюкозы крови натощак и менструального цикла. Восемь здоровых женщин без СПЯ с нормальными показателями индекса массы тела составили контрольную группу. Исследователи отмечают, что в обеих группах определялись повышения уровня пептида YY после приема метформина. Кроме того, исследователи сделали вывод, что снижение веса было напрямую связано с длительным лечением метформином и сопровождалось уменьшением индекса массы тела, уровня глюкозы натощак и нормализацией менструального цикла [21].

В статье, опубликованной Legro R.S. с соавт. в журнале эндокринологического сообщества в 2013 году, отмечается, что метформин может быть полезен при нарушениях метаболизма и гликемии, а также при нарушениях менструального цикла. Однако его эффективность при лечении гирсутизма, акне или бесплодия ограничена или отсутствует [22].

Препарат Метформин может быть рекомендован женщинам с сахарным диабетом второго типа, а также в случаях, когда изменение образа жизни не даёт ожидаемого результата при наличии нарушений обмена веществ, снижении чувствительности к глюкозе или инсулину [23].

В процессе подготовки к беременности женщинам, страдающим от ановуляторного бесплодия, обусловленного синдромом поликистозных яичников, Адамян Л.В. с соавт. [4] рекомендуют применение кломифена цитрата или летрозола.

В работе Ashoush S. с соавт. [24] показано, что использование прогестерона в качестве поддержки лютеиновой фазы в циклах стимуляции овуляции демонстрирует высокую результативность. В частности, микродозированный прогестерон также может оказаться эффективным средством.

В последнее время наблюдается повышенный интерес к использованию микронутриентов, таких как инозитол (витамин В8) и хрома пиколинат, в составе комплексного лечения синдрома поликистозных яичников (СПЯ) [5,6]. Инозитол играет важную роль в передаче сигналов инсулина и оказывает специфическое влияние на различные органы и системы организма. Более половины белков, которые зависят от инозитола, участвуют в поддержании работы сердечно-сосудистой, нервной и иммунной систем. Также инозитолзависимые пептиды влияют на функционирование репродуктивной системы. Исследования показали, что использование инозитола помогает снизить риск нарушения обмена веществ у женщин с синдромом поликистозных яичников и избыточным весом. Это вещество положительно влияет на метаболические процессы и гормональную регуляцию функции яичников [6].

В рамках исследования Ashoush S. и др. [25] было установлено, что пиколинат хрома способствует улучшению инсулинорезистентности, нормализации уровня инсулина натощак, а также снижению массы тела у пациентов с синдромом поликистозных яичников. Следует отметить, что вопрос о целесообразности применения пиколината хрома при СПЯ остаётся дискуссионным. Однако, учитывая относительную безопасность и доступность данного препарата, а также его низкую стоимость, можно предположить, что его использование может быть оправдано в качестве вспомогательного средства в комплексной терапии СПКЯ. Тем не менее, для более точного определения эффективности и безопасности пиколината хрома необходимы дальнейшие исследования.

В настоящее время активно разрабатываются и внедряются в повседневную практику биологически активные добавки, содержащие комплекс микронутриентов, которые оказывают комплексное положительное воздействие на синдром поликистозных яичников [26, 27, 28].

Заключение

Таким образом, данные современных исследований показывают изменение представлений о патогенезе развития СПЯ и формирование новых направлений в лечении этого заболевания, имеющих доказательную базу. Перспективным направлением в лечении СПЯ является применение инозитола, который способствует нормализации менструальной и репродуктивной функции, влияя на углеводный и липидный обмен, а также улучшая качество ооцитов и эмбрионов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулаков В.И. Клинические рекомендации. Акушерство и гинекология. Под ред. В.И. Кулакова. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2005.
2. Дедов И.И., Андреева Е.Н., Карпова Е.А. Синдром поликистозных яичников. Практические рекомендации для врачей. М., 2009.
3. Уварова Е.В., Григоренко Ю.П. Актуальные вопросы синдрома поликистозных яичников // Репродуктивное здоровье детей и подростков. — 2007.
4. Адамян Л.В., Андреева Е.Н., Гаспарян С.А., Геворкян М.А., Григорян О.Р., Гринева Е.Р. Синдром поликистозных яичников в репродуктивном возрасте (современные подходы к диагностике и лечению): клинические рекомендации. М.; 2015. Режим доступа: https://zdrav.nso.ru/sites/zdrav. nso.ru/wodby_files/files/document/2016/01/documents/sindrom_polikistoznyh_yaichnikov_v_reproduktivnom_vozraste.pdf
5. Громова О.А., Торшин И.Ю., Лиманова О.А. Перспективы использования миоинозитолов у женщин с поликистозом яичников и инсулинорезистентностью в программах предгравидарной подготовки к экстракорпоральному оплодотворению. Эффективная фармакотерапия. 2013;(5):12–23. Режим доступа: https://umedp.ru/articles/perspektivy_ispolzovaniya_mioinozitola_u_zhenshchin_s_polikistozom_yaichnikov_i_ insulinorezistentnos.html.
6. Вартанян Э.В., Цатурова К.А., Девятова Е.А., Михайлюкова А.С., Левин В.А., Петухова Н.Л. и др. Резервы улучшения качества ооцитов при синдроме поликистозных яичников. Проблемы репродукции. 2017;23(3):50–54. https://doi.org/10.17116/repro201723350-54.
7. Клинические рекомендации по лечению синдрома поликистозных яичников / Российская ассоциация эндокринологов., Российское общество акушеров-гинекологов. — Москва, 2025. — 39 с.
8. Cooper H.E., Spellacy W.N., Prem K.A., Cohen W.D. (1968). Hereditary factors in Stein-Levental syndrome. Obstetrics Gynecology, (7), 371–387.
9. Deeks A., Gibson-Helm M., Teede H. (2010).
10. Randeva H.S., Tan B.K., Weickert M.O., Lois K., Nestler J.E., Sattar N., Lehnert H (2012). Cardiometabolic aspects of the polycystic ovary syndrome. Review of Endocrinology.
11. Vgontzas A.N., Legro R.S., Bixler E.O., Grayev A., Kales A., Chrousos G.P. (2001). Polycystic ovary syndrome is associated with obstructive sleep apnea and daytime sleepiness.
12. Tasali E., Chapotot F., Leproult R., Whitmore H., Ehrmann D.A. (2011). Treatment of obstructive sleep apnea improves cardiometabolic function in young obese women with polycystic ovary syndrome.
13. Vrbíkova J., Cífkova R., Jirkovska A., Lanska V., Platilova H., Zamrazil V., Starka L. (2003). Cardiovascular risk factors in young Czech females with polycystic ovary syndrome.
14. Elting M.W., Korsen T.J., Bezemer P.D., Schoemaker J. (2001).
15. Tremellen K., Pearce K. (2012) Dysbiosis of Gut Microbiota (DOGMA).
16. Zhao L., Guo Y., Qi Y., Yang X., Wen S., Liu Y., Tang L. (2016). Association between Polycystic Ovary Syndrome and Gut Microbiota.
17. Kelley S.T., Skarra D.V., Rivera A.J., Thackray V.G. The Gut Microbiome Is Altered in a Letrozole-Induced Mouse Model of Polycystic Ovary Syndrome. PLoS One. 2016 Jan 5;11(1): e0146509. doi: 10.1371/journal.pone.0146509. PMID: 26731268; PMCID: PMC4701222.
18. Arusoglu G., Koksal G., Cinar N., Tapan S., Aksoy D.Y., Yildiz B.O. (2013). Basal and meal-stimulated ghrelin, PYY, CCK levels and satiety in lean women with polycystic ovary syndrome: effect of low-dose oral contraceptive. The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism, (11), 82.
19. Moran L.J., Noakes M., Clifton P.M., Wittert G.A., Le Roux C.W., Ghatei M.A., Bloom S.R., Norman R.J. (2007). Postprandial ghrelin, cholecystokinin, peptide Y.Y., and appetite before and after weight loss in overweight women with and without polycystic ovary syndrome. The American Journal of Clinical Nutrition, 86 (6), 1603-1610.
20. Weickert M.O., Hodges P., Tan B.K., Randeva H.S. (2012). Neuroendocrine and endocrine dysfunction in the hyperinsulinemic PCOS patient: the role of metformin. Minerva Endocrinologica, 37 (1), 25–40.
21. Tsilchorozidou T., Batterham R.L., Conway G.S. (2008). Metformin increases fasting plasma peptide tyrosine tyrosine (PYY) in women with polycystic ovarian syndrome (PCOS). Clinical Endocrinology, 69 (6), 936–942.
22. Legro R.S., Arslanian S.A., Ehrmann D.A., Hoeger K.M., Murad M.H., Pasquali R., Welt C.K. Diagnosis, and treatment of polycystic ovary syndrome: an Endocrine Society clinical practice guideline. J Clin Endocrinol Metab. 2013;98(12):4565–4592. https://doi.org/10.1210/jc.2013-2350.
23. Aversa A., La Vignera S., Rago R., Gambineri A., Nappi R.E., Calogero A.E., Ferlin A. Fundamental Concepts and Novel Aspects of Polycystic Ovarian Syndrome: Expert Consensus Resolutions. Front Endocrinol (Lausanne). 2020; 11:516. https://doi.org/10.3389/fendo.2020.00516.
24. Hubayter Z.R., Muasher S.J. Luteal supplementation in in vitro fertilization: more questions than answers. Fertil Steril. 2008;89(4):749–758. https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2008.02.095
25. Ashoush S., Abou-Gamrah A., Bayoumy H., Othman N. Chromium picolinate reduces insulin resistance in polycystic ovary syndrome: Randomized controlled trial. J Obstet Gynaecol Res. 2016;42(3):279–285. https://doi. org/10.1111/jog.12907.
26. Зайдиева З.С., Уруймагова А.Т. Синдром поликистозных яичников: современные представления патогенеза, диагностики и лечения. Медицинский совет. 2021;(13):102–111. https://doi.org/10.21518/2079-701X-2021-13-102-111.
27. Benvenga S., Nordio M., Laganà A.S. and Unfer V. (2021) The Role of Inositol in Thyroid Physiology and in Subclinical Hypothyroidism Management. Front. Endocrinol. 12:662582. doi: 10.3389/fendo.2021.662582.
28. Fazelian S., Rouhani M.H., Bank S.S., Amani R. Chromium supplementation and polycystic ovary syndrome: A systematic review and meta-analysis. J Trace Elem Med Biol. 2017 Jul; 42:92–96. doi: 10.1016/j.jtemb.2017.04.008. Epub 2017 Apr 21. PMID: 28595797.

© Мамонтова Лейла Николаевна (leyla.mamontova.96@inbox.ru); Коротких Ирина Николаевна (korotkikh_1950@mail.ru);
Ходасевич Эллина Валерьевна (elina.hodasevich@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.31

РЕЗУЛЬТАТЫ ХИРУРГИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ С МНОГОУРОВНЕВЫМ ДИСКОЗОМ ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДИК МИКРОХИРУРГИЧЕСКОЙ ДЕКОМПРЕССИИ БЕЗ СТАБИЛИЗАЦИИ, МИКРОХИРУРГИЧЕСКОЙ ДЕКОМПРЕССИИ ДОПОЛНЕННОЙ УСТАНОВКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ И РИГИДНОЙ ФИКСАЦИЕЙ

RESULTS OF SURGICAL TREATMENT OF PATIENTS WITH MULTILEVEL LUMBAR SPINE DISCOSIS USING MICROSURGICAL DECOMPRESSION TECHNIQUES WITHOUT STABILIZATION, MICROSURGICAL DECOMPRESSION SUPPLEMENTED BY DYNAMIC AND RIGID FIXATION

M. Ryabets
A. Ivanenko

Summary. This article examines the surgical treatment experience of patients with multilevel lumbar discosis using microsurgical decompression techniques without stabilization and microsurgical decompression supplemented by dynamic and rigid fixation. The author substantiates the relevance and significance of the topic of studying the surgical treatment of patients with multilevel lumbar discosis, particularly in older patients, who often have discosis combined with spinal stenosis, spondyloarthrosis, and spondylolisthesis, which undoubtedly complicates the selection of optimal surgical tactics. The purpose of this study is to conduct a comparative analysis of the results of surgical treatment in patients with multilevel lumbar discosis using microsurgical decompression techniques without stabilization and microsurgical decompression supplemented by dynamic and rigid fixation. The author of the article conducted a prospective, controlled study involving 109 patients operated on in 2023–2024. Efficacy was assessed using the visual analogue scale (VAS), the Oswestry Disability Index (ODI), the Prolo scale, and radiographic parameters (intervertebral disc height, linear translation). The study found that all groups experienced a significant reduction in pain and an improvement in functional status after 6 and 12 months of follow-up. It is concluded that microsurgical decompression without fixation and with dynamic stabilization was accompanied by a shorter operative time and blood loss compared to rigid fixation. The complication rate was 4.34 %. The author concludes that microsurgical decompression without stabilization with stable segments and facet joint arthrodesis using an osteoinductor is an effective and less traumatic treatment method.

Keywords: discosis, hernias, multilevel lumbar discosis, multilevel hernias, surgical treatment, magnetic resonance imaging, microsurgical discectomy, rigid fixation, dynamic fixation.

Рябец Марина Владимировна
Российский научно-исследовательский нейрохирургический институт им. профессора А.Л. Поленова (филиал), Федеральное государственное бюджетное учреждение Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова, г. Санкт-Петербург
ktnj.91@mail.ru
Иваненко Андрей Валентинович
Российский научно-исследовательский нейрохирургический институт им. профессора А.Л. Поленова (филиал), Федеральное государственное бюджетное учреждение Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Настоящая статья посвящена исследованию опыта хирургического лечения пациентов с многоуровневым дискозом поясничного отдела позвоночника при использовании методик микрохирургической декомпрессии без стабилизации, микрохирургической декомпрессии дополненной установкой динамической и ригидной фиксацией. Автором обосновывается актуальность и значимость темы исследования хирургического лечения пациентов с многоуровневым дискозом поясничного отдела позвоночника, в особенности, у пациентов старшей возрастной группы, у которых, нередко дискозы сочетаются со стенозом позвоночного канала, спондилоартрозом и спондилолистезом, что безусловно затрудняет выбор оптимальной хирургической тактики. Цель настоящего исследования, провести сравнительный анализ результатов хирургического лечения у пациентов с многоуровневыми дискозами поясничного отдела позвоночника, при использовании методик микрохирургической декомпрессии без стабилизации, микрохирургической декомпрессии дополненной установкой динамической и ригидной фиксацией. Автором статьи проведено проспективное, контролируемое исследование с участием 109 пациентов, оперированных в 2023–2024 гг. Оценка эффективности проводилась с использованием визуально-аналоговой шкалы боли (VAS), индекса Освестри (ODI), шкалы Prolo и рентгенологических параметров (высота межпозвонкового диска, линейная трансляция). В результате исследования, установлено, что во всех группах отмечается достоверное снижение болевого синдрома и улучшение функционального статуса через 6 и 12 месяцев наблюдения. Заключается о том, что микрохирургическая декомпрессия без фиксации и с динамиче-

ской стабилизацией сопровождалась меньшей продолжительностью операции и кровопотерей по сравнению с ригидной фиксацией. В свою очередь, частота осложнений составила 4,34 %. Автор приходит к выводу, что микрохирургическая декомпрессия без стабилизации при стабильных сегментах и выполнении артродеза фасеточных суставов остеоиндуктором, является эффективным и менее травматичным методом лечения.

Ключевые слова: дискоз, грыжи, многоуровневый поясничный дискоз, многоуровневые грыжи, хирургическое лечение, магнитно-резонансная томография, микрохирургическая дискэктомия, ригидная фиксация, динамическая фиксация.

Введение

Дегенеративно-дистрофические заболевания поясничного отдела позвоночника (ДДЗП), являются одной из ведущих причин хронического болевого синдрома и временной утраты трудоспособности, у лиц старше 55 лет, что также приводит к снижению качества жизни как в мире, так и в Российской Федерации. По оценкам экспертов, на протяжении года, хотя бы один эпизод ДДЗП испытывают 22–65 % взрослого населения, а в течение жизни, 80–84 % пациентов, как минимум единожды обращаются за медицинской помощью с жалобами на боль спине [1-2].

С возрастом происходит прогрессирующая дегидратация межпозвонковых дисков, снижение их высоты, формирование протрузий и грыж, гипертрофия желтой связки и дугоотростчатых суставов, что приводит к формированию центрального и латерального стеноза позвоночного канала. Чаще всего, у пациентов среднего возраста и старшей возрастной группы, многоуровневые грыжи межпозвонковых дисков, как правило, сочетаются со спондилоартрозом и спондилолистезом, что существенно усложняет выбор хирургической тактики.

Современные хирургические подходы включают изолированную микрохирургическую декомпрессию ПК, декомпрессию с динамической стабилизацией и декомпрессию с ригидной фиксацией. Ригидная фиксация обеспечивает надежную стабилизацию позвоночно-двигательного сегмента, восстановление высоты межпозвонкового пространства и устранение патологической трансляции, однако сопровождается большей травматичностью, увеличением кровопотери и продолжительности операции, а также риском развития болезни смежного сегмента вследствие перераспределения нагрузок [3]. Динамическая фиксация позволяет частично сохранить физиологическую подвижность сегмента и потенциально снизить нагрузку на смежные уровни, однако имеет ограниченные показания. Микрохирургическая декомпрессия без стабилизации, характеризуется минимальной инвазивностью и быстрым восстановлением, но требует строгого отбора пациентов при отсутствии признаков нестабильности.

В условиях преобладания пациентов среднего возраста и пациентов из старшей возрастной группы, с многоуровневыми дегенеративными изменениями, особое значение приобретает дифференцированный подход к выбору метода лечения.

Материалы и методы исследования

Методологическая основа исследования базируется на анализе современных данных, представленных в научной литературе по отечественной и зарубежной нейрохирургии. В рамках исследования был применен комплексный подход обследования пациентов. В проспективном исследовании приняли участие 109 пациентов, проходивших хирургическое лечение в период с 2023–2024 гг., на базе 1 нейрохирургического отделения КГАУЗ «Владивостокской клинической больницы №2».

В рамках настоящего исследовании были использованы три вида хирургического лечения: микрохирургическая декомпрессия поясничного отдела позвоночника без стабилизирующих систем, микрохирургическая декомпрессия позвоночного канала, дополненная установкой динамической фиксацией и микрохирургическая декомпрессия позвоночного канала, дополненная установкой ригидной фиксацией.

Пациенты были распределены на три подгруппы в зависимости от выполненного хирургического вмешательства: подгруппа А — микрохирургическая декомпрессия без стабилизирующих систем, подгруппа Б — декомпрессия с динамической фиксацией, подгруппа В — декомпрессия с ригидной фиксацией (Таблица 1).

Всем пациентам перед операцией выполнялись МРТ поясничного отдела позвоночника, рентгенография в двух проекциях и с функциональными пробами, электронейромиография [4–6]. Компьютерная томография проводилась при планировании установки транспеди-

Таблица 1.
Пациенты в зависимости от выполненного хирургического вмешательства

Группа	Женщины (%)	Мужчины (%)
подгруппа А	36 (33.0 %)	31 (28.4 %)
подгруппа Б	2 (1.8 %)	5 (4.6 %)
подгруппа В	24 (22.0 %)	11 (10.1 %)

кулярной металлоконструкции. При наличии клинических симптомов и отсутствии выраженных изменений на стандартной МРТ выполнялась функциональная МРТ в положении максимального сгибания и разгибания позвоночного столба с целью выявления изменения ширины позвоночного канала, влияния межпозвонковых грыж и дегенеративных изменений на степень сужения позвоночного канала.

В подгруппу А вошло 67 (100 %) пациента. Выбором метода лечения стал интерламинарный доступ у 53 (79,1 %) пациентов, среди них 28 (41.7 %) мужчин и 25 (37,3 %) женщин. Гемиляминотомия у 14 (20,9 %) пациентов: мужчин — 5 (7.5 %) и женщин — 9 (13,4 %).

Критериями выбора микрохирургической декомпрессии без фиксации, являлись компрессия корешковых структур грыжей диска, сочетание грыжи диска с гипертрофией желтой связки и фасеточных суставов при отсутствии нестабильности, а также спондилолистез I степени. При резекции медиальной фасетки выполнялся артродез фасеточных суставов с использованием остеоиндуктора.

При билатеральной симптоматике использовалась декомпрессия позвоночного канала в дополнении с техникой <Over the top>. Контрлатеральной декомпрессии подверглось 8 (11,9 %) пациентов, среди них— 5 (7,5 %) женщин и 3 (4,5 %) мужчин.

В частности, такой односторонний доступ по сравнению с двусторонним позволяет выполнить двустороннюю декомпрессию быстрее, с меньшим объемом кровопотери, а самое главное, не требует скелетирования паравертебральных мышц на противоположной стороне, сохраняет наружные отделы желтой связки, позволяя сохранить сегмент более стабильным и послеоперационный восстановительный период более быстрее.

При резекции медиальной фасетки во время операции, был использован остеоиндуктор для того, чтобы предотвратить нестабильность в оперированном сегменте. Артродез фасеточных суставов выполнялся у 43 (64.1 %) пациента. Среди них 25 (37,3 %) женщин и 18 (26,8 %) мужчин.

Преимущество этого метода заключается в том, что создается прочный костный блок между верхним и нижним суставными отростками соседних позвонков за счет чего происходит стабилизация сустава и предотвращение его дальнейшего разрушения. Данный метод несет за собой минимальную кровопотерю, практически отсутствует развитие таких осложнений, как гематома и нагноение в области послеоперационной раны, в связи с менее обширным доступом.

Динамическая фиксация подгруппа Б: всего оперативному лечению подверглись 7 (100 %) пациента, среди них 2 (28,6 %) женщин и 5 (71,4 %) мужчин. Использовались такие динамические импланты как: Урафлекс, Остео-Мед. Показания: грыжи межпозвонкового диска в сочетании с латеральным и фораминальным стенозом, где требуется фасетэктомия вместе с фораминотомией.

Подгруппа В — декомпрессия ПК с ригидной фиксацией. Всего оперативному лечению подверглись 35 (100 %) пациентов. Среди них мужчин 8 (22,8 %) и женщин 9 (25,7 %) с ТПФ без межтелового кейджа. ТПФ с межтеловым кейджем выполнялась 4 (11,4 %) мужчинам и 14 (39,9 %) женщинам. Использовалась транспедикулярная система производителей: Эскулап, Медтроник, МединУрал, Конмет и межтеловой кейдж производителей: Эндокарбон, Остеомед. Основные показания для декомпрессии ПК с жесткой (ригидной) фиксацией: нестабильность ПДС, вынужденная резекция одной и более опорных колон ПДС при операции, рецидивы грыжи межпозвонкового диска (более двух раз). Показаниями к установке межтелового спондилодеза служили нестабильные спондилолистезы (рисунок 1).

Оценка результатов проводилась до операции, через 6 и 12 месяцев после вмешательства с использованием шкалы VAS, индекса Освестри (ODI), шкалы Prolo и анализа рентгенологических параметров.

Результаты и обсуждение

Во всех подгруппах отмечено значимое снижение болевого синдрома в поясничной области и в ноге.

В подгруппе А среднее значение боли по VAS в пояснице снизилось с 8,3 до 2 через 12 месяцев и в ноге с 8,3 до 0,9. Индекс ODI — с 52,8 % до 4,6 %. Средняя продолжительность операции составила 85 минут, средняя кровопотеря — 96 мл, длительность госпитализации — 6±2 дня. Высота межпозвонкового диска без выполнения артродеза фасеточных суставов остеоиндуктором составила 11.96 мм, через 12 мес. после операции 11.15 мм, разница составила –6,75 %. Пациентам, которым выполнялся, артродез фасеточного сустава до операции высота межпозвонкового диска составляла 10.44 мм, через 12 месяцев после оперативного лечения 10.04 мм, раз-

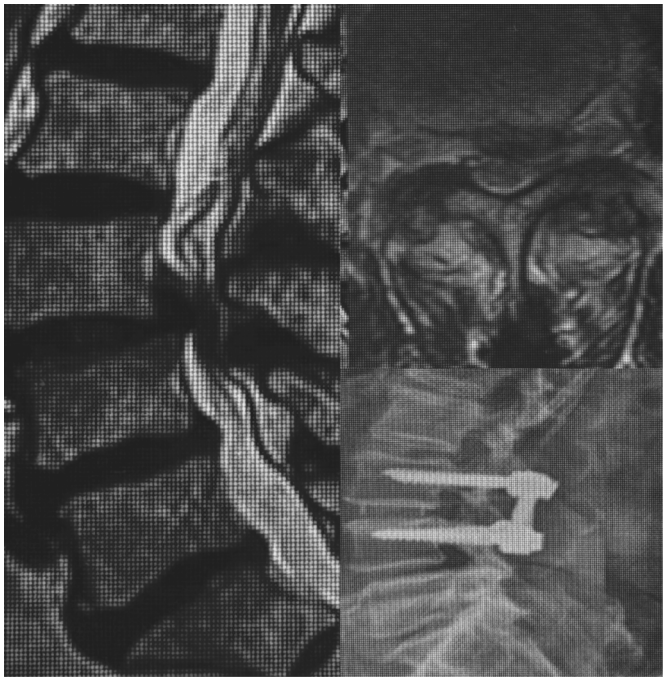


Рис. 1. Оперативное вмешательство при множественном дискозе поясничного отдела позвоночника. Проведение транспедикулярной фиксации на уровне L2-L3 с межтеловым спондилодезом у пациентки 65 лет. На МРТ (аксиальный и сагиттальный срез): левосторонняя парамедианная грыжа межпозвонкового диска в сегменте L3-L4 до 9 мм. Антеспондилолистез L3 позвонка. Экструзии дисков на уровне L4-L5, L5-S1

Таблица 2.

Общие сведения о пациентах исследуемых подгрупп

Критерии	Подгруппа А (n=67)	Подгруппа Б (n=7)	Подгруппа В (n=35)
Возраст (лет)	55±2	56±2	56±2
Пол (муж/ жен)	34/33	2/5	23/12
ВАШ поясничный отдел до операции	9	8,6	8,9
ВАШ в ноге до операции	8,3	8,6	8
ODI до операции, %	52,8	54,7	54,7
Линейная трансляция до операции, мм	1,96	–	7,5
Высота межпозвонкового диска до операции, мм	11,96	8,99	7,82

ница составила –3,85 %. Выполнение артродеза фасеточных суставов позволило замедлить снижение высоты межпозвонкового диска по сравнению с пациентами без артродеза.

В подгруппе Б среднее значение боли по VAS в пояснице снизилось с 8,9 до 2,3 через 12 месяцев и в ноге с 8,6 до 1, средняя продолжительность операции составила 105,7 минуты, кровопотеря — 104,3 мл. Индекс ODI снизился с 54,7 % до 5,3 % через 12 месяцев. Отмечено увеличение задней высоты межпозвонкового диска на 13,82 %, что свидетельствует о стабилизирующем эффекте динамической системы.

В подгруппе В средняя продолжительность операции достигала 167,7 минуты, кровопотеря — 313,4 мл, длительность госпитализации — 10 дней. Несмотря на более выраженную травматичность, отмечено значительное уменьшение линейной трансляции. До операции линейная трансляция составила 7.5 мм, после оперативного лечения 1,1 мм и отмечено увеличение задней высоты межпозвонкового диска на 99,8 %. Однако показатели боли и ODI через 12 месяцев оставались несколько выше по сравнению с группами А и Б, что связано с большей исходной тяжестью патологии и объемом вмешательства [7].

Таким образом, сопоставление результатов показало, что микрохирургическая декомпрессия без фиксации и с динамической стабилизацией характеризуется меньшей травматичностью при сопоставимой клинической эффективности. Общая частота осложнений составила 4,34 %. В подгруппе А отмечен один случай рецидива грыжи диска, в подгруппе В — один случай миграции винта. В подгруппе Б осложнений не зарегистрировано.

Проводился анализ исходов хирургического лечения пациентов с многоуровневым дискозом поясничного отдела позвоночника с помощью шкалы Prolo. Через 12 месяцев в подгруппе «А» и «Б» исход «удовлетворительно» — отсутствует, в подгруппе «В» исход «удовлетворительно» — 1 (2.8 %) пациент.

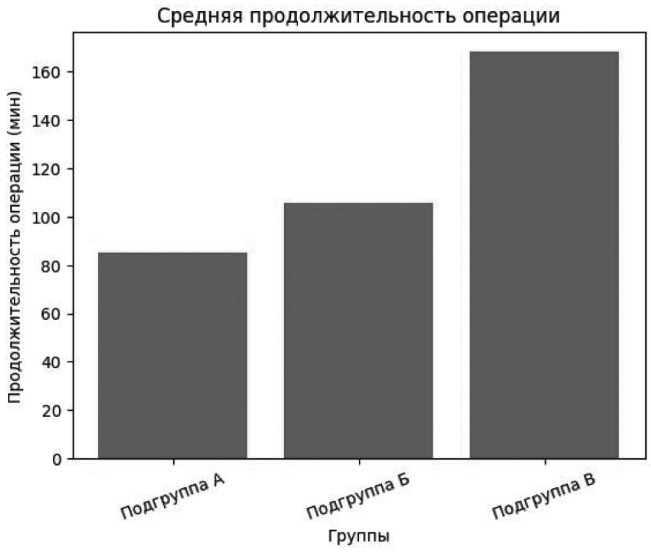


Рис. 2. Средняя продолжительность операции в подгруппах

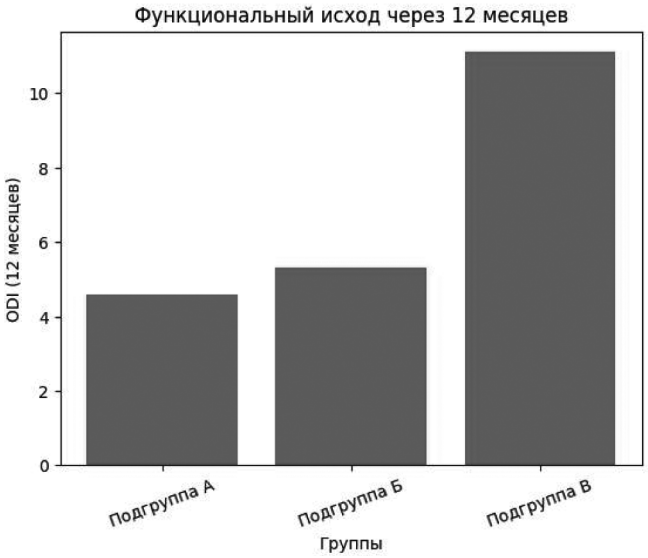


Рис. 3. Функциональный исход через 12 месяцев

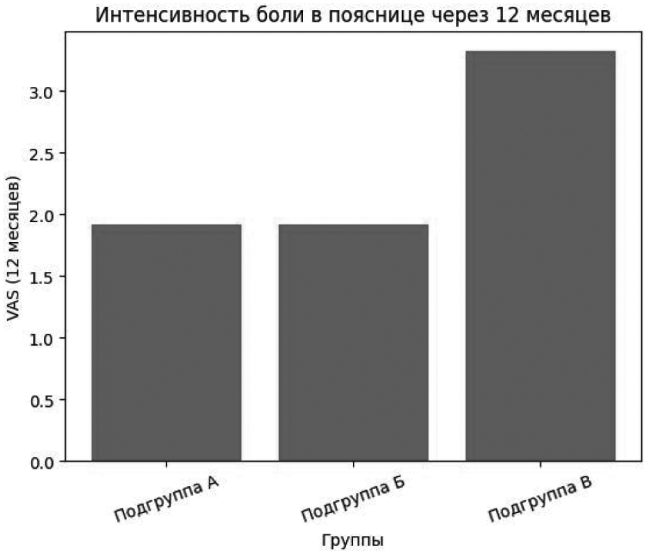


Рис. 4. Интенсивность боли

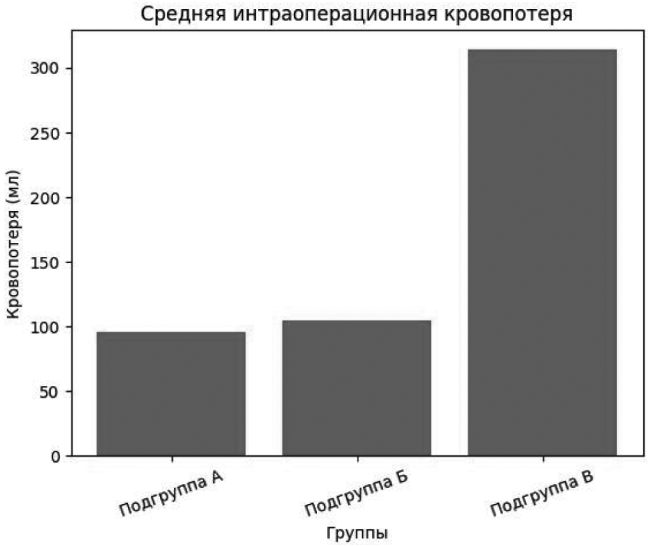


Рис. 5. Средняя интраоперационная кровопотеря

Безусловно, анализ показал, что применение ригидной фиксации сопровождается увеличением длительности операции и объема кровопотери в 2–3 раза по сравнению с декомпрессивными вмешательствами без фиксации или с динамической стабилизацией. При этом клиническая эффективность во всех подгруппах сопоставима.

Таким образом, многоуровневый дискоз поясничного отдела позвоночника представляет собой сложную клиническую и хирургическую проблему, требующую индивидуального подхода к выбору объема хирургического вмешательства [8]. Точное определение клинически значимых уровней поражения и оценка стабильности сегмента позвоночника, остается ключевым этапом планирования лечения. В обязательном порядке, дополнительно перед операцией, необходимо проведение спондилограмм с функциональными пробами и функционального МРТ (на предмет нестабильности ПДС), ЭНМГ для определения пораженного корешка.

В спинальной хирургии существуют различные варианты лечения многоуровневого дискоза поясничного отдела позвоночника и все эти методы эффективны, так как, многие из них соответствуют требованиям, направленным на декомпрессию нервно-сосудистых образований и стабилизацию пораженного сегмента. Далее, в зависимости от класса хирургического вмешательства, операция может быть направлена на стабилизацию сегмента с сохранением его подвижности, либо стабилизацию сегмента, с выключением его двигательной функции. Современные микрохирургические и малоинвазивные технологии позволяют достичь высоких функциональных результатов, при условии адекватной декомпрессии и разумного использования стабилизирующих конструкций.

Микрохирургическая декомпрессия позвоночного канала при стабильных позвоночно-двигательных сегментах, является эффективным и менее травматичным методом лечения многоуровневого дискоза поясничного отдела позвоночника. Но после микродискэктомии задняя высота диска снижается, что в дальнейшем может привезти к нестабильности ПДС. Анализ данных показателей, позволил разработать метод хирургического лечения для дальнейшего предотвращения развития нестабильности в оперированном ПДС. Там, где требуется резекция фасеточного сустава во время операции, выполняется артродез в зоне резекции ФС остеоиндуктором.

Декомпрессия с динамической фиксацией, показана при необходимости фасетэктомии с фораминотомией и отсутствии выраженной нестабильности, обеспечивая удовлетворительные клинико-рентгенологические результаты.

Транспедикулярная фиксация должна применяться строго по показаниям при нестабильности ПДС, вынужденной резекции одной и более опорных колон ПДС при операции, рецидиве грыжи межпозвонкового диска (более двух раз), ввиду большей интраоперационной травматичности и риска осложнений, таких как, болезнь смежного сегмента, перелом и миграция металлоконструкции, гематома в области послеоперационной ране.

Дифференцированный подход к выбору хирургической тактики, позволяет достичь выраженного клинического улучшения и минимизировать риск послеоперационных осложнений у пациентов с многоуровневыми дегенеративными поражениями поясничного отдела позвоночника.

Полагаем, что дальнейшие исследования, должны быть направлены на разработку критериев прогнозирования исходов и оптимизацию алгоритмов хирургического лечения пациентов, с многоуровневыми дегенеративными поражениями поясничного отдела позвоночника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крутько А.В., Байков Е.С., Коновалов Н.А., Назаренко А.Г. Сегментарная нестабильность позвоночника: нерешенные вопросы // Хирургия позвоночника. 2017. Т. 14, № 3. С. 74–83.
2. Рябец М.В., Иваненко А.В. Тактика хирургического лечения многоуровневого дискоза поясничного отдела позвоночника // Российский нейрохирургический журнал им. проф. А.Л. Поленова. 2024. Т. XVI, № 4. С. 71–80.
3. Олизарович М.В., Олизарович Е.М. Секвестрация многоуровневых грыж поясничных межпозвонковых дисков. // Проблемы здоровья и экологии. 2016. № 2 (48). С. 42–48.
4. Воронина Д.Д. Реабилитация пациентов после оперативного лечения грыж межпозвонковых дисков пояснично-крестцового отдела позвоночника — роль общей магнитотерапии / Д.Д. Воронина // Журнал экспериментальной, клинической и профилактической медицины. — 2023. — Т. 110, № 3. — С. 20–40.
5. Воронина Д.Д. Новый подход к реабилитации пациентов после оперативного лечения грыж межпозвонковых дисков [Текст] / А.Г. Куликов, Д.Д. Воронина, И.В. Луппова, С.Г. Абрамович // Медико-социальная экспертиза и реабилитация (импакт-фактор 0,256). — 2016. — Т.19. — № 3. — С. 125–128.
6. Воронина Д.Д. Современный подход к реабилитации пациентов после хирургического лечения грыж межпозвонковых дисков пояснично-крестцового отдела позвоночника [Текст] / Д.Д. Воронина, А.Г. Куликов, И.В. Луппова // Материалы VIII Международного Конгресса «Нейрореабилитация — 2016» — Москва, 8-10 июня 2016. — С.86–88.
7. Воронина Д.Д. Дегенеративно-дистрофические поражения позвоночника: новые подходы к реабилитации пациентов [Текст] / Д.Д. Воронина, Н.А. Кочеткова // Материалы III Международного конгресса «Физиотерапия. Лечебная физкультура. Реабилитация. Спортивная медицина» — Москва, 23–24 октября 2017. — С.33.
8. Спондилодез при лечении пациентов с рецидивами грыж межпозвонковых дисков на поясничном уровне / Е.Б. Нагорный, А.А. Стрельба, А.В. Теремшонок, К.А. Надулич // Медицинская помощь при травмах: новое в организации и технологиях. Осложнения и неблагоприятные последствия травм. Инновационные подходы в организации медицинской помощи и лечении пострадавших: Сборник тезисов IX Национального конгресса с международным участием, Санкт-Петербург, 01–02 марта 2024 года. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургская общественная организация «Человек и его здоровье», 2024. — С. 94–95.

© Рябец Марина Владимировна (ktnj.91@mail.ru); Иваненко Андрей Валентинович

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.35

ПОЧЕЧНАЯ ФУНКЦИЯ ПОСЛЕ ЭКСТРАКОРПОРАЛЬНОЙ РЕЗЕКЦИИ ПОЧКИ У ПАЦИЕНТОВ СО ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫМИ ОПУХОЛЯМИ

RENAL FUNCTION AFTER EXTRACORPOREAL RESECTION OF THE KIDNEY IN PATIENTS WITH MALIGNANT TUMORS

O. Sinitsyna
D. Perlin
M. Volkova
Ya. Gridneva
V. Matveev

Summary. Extracorporeal kidney resection (ECR) is a rarely used, technically complex, long–term multi-stage operation used in several urological diseases, including malignant tumors of the renal parenchyma. The functional results of ECP have not been studied in practice.

Objective: to evaluate the functional results of ECR performed in patients with renal cell carcinoma (RCC).

Methods: the functional results of 27 ECPs in 25 patients with RCC were analyzed. The median age is 50.1 (31–61) years. Men dominated (19 (76.0 %)). Tumors of the only functioning kidney were diagnosed in 16 (64.0 %) cases, and bilateral kidney tumors in 9 (36.0 %) cases. The median Charleson comorbidity index is 4 (2–8). All 25 patients underwent 27 ECPs (sequentially on both sides — in 2 (8.0 %) cases). Seven (28.0 %) patients underwent a contralateral radical nephrectomy in the second stage, on average 4.5 (3–6) months after ECD.

Results: Before surgery, the median glomerular filtration rate (GFR) was 66 (40–96) ml/min/1.73 m^2, and 8 (32.0 %) patients had stage ≥III chronic kidney disease. In the early postoperative period, acute kidney injury (AKI) was reported in 16 (64.0 %) patients, classified in RIFLE categories F and L, and required renal replacement therapy in 11 (44.0 %) patients. All patients have registered AKI clearance. In the late postoperative period, with a median follow-up of 65 (2–132) For several months, the median GFR reached 55 (7–93) ml/min/1.73 m^2. A further decrease in GFR was noted in 6 (24.0 %), a clinically significant increase in the stage of CKD to stages IIIb–V in 5 (20.0 %) cases, and 1 (4.0 %) patient needed supportive dialysis.

Conclusion: An acceptable alternative to radical nephrectomy for patients with cancer of the only functioning kidney or bilateral PCR who cannot undergo in situ kidney resection is ECPR, which allows for long-term preservation of renal function.

Keywords: kidney cancer, extracorporeal kidney resection, renal function.

Синицына Огульшат Ремезановна
Заведующий онкоурологическим отделением №1 ГБУЗ, Городская клиническая больница им. С.С. Юдина ДЗМ
ogulshat@bk.ru

Перлин Дмитрий Владиславович
Доктор медицинских наук, профессор, ФГБОУ ВО Волгоградский государственный медицинский университет;
Главный врач, ГБУЗ Волгоградский областной уронефрологический центр
dvperlin@mail.ru

Волкова Мария Игоревна
Доктор медицинских наук, профессор, ФГБОУ ДПО Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования;
Врач онкологического отделения № 8 ГБУЗ, Городская клиническая больница им. С.С. Юдина ДЗМ;
Ученый секретарь, Межрегиональная общественная организация «Общество онкоурологов»
mivolkova@rambler.ru

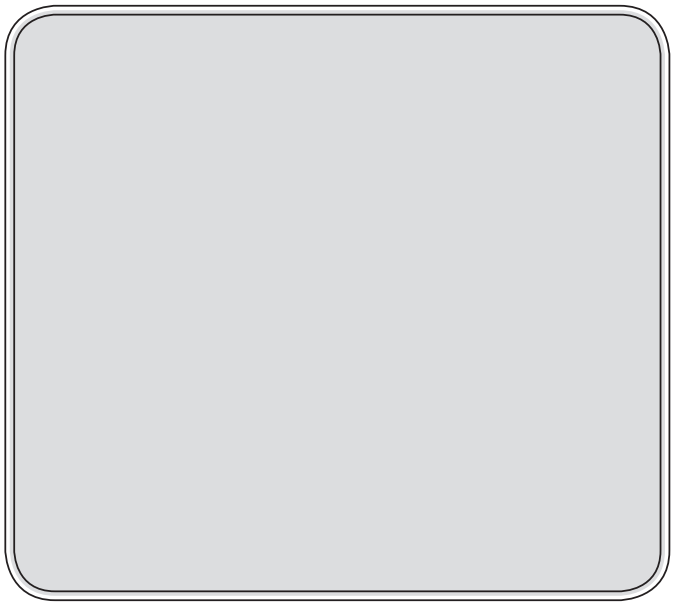
Гриднева Яна Владимировна
Кандидат медицинских наук, врач-онколог, заведующий онкологического отделения № 8 ГБУЗ, Городская клиническая больница им. С.С. Юдина ДЗМ;
Доцент, ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова
gridnevyana@mail.ru

Матвеев Всеволод Борисович
Академик РАН, доктор медицинских наук, профессор, заведующий отделением онкоурологии ФГБУ НМИЦ им. Н.Н. Блохина
vsevolodmatveev@mail.ru

Аннотация. Экстракорпоральная резекция почки (ЭКРП) — редко используемая, технически сложная, длительная многоэтапная операция, применяемая при ряде урологических заболеваний, включая злокачественные опухоли почечной паренхимы. Функциональные результаты ЭКРП практически не изучены.

Цель: оценить функциональные результаты ЭКРП, выполненной пациентам с почечно-клеточным раком (ПКР).

Методы. Проанализированы функциональные результаты 27 ЭКРП у 25 больных ПКР. Медиана возраста — 50,1 (31–61) года. Доминировали мужчины (19 (76,0 %)). В 16 (64,0 %) случаях диагностированы опухоли единственной функционирующей почки, в 9 (36,0 %) — билатеральные опухоли почек. Медиана индекса коморбидности Чарльсона — 4 (2–8). Всем 25 пациентам произведено 27 ЭКРП (последовательно с двух сторон — в 2 (8,0 %) наблюдениях). Семи (28,0 %) больным вторым этапом выполнена контралатеральная радикальная нефрэктомия, в среднем, через 4,5 (3–6) месяца после ЭКРП.



Результаты. До операции медиана скорости клубочковой фильтрации (СКФ) соответствовала 66 (40–96) мл/мин/1,73 м^2, исходная хроническая болезнь почек ≥III стадии выявлена у 8 (32,0 %) больных. В раннем послеоперационном периоде острое повреждение почек (ОПП) зарегистрировано у 16 (64,0 %) пациентов, классифицировано в категории F, L по RIFLE и потребовало почечно-заместительной терапии у 11 (44,0 %) больных. У всех пациентов зарегистрировано разрешение ОПП. В позднем послеоперационном периоде при медиане наблюдения 65 (2–132) месяцев медиана СКФ достигла 55 (7–93) мл/мин/1,73 м^2. Дальнейшее снижение СКФ отмечено в 6 (24,0 %), клинически значимое повышение стадии ХБП до IIIb–V стадий — в 5 (20,0 %) случаях, поддерживающий диализ понадобился 1 (4,0 %) пациенту.

Заключение. Допустимой альтернативой радикальной нефрэктомии, больным раком единственной функционирующей почки или двухсторонним ПКР, которым невозможно выполнить резекцию почки in situ, является ЭКПР, позволяющая длительно сохранять почечную функцию.

Ключевые слова: рак почки, экстракорпоральная резекция почки, почечная функция.

Введение

Рак почки является распространенной злокачественной опухолью. Несмотря на несомненный прогресс в области лекарственной противоопухолевой терапии, наиболее эффективным методом лечения данного заболевания у пациентов, не имеющих метастазов, остается хирургический. Объем оперативного вмешательства может включать резекцию почки или радикальную нефрэктомию. Органоуносящее лечение резервируется для пациентов с клинически локализованными опухолями, при которых технически невозможно выполнение органосохраняющих операций, а также для больных местно-распространенным почечно-клеточным раком (ПКР). Первичной целью хирургического вмешательства любого объема является эрадикация злокачественной опухоли, ключевой вторичной целью — сохранение почечной функции [1].

У ряда пациентов с мультифокальными, центрально расположенными, массивными опухолями единственной функционирующей почки, а также при двухстороннем ПКР выполнение традиционного органосохраняющего вмешательства технически невозможно. Стандартным подходом к лечению этой категории больных является радикальная нефрэктомия. В качестве альтернативы у тщательно отобранных пациентов может применяться резекция удаленной почки ex vivo с применением консервирующих растворов в условиях гипотермии и ее последующая аутотрансплантация [2,3,4].

Экстракорпоральная резекция почки (ЭКРП) — технически сложное, редко выполняемое вмешательство. К настоящему времени опубликовано около 140 наблюдений за пациентами, перенесшими ЭКРП [1–8]. Данные о функциональных результатах ЭКРП практически отсутствуют.

Критерии включения: выполнение ЭКРП по поводу злокачественной опухоли, вовлекающей почечную паренхиму, наличие медицинских данных о концентрации сывороточного креатинина, калия, объеме суточного диуреза в течение 28 суток после ЭКРП, а также о концентрации сывороточного креатинина, оценивавшейся не реже 1 раза в 12 месяцев при последующем наблюдении.

Критерии исключения: утрата почечного аутотрансплантата по любой причине до выписки из стационара.

Условия проведения

Исследование выполнено в НИИ Клинической онкологии ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» МЗ РФ и ГБУЗ «Волгоградский областной уронефрологический центр».

Продолжительность исследования

Исследование проводилось в течение 19 лет (в период с мая 2004 по сентябрь 2023 года).

Литературный обзор

Описание медицинского вмешательства

В дооперационном периоде производилась оценка: технической возможности выполнения резекции почки ex corpora, рисков утраты почечной функции и операционно-анестезиологического риска.

ЭКРП выполнялась в условиях комбинированной анестезии и включала три этапа: 1) удаление пораженной почки с опухолью открытым или лапароскопическим доступом; 2) резекцию и реконструкцию сосудов, собирательной системы с последующим ушиванием паренхимы резецированной почки ex vivo в условиях гипотермии с использованием кардиоплегического препарата в форме раствора для заполнения кровеносных сосудов удаленного органа; 3) гетеротопическую аутотрансплантацию резецированной почки.

В периоперационном периоде проводилась терапия, направленная на поддержание почечной функции (форсированный диурез до удаления почки, поддержание адекватного перфузионного давления, контролируемая гипокоагуляция, диуретики) и, по показаниям, почечно-заместительная терапия.

После ЭКРП осуществлялась регистрация показателей почечной функции (≥1 раза каждые 6 на 1–3 сутки, ≥1 раза в сутки 4–14 сутки, ≥1 раза ≥1 раза в 3–6 месяцев до 5 лет, далее ежегодно). Почечную функцию до операции и в позднем (>28 суток) послеоперационном периоде оценивали с использованием расчетной скорости клубочковой фильтрации (СКФ) по формуле the Modification of Diet in Renal Disease study и классифицировали по модифицированной шкале National Kidney Foundation/Kidney Disease Outcomes Quality Initiative (KDOQI). В раннем послеоперационном периоде (≤28 суток) почечную функцию классифицировали по системе RIFLE.

Статистический анализ

Все деперсонализированные медицинские данные пациентов были закодированы, внесены в электронные таблицы и проанализированы с использованием платформы IBM SPSS Statistics v.19. Достоверность различий между количественными показателями для нормально распределенных величин оценивали по критерию t Стьюдента или по непараметрическому критерию Манна-Уитни, значимыми считали различия при p <0,05. Для нивелировки разброса результатов в процессе наблюдения уровень и скорость снижения СКФ в послеоперационном периоде рассчитывали с применением многоуровневой линейной регрессии всех уровней сывороточной концентрации креатинина. Выживаемость рассчитывали по методу Калана-Мейера.

Результаты

Объекты (участники) исследования

В исследование включены 25 больных ПКР, подвергнутых ЭКРП по облигатным показаниям. Медиана возраста — 50,1 (31–61) года. Доминировали мужчины (19 (76,0 %) больных). В 16 (64,0 %) случаях диагностированы опухоли единственной функционирующей почки, в 9 (36,0 %) — билатеральные опухоли почек. Медиана индекса коморбидности Чарльсона — 4 (2–8). Медиана нефрометрического индекса RENAL для опухолей со стороны планируемой ЭКРП составила 11 (9–12). Во всех наблюдениях резекция почки in situ признана технически невыполнимой, и всем 25 пациентам произведено 27 ЭКРП (последовательно с двух сторон — в 2 (8,0 %) наблюдениях). Медиана длительности 27 ЭКРП составила 663 (360–870) мин. Медиана объема кровопотери равнялась 2600 (500–7000) мл. Семи (28,0 %) больным вторым этапом выполнена контралатеральная радикальная нефрэктомия, в среднем, через 4,5 (3–6) месяца после ЭКРП.

Основные результаты исследования

Исходная почечная функция оценивалась у всех 25 пациентов до 27 ЭКРП. Медиана СКФ до операции составила 66 (40–96) мл/мин/1,73 м^2. Во всех наблюдениях зарегистрирована хроническая болезнь почек, ХБП (ХБП I–II стадии — 17 (68,0 %), ХБП III стадии — 8 (32,0 %)). У двух пациентов, подвергнутых последовательным экстракорпоральным резекциям обеих почек, исходная СКФ составляла 57 мл/мин/1,73 м^2 и 60 мл/мин/1,73 м^2, СКФ перед вторым вмешательством — 61 мл/мин/1,73 м^2 и 57 мл/мин/1,73 м^2, что соответствовало ХБП II стадии (таблица 1).

Таблица 1.

Распределение кандидатов для ЭКПР по стадиям ХБП

Стадия ХБП	СКФ, мл/мин/1,73 м2	Пациенты (n 25)	
		N	%
Исходные показатели до первой экстракорпоральной резекции почки (n 25)			
I	>90	2	8,0
II	60–89	15	60,0
IIIa	45–59	7	28,0
IIIb	30–44	1	4,0
Исходные показатели до второй экстракорпоральной резекции почки (n 2)			
II	60–89	2	100,0

ХБП — хроническая болезнь почек; СКФ — скорость клубочковой фильтрации.

Медиана СКФ в раннем послеоперационном периоде составила 52 (6–93) мл/мин/1,73м^2. Острое повреждение почек (ОПП) зарегистрировано у 16 (64,0 %) из 25 пациентов и классифицировано в категорию R (риск) по шкале RIFLE у 2 (8,0 %), I (повреждение) — у 3 (12,0 %),

F (почечная недостаточность) — у 7 (28,0 %), L (утрата почечной функции) — у 4 (16,0 %), E (терминальная стадия болезни почек) — у 0 (0,0 %) больных. У одного из двух пациентов, перенесших двухсторонние последовательные ЭКРП, после первой операции зарегистрировано ОПП класса I, после второй — класса R по шкале RIFLE. У второго больного снижения почечной функции после ЭКРП не отмечено. Почечно-заместительная терапия в раннем послеоперационном периоде потребовалась 11 (44,0 %) пациентам (гемодиафильтрация — 7 (28,0 %), гемодиализ — 4 (16,0 %) больным). У всех 25 больных зарегистрировано разрешение ОПП.

Частота ОПП классов F и L значимо повышалась при отсутствии второй функционирующей почки на момент ЭКРП (0,0% (0 из 9 пациентов) vs. 68,8 % (11 из 16 пациентов), p=0,03) и операционной кровопотере >900 мл (0,0 % (0 из 7 пациентов) vs. 61,1 % (11 из 18 пациентов), p=0,04). Не отмечено взаимосвязи частоты ОПП с характеристиками пациентов (демографические показатели, индекс Чарльсона, операционный риск), нефрометрическим индексом и техникой хирургического вмешательств.

В позднем послеоперационном периоде при медиане наблюдения 65 (2–132) месяцев медиана СКФ достигла 55 (7–93) мл/мин/1,73 м^2. Снижение СКФ по сравнению с ранним послеоперационным периодом отмечено в 6 (24,0 %) наблюдениях при медиане уменьшения данного показателя на 6 (3–12,6) мл/мин/1,73 м^2. Клинически значимое повышение стадии ХБП (до IIIb–V стадий) зарегистрировано в 5 (20,0 %) случаях. Быстрое снижение СКФ (>4 мл/мин/1,73 м^2 в год) отмечено у 2 (8,0 %) пациентов. Оба больных живы с сохраненной водовыделительной функцией почек (1 (4,0 %) — на поддерживающем гемодиализе) в течение 7 и 5 лет после ЭКРП, соответственно. Рост СКФ имел место у 14 (56,0 %) пациентов, медиана прироста СКФ достигла 15 (5–44) мл/мин/1,73 м^2. Стабилизация СКФ отмечена в 5 (20,0 %) случаях.

Взаимосвязи поздних функциональных результатов с характеристиками пациентов (демографические показатели, индекс Чарльсона, операционный риск по шкале ASA), нефрометрическим индексом, техникой ЭКРП не выявлено.

Обсуждения

ЭКРП — технически сложная, длительная, многоэтапная операция, дающая возможность избежать радикальной нефрэктомии и перевода в реноприводное состояние больным раком единственной функционирующей почки и пациентам с двухсторонним опухолевым поражением, не позволяющим выполнить резекцию почки in situ [2–8].

Мы проанализировали функциональные результаты 27 ЭКРП у 25 пациентов. Исходная тяжелая ХБП имела место у 32,0 % наших больных. Длительная ишемия функционирующей почечной паренхимы в сочетании с уменьшением ее объема в ходе резекции привела к ОПП в 64,0 % наблюдений, в том числе, — снижению почечной функции, соответствующему классам F и L по шкале RIFLE и потребовавшему почечно-заместительной терапии, в 44,0 % случаев. В немногочисленных публикациях других авторов приведены данные по динамике концентрации сывороточного креатинина после ЭКРП, что не позволяет проводить сравнительный анализа результатов исследований. В серии из 12 наблюдений Janssen M.W. et al. (2918) частота показаний к острому гемодиализу после ЭКРП составила 16,7 % [2]. Двое из 6 больных, оперированных Ju X. et al. (2016), в раннем послеоперационном периоде получали почечно-заместительную терапию [3].

Нами отмечено снижение частоты ОПП при наличии второй функционирующей почки на момент выполнения ЭКРП. Этот факт может учитываться при выборе последовательности хирургических вмешательств у пациентов с двухсторонним ПКР, которым планируется контралатеральная нефрэктомия. Кровопотеря более 900 мл коррелировала с ухудшением ранних функциональных результатов, что требует внимания к гемостазу на всех этапах хирургического вмешательства.

При длительном наблюдении за оперированными пациентами мы выявили снижение почечной функции у 24,0 % пациентов, включая 20,0 % больных с клинически значимым прогрессированием ХБП. Быстрый темп снижения СКФ зарегистрирован у 2 больных, перманентный гемодиализ требуется одному пациенту. В серии из 12 наблюдений Janssen M.W. (2018) при медиане наблюдения 84 месяца программный гемодиализ начали проводить 1 больному через 105 месяцев после ЭКРП [2]. При медиане наблюдения 2,8 года диализ применяется у 3 из 34 пациентов, перенесших ЭКРП в клинике Mickisch G. (2007) [4].

С целью максимального сохранения функции почечного аутотрансплантата мы используем ряд приемов. Первым этапом противоишемических мероприятий является форсированный диурез до нефрэктомии, обеспечивающий лучшие условия для реализации эффекта консервирующего раствора [9]. Вторым компонентом мер профилактики острого почечного повреждения считается постоянное равномерное наружное охлаждение почки, помещенной в стерильный контейнер с ледяной крошкой, дающее возможность снизить интенсивность аэробных процессов в клетках почечного эпителия в условиях отсутствия кровотока [10,11]. Важнейший элемент противоишемической защиты — заполнение сосудистой системы почки консервирующим раствором,

сопоставимым по составу с межклеточной жидкостью и содержащим коллоиды, буферы, нутриенты и антиоксиданты, препятствующие развитию клеточного отека, ацидоза, деплеции АТФ и выработке активных форм кислорода [12]. На резекционном этапе следует стремиться к максимальному сохранению объема неизмененной почечной паренхимы, сосудов и элементов собирательной системы почки. При реконструкции почки после резекции следует избегать сведения краев больших дефектов, чтобы избежать ишемизации дополнительных участков неизмененной паренхимы почки. Этап аутотрансплантации должен выполняться в высоком темпе для сокращения времени тепловой ишемии.

Заключение

ЭКРП — допустимая альтернатива радикальной нефрэктомии, позволяющая сохранить почечную функцию больным раком единственной функционирующей почки или двухсторонним ПКР, которым невозможно выполнить резекцию почки in situ. ОПП в раннем послеоперационном периоде развивается у 64,0 % больных, подвергнутых ЭКРП, в том числе, — тяжелая почечная дисфункция, требующая экстракорпоральной детоксикации — в 44,0 % случаев. При медиане наблюдения 65,6 месяца прогрессирование ХБП до IIIb–V стадий происходит в 20,0 % случаев, показания к программному диализу регистрируются в 4,0 % наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волкова М.И., Носов Д.А., Алексеев Б.Я. и соавт. Почечноклеточный рак. Клинические рекомендации RUSSCO, часть 1.2. Злокачественные опухоли 2025;15(3s2):214–228.
2. Janssen M.W.W., Linxweiler J., Philipps I., et al. Kidney autotransplantation after ne-phrectomy and work bench surgery as an ultimate approach to nephron-sparing surgery. World J Surg Oncol. 2018;16(1):35. DOI:10.1186/s12957-018-1338-1.
3. Ju X., Li P., Shao P., et al. Retroperitoneal laparoscopic nephrectomy combined with bench surgery and autotransplantation for renal cell carcinoma in the sol-itary kidney or tumor involving bilateral kidneys: experience at a single center and technical considerations. Urol Int. 2016;97(4):473–9. DOI:10.1159/000448594.
4. Mickisch G.H.J. Renal Cell Cancer: Bench Surgery and Autotransplantation for Complex Localised Disease. Eur Urol. 2007;6(8):544–8. DOI: 10.1016/j.eursup.2007.01.027
5. Грицкевич А.А., Мирошкина И.В., Байтман Т.П., и др. Экстракорпоральная резекция почки в условиях фармако-холодовой ишемии при почечно-клеточном раке: история и современные проблемы. Экспериментальная и клиническая урология. 2019;(4):32–9.
6. Tran G., Ramaswamy K., Chi T., et al. Laparoscopic nephrectomy with autotrans-plantation: safety, efficacy, and long-term durability. J Urol. 2015;194(3):738–4 3. DOI: 10.1016/j.juro.2015.03.0895.
7. Novick A.C., Jackson C.L., Straffon R.A. The role of renal autotransplantation in complex urological reconstruction. J. Urol. 1990;143(3):452–7. DOI:10.1016/s0022-5347(17)39988-37.
8. Комяков Б.К., Замятнин С.А., Попов С.В., и др. Экстракорпоральное хирургическое ле че ние больных с почечно— клеточным раком. Вестник хирургии им. И.И. Грекова.2014;173(4):53–6
9. Requião-Moura L.R., Durão Junior Mde S., Matos A.C., Pacheco-Silva A. Ischemia and reperfusion injury in renal transplantation: hemodynamic and immunological paradigms. Einstein (Sao Paulo). 2015 Jan-Mar;13(1):129–35
10. Mir M.C., Ercole C., Takagi T. et al. Decline in renal function after partial nephrectomy: etiology and prevention // J. Urol. 2015. Vol. 193. P.1889–1898.
11. Hruby S., Lusuardi L., Jeschke S., Janetschek G. Cooling mechanisms in laparoscopic partial nephrectomy: are really necessary? Arch Esp Urol. 2013 Jan-Feb;66(1):139–45.
12. Chen Y., Shi J., Xia T.C., Xu R., He X., Xia Y. Preservation Solutions for Kidney Transplantation: History, Advances and Mechanisms. Cell Transplant. 2019 Dec;28(12):1472–1489.

© Синицына Огульшат Ремезановна (ogulshat@bk.ru); Перлин Дмитрий Владиславович (dvperlin@mail.ru);
Волкова Мария Игоревна (mivolkova@rambler.ru); Гриднева Яна Владимировна (gridnevyana@mail.ru);
Матвеев Всеволод Борисович (vsevolodmatveev@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.36

МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕДРЕННОГО И СЕДАЛИЩНОГО НЕРВОВ ПРИ ИХ ПЕРЕРЕЗКЕ И НАЛОЖЕНИИ АНАСТОМОЗА

MORPHOLOGICAL AND ELECTROPHYSIOLOGICAL EXAMINATION OF FEMORAL AND SCIATIC NERVES DURING THEIR CUTTING AND ANASTOMOSIS

Kh. Suleymanova
R. Shakhbanov
T. Dibirov
U. Alieva

Summary. The present study is devoted to the morphological and electrophysiological analysis of the femoral and sciatic nerves under conditions of their cutting and subsequent anastomosis. As part of the experiment, models were used on laboratory animals in which femoral and sciatic nerves were severed, and then experiments were carried out on the imposition of nerve anastomoses. Such studies provide an understanding of the biological foundations of successful restoration of the functions of damaged nerves and can contribute to improved methods of treatment and prevention of neurological disorders.

Keywords: femoral nerve, sciatic nerve, electrophysiology, anastomoses, regeneration, nerve conduction, morphology.

Сулейманова Хадижат Гасбаловна
Кандидат медицинских наук, доцент, ФГБОУ ВО Дагестанский государственный медицинский университет
Шахбанов Руслан Казбекович
Кандидат медицинских наук, доцент, ФГБОУ ВО Дагестанский государственный медицинский университет
shahbanovrk@yandex.ru
Дибиров Тагир Муратович
Кандидат медицинских наук, доцент, ФГБОУ ВО Дагестанский государственный медицинский университет
dibirovtagir@mail.ru
Алиева Умхайр Бадрутдиновна
Кандидат медицинских наук, доцент, ФГБОУ ВО Дагестанский государственный медицинский университет

Аннотация. Настоящее исследование посвящено морфологическому и электрофизиологическому анализу бедренного и седалищного нервов в условиях их перерезки и последующего наложения анастомоза. В рамках эксперимента были использованы модели на лабораторных животных, у которых осуществляли перерезку бедренного и седалищного нервов, а затем проводили эксперименты по наложению нервных анастомозов. Подобные исследования обеспечивают понимание биологических основ успешного восстановления функций поврежденных нервов и могут способствовать улучшению методов лечения и профилактики неврологических нарушений.

Ключевые слова: бедренный нерв, седалищный нерв, электрофизиология, анастомозы, регенерация, нервная проводимость, морфология.

Травма позвоночника, которая часто приводит к повреждению спинного мозга, представляет собой серьезную и сложную медицинскую проблему [7,9]. Такое повреждение нарушает непрерывность аксонов нейронов — волокон, передающих нервные импульсы от тела нейрона к целевым органам. В результате этого возникает разрыв коммуникации между головным мозгом и органами-мишенями [3,5].

Восстановление непрерывности нервных путей после повреждения спинного мозга осложняется существенным фактором: отсутствие достаточного слоя соединительной ткани на месте дефекта [1,6]. Это обстоятельство создает серьезные технические трудности при попытке соединить нервные волокна спинного мозга.

Кроме того, к немедленному повреждению спинного мозга добавляется медленный, но не менее разрушительный вторичный процесс [2,4,8].

В таком контексте, мы считаем, что вмешательства, направленные на воздействие на спинной мозг с целью его регенерации и восстановления движений в нижних конечностях, представляют собой перспективный подход. Для восстановления целостности спинного мозга и, как следствие, возобновления связей между корой головного мозга и мышцами конечностей необходимы два ключевых фактора: глубокое понимание процессов патоморфологии и патофизиологии регенерации спинного мозга, а также революционные технические достижения в области манипуляций с нервными волокнами.

Целью данного исследования было установить степень морфологических и электрофизиологических изменений бедренного и седалищного нервов при их перерезке и последующем наложением (конец в конец) анастомоза, а также оценить степень и сроки восстановления проводимости и структурной организации нервных волокон в динамике после операции.

Эксперименты проведены на 30 белых беспородных крысах обоего пола, массой 200–250 г. Животным под кетаминовым наркозом (100 мг/кг, в/м) проводилась лапаротомия параректальным разрезом. Трансабдоминально обнажались бедренный и седалищный нервы, которые перерезались на одном уровне (на 0,5 выше крестцового позвонка) с последующим их соединением по эпиневральной оболочке. Центральные и периферические концы перерезанным нервов сшивались 3–4 швами супрамидной нитью 10/0 с использованием операционного микроскопа БМС-10 (16 кратное увеличение) и микрохирургического инструментария. На противоположной стороне (справа) для сравнительного контроля восстановления функции в левой задней конечности пересекали бедренный и седалищный нервы. Операционную рану послойно зашивали супрамидной нитью 3/0 и обрабатывали 5 % р-ром йода. Крысу сажали в отдельную клетку и вели наблюдение. Степень восстановления функции нервов оценивалась комплексом морфологических и электрофизиологических методов через 2 суток, 4 суток, недели, 2 недели, 3 недели, месяц, 1,5 месяца, 2 месяца, 3 месяца, 6 месяцев, 8 месяцев, 12 месяцев после пластики.

В результате проведенных исследований было выявлено, что на 2 сутки животное находилось в удовлетворительном состоянии, однако активность была снижена. Отмечалось полная утрата двигательной функции и чувствительности конечностей.

Измерение температуры кожи у крыс в этот срок показало, что она во всех зонах денервации была повышена: в области голени — 39,50, на лапках — 39.30.

На 4 день животное активно принимало пищу и жидкость, делало попытку ходить на передних конечностях. Заживление раны шло первичным натяжением. Нарушения проводимости и чувствительности было, как и во второй день.

Через неделю после операции, при полном отсутствии в нижних конечностях двигательной активности и чувствительности, температура в них была снижена на 1–2 градуса.

На 10 день была вскрыта брюшная полость под наркозом и произведены электрофизиологические исследования: порог возбуждения мышц — высота кривой электромиографии показывала отрицательные фибрилляционные линии с обеих нижних конечностей.

Показатели биопотенциометрии высокие: слева (на стороне пластики) 119 МА, а справа — 113 МА.

Кривая показателя «интенсивность — длительность» выявляла реакцию перерождения. Было выявлено, что при постепенном укорочении импульса отмечается плавное повышение порога возбуждения при длительности импульса меньше 10–50 мс, что выражается равномерным ростом левой части кривой над осью абсцисс. При длительности импульса больше 10–50 мс, порог возбуждения несколько снижается.

Через 2 недели с левой стороны наблюдается незначительная мышечная активность в форме попытки привести бедро к туловищу. Двигательная активность на этой стороне — М1, справа — М0, при чувствительности с обеих сторон — S0.

Через 3 недели — на медиальной поверхности бедра и голени обеих задних лапок наблюдается выпадение волос, появляются язвочки, гипотрофия мышц. Двигательная активность на стороне пластики сохраняется на уровне М1; животное пытается привести бедро к туловищу в момент передвижения.

В конце 2 месяца крыса пользуется левой конечностью при ходьбе, хотя и сильно прихрамывая с медиальной ротацией. Двигательная активность (слева) к этому сроку — М2. При резком опускании на задние лапки 1,2 и 3 пальцы раздвинуты. Чувствительность — в основном на медиальной поверхности конечности. Справа — М0 — S0.

Через 2,5 месяца крыса может быстро передвигаться и лазать, используя левую лапку, хотя движения не полные. Справа двигательная активность и чувствительность без изменений.

К концу 3 месяца крыса все активнее использует левую конечность на стороне пластики, хорошо раздвигает пальцы.

По окончании данного срока под наркозом произведено вскрытие брюшной полости и определение электрофизиологических показателей. Определение кривой «интенсивность — длительность» выявило сокращения мышц слева более коротких длительностей. Видно появление новых точек кривой, соответствующих более коротким длительностям. Наблюдается снижение и удлинение левой части кривой при явном наличии ее сгиба.

Показатели биопотенциометрии — слева — 91 МА, справа — 110 МА. Порог возбуждения мышц — высота

кривой электромиограммы показывает положительные фибрилляционные изгибы и отрицательные в правой задней конечности.

Через 4 месяца отмечается существенное восстановление двигательных функций в левой конечности. Крыса передвигается более активно, хотя прихрамывает. Температура кожи на стороне пластики 36,5°С. Животное пытается приводить правую конечность к туловищу за счет сокращения подвздошно-поясничной мускулатуры, но в целом движений нет, конечность волочит сзади (М0), чувствительность при раздражении иглой — S0-1. Температура кожи на этой конечности — 36,9°С.

На 6 месяц после операции крыса достаточно быстро передвигается, используя заднюю левую лапку в опоре; движения в тазобедренном и коленном суставах близки к норме. Животное делает попытку вставать на задние конечности. При этом широко раздвигая пальцы левой лапки. Степень восстановления двигательной функции — М3-М4, чувствительности — S2–3 и температура кожи — 36,4°С.

Правая конечность без движений, мускулатура ее атрофирована; при движении волочится сзади.

Электромиография слева регистрировала монофазный низкоамплитудный редуцированный ответ на раздражение, справа мышечные фибрилляции на раздражения не отмечались.

Биопотенциометрия показала — слева 83, справа 107.

Показатели кривой «интенсивность — длительность» слева были близки к норме. На раздражение нерва выше уровня шва мышцы реагировали сокращением, одновременно на кривой можно было видеть два изгиба, которые располагались рядом. Следует отметить, что при короткой длительности возбудимость мышцы повышалась, тогда как при большей длительности этот показатель постепенно снижался, приближаясь к возбудимости мышц у интактных крыс.

Через 8 месяцев после операции крыса активно использует левую заднюю конечность в процессе движений и опоры, хотя слегка прихрамывает. Степень восстановления двигательной функции — М3-М4 и чувствительности — S2-3, температура кожи 36,4°С. Правая конечность без движений с атрофированной мускулатурой. Двигательная активность и чувствительность соответственно М0-1 и S0-1 при температуре — 35,1°С.

Произведенные электрофизиологические исследования после вскрытия брюшной полости показали следующие результаты: электродиагностика слева выявила равномерный рост кривой над осью абсцисс, а справа это выражалось в одиночных прерывистых импульсах незначительной высоты (10–17 мс).

Электромиография слева выявила трехфазную амплитуду колебаний кривой. Справа мышечные фибрилляции на раздражение не отмечались.

К 12 месяцу крыса активно двигается с использованием левой нижней конечности; одновременно волочит правую конечность.

Полученные результаты следует считать лишь обнадеживающими, ибо при самой выраженной фантазии мы не ожидали большего. Несомненно, потребуются широкие экспериментальные исследования на разных видах животных, чтобы доказать жизнеспособность и убедиться в практической значимости данного принципа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Варсегова Т.Н. Патогистологические изменения седалищного нерва при сочетанных травмах таза и бедра в эксперименте // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2012. № 1 (33). С. 92–95.
2. Варсегова Т.Н., Дюрягина О.В., Антонов Н.И., Рябых С.О. Гистологические и морфометрические изменения бедренного нерва при моделировании бокового межтелового спондилодеза поясничного отдела позвоночника в эксперименте // Травматология и ортопедия России. 2021. Т. 27. № 4. С. 82–92.
3. Варсегова Т.Н., Краснов В.В. Морфологическое исследование седалищного нерва при лечении сочетанной травмы таза и бедра методом чрескостного остеосинтеза в эксперименте // Гений ортопедии. 2010. № 4. С. 36–40.
4. Лихачев С.А., Черненко Н.И. Ультразвуковое исследование нервов поясничного сплетения // Анналы клинической и экспериментальной неврологии. 2013. Т. 7. № 1. С. 20–24.
5. Пилиева А.В., Арьков В.В., Гришина Н.А. Туннельная нейропатия бедренного нерва при патологии тазобедренного сустава // Доктор.Ру. 2020. Т. 19. № 4. С. 6–10.
6. Царев А.А. Топографо-анатомические особенности ветвления нервов задних конечностей крыс. // Морфология. 2008. Т. 2. № 3. С. 81–83.
7. Шевцов В.И., Щудло Н.А., Меньшикова И.А., Борисова И.В. О влиянии отсроченной электротерапии на морфометрические показатели регенерации периферического нерва // Гений ортопедии. 2007. № 3. С. 27–31.
8. Широков В.А., Захаров Я.Ю., Потатурко А.В. Клинико-нейрофизиологические особенности постинъекционной седалищной невропатии (клиническое наблюдение) // Российский журнал боли. 2019. Т.17. № 2. С. 29–37.
9. Щудло Н.А. Морфологические особенности регенерации поврежденного нерва в условиях дозированного растяжения // Гений ортопедии. 2006. № 2. С. 89–94.

© Сулейманова Хадижат Гасбаловна; Шахбанов Руслан Казбекович (shahbanovrk@yandex.ru);
Дибиров Тагир Муратович (dibirovtagir@mail.ru); Алиева Умхайр Бадрутдиновна
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.37

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЕДЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ С ОСТРЫМ КОРОНАРНЫМ СИНДРОМОМ И НЕДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ ДИСПЛАЗИЕЙ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ: ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ СТРАТИФИКАЦИИ РИСКА

OPTIMIZATION OF MANAGEMENT OF PATIENTS WITH ACUTE CORONARY SYNDROME AND UNDIFFERENTIATED CONNECTIVE TISSUE DYSPLASIA: PROGNOSTIC ALGORITHMS FOR RISK STRATIFICATION

O. Sultanova
E. Chernysheva
E. Popov
S. Kasatkina
A. Varlamova
S. Sultanova

Summary. *Objective*: to optimize the management of patients with acute coronary syndrome (ACS) and undifferentiated connective tissue dysplasia syndrome (UCTDS) by developing and implementing algorithms for predicting the risk of life-threatening complications and acute post-infarction cardiac aneurysm (PICA). *Materials and methods*. An open longitudinal study included 241 patients with ACS, of whom 113 (46.9 %) had verified UCTDS. Verification of UCTDS was performed clinically (questionnaire by Elykomov V.A. and Kopylov A.N.) and laboratory (serum hydroxyproline (HP) level). Serum homocysteine (Hcy) and magnesium (Mg) levels were determined in all patients. Using binary logistic regression, prognostic models were developed for the risk of complications in the first 7 days (cardiogenic shock, pulmonary edema) and the risk of PICA formation within 14 days. *Results*. The prevalence of UCTDS among ACS patients was 42 %, which is 17 % higher than the population rate. ACS in patients with UCTDS developed at a younger age (48 [46; 50.5] years) and was characterized by a more severe course: ST-segment elevation ACS was more common (72 % vs. 39 %, $p<0.001$) and the complication rate was higher (75.2 % vs. 21.3 %). Hyperhomocysteinemia (>15 μmol/l) was detected in 88 % of patients with UCTDS, and hypomagnesemia (<0.8 mmol/l) in 91 %. An algorithm was developed to predict life-threatening complications (7 days) based on Hcy and Mg levels. The model's sensitivity was 94.2 %, specificity 88.6 %, AUC 0.923±0.030. Cut-off points: Hcy >29.25 μmol/l (sensitivity 95.7 %, specificity 77.6 %), Mg <0.59 mmol/l (sensitivity 97.7 %, specificity 76.8 %).

An algorithm was developed to predict PICA (14 days) based on levels of Hcy, Mg, HP and the atherogenic index (AI). The model's sensitivity was 93.6 %, specificity 90.9 %, AUC 0.975±0.012. Cut-off points:

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, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
lena.chernysheva@inbox.ru
Попов Евгений Антонович
Доктор медицинских наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
agmapro@mail.ru
Касаткина Светлана Григорьевна
Кандидат медицинских наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
SvetlanaAGMA@yandex.ru
Варламова Александра Александровна
Ординатор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
varlamova2498@mail.ru
Султанова Самира Шамилевна
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
taetae.samira.2004@mail.ru

Аннотация. *Цель исследования*: оптимизация ведения пациентов с острым коронарным синдромом (ОКС) на фоне синдрома недифференцированной дисплазии соединительной ткани (СНДСТ) путём разработки и внедрения алгоритмов прогнозирования риска развития жизнеугрожающих осложнений и острой постинфарктной аневризмы сердца (ОПАС). *Материалы и методы*. В открытое продольное исследование включён 241 пациент с ОКС, из которых у 113 (46,9 %) был верифицирован СНДСТ. Верификация

Hcy >20.25 μmol/l, HP >27.15 μmol/l, Mg <0.45 mmol/l. *Conclusion*. The proposed two-step prognostic algorithms allow for highly accurate risk stratification of both early life-threatening conditions and delayed complications (aneurysm) in patients with ACS and UCTDS. Their application in clinical practice substantiates a differentiated approach to therapy: high-risk patients require a more aggressive management strategy, including early percutaneous coronary intervention and targeted correction of identified metabolic disorders (hyperhomocysteinemia and hypomagnesemia).

Keywords: acute coronary syndrome, connective tissue dysplasia, homocysteine, magnesium, hydroxyproline, prognostic algorithm, risk stratification, post-infarction aneurysm, cardiogenic shock.

СНДСТ проводилась клинически (анкетирование по Елыкомову В.А. и Копылову А.Н.) и лабораторно (уровень оксипролина (ОП) сыворотки крови). Всем пациентам определяли уровень гомоцистеина (ГЦ) и магния (Mg) в сыворотке крови. Методом бинарной логистической регрессии разработаны прогностические модели для риска развития осложнений в первые 7 суток (кардиогенный шок, отёк лёгких) и риска формирования ОПАС в течение 14 дней. *Результаты*. Частота СНДСТ среди пациентов с ОКС составила 42 %, что на 17 % превышает популяционную. ОКС у пациентов с СНДСТ развивался в более молодом возрасте (48 [46; 50,5] лет) и характеризовался более тяжёлым течением: чаще регистрировался ОКС с подъёмом ST (72 % против 39 %, p <0,001) и выше частота осложнений (75,2 % против 21,3 %). Гипергомоцистеинемия (>15 мкмоль/л) выявлена у 88 % пациентов с СНДСТ, а гипомагниемия (<0,8 ммоль/л) — у 91 %. Разработан алгоритм прогнозирования жизнеугрожающих осложнений (7 суток) на основе уровней ГЦ и Mg. Чувствительность модели составила 94,2 %, специфичность 88,6 %, AUC 0,923±0,030. Пороговые уровни: ГЦ >29,25 мкмоль/л (чувствительность 95,7 %, специфичность 77,6 %), Mg <0,59 ммоль/л (чувствительность 97,7 %, специфичность 76,8 %). Разработан алгоритм прогнозирования ОПАС (14 суток) на основе уровней ГЦ, Mg, ОП и индекса атерогенности (ИА). Чувствительность модели 93,6 %, специфичность 90,9 %, AUC 0,975±0,012. Пороговые уровни: ГЦ >20,25 мкмоль/л, ОП >27,15 мкмоль/л, Mg <0,45 ммоль/л. *Заключение*. Предложенные двухэтапные алгоритмы прогнозирования позволяют с высокой точностью стратифицировать риск развития как ранних жизнеугрожающих состояний, так и отсроченного осложнения (аневризмы) у пациентов с ОКС и СНДСТ. Их применение в клинической практике обосновывает дифференцированный подход к терапии: пациентам высокого риска показана более агрессивная тактика ведения, включая раннее чрескожное коронарное вмешательство и целенаправленную коррекцию выявленных метаболических нарушений (гипергомоцистеинемии и гипомагниемии).

Ключевые слова: острый коронарный синдром, дисплазия соединительной ткани, гомоцистеин, магний, оксипролин, прогностический алгоритм, стратификация риска, постинфарктная аневризма, кардиогенный шок.

Введение

Сердечно-сосудистые заболевания продолжают занимать лидирующие позиции в структуре смертности и инвалидизации населения трудоспособного возраста как в Российской Федерации, так и в мире [1]. Особую тревогу вызывает омоложение острого коронарного синдрома (ОКС), который в настоящее время дебютирует в среднем на 13 лет раньше, чем у предыдущего поколения [2]. Параллельно с этим наблюдается высокая распространенность синдрома недифференцированной дисплазии соединительной ткани (СНДСТ), который является генетически детерминированным фоном, изменяющим течение многих заболеваний [3]. По данным литературы, у пациентов с ишемической болезнью сердца наличие СНДСТ ассоциировано с более тяжелым течением, высокой частотой нарушений ритма и склонностью к тромбообразованию. Особого внимания заслуживают анатомические особенности коронарного русла у данной когорты (аномалии отхождения, гипоплазия, мышечные мостики), что создает предпосылки для агрессивного течения атеротромбоза [4]. Ключевую роль в патогенезе осложнений при СНДСТ играют метаболические нарушения. Гипергомоцистеинемия, обладая цитотоксическим и протромбогенным действием, усугубляет эндотелиальную дисфункцию и повреждение миокарда [5]. Дефицит магния (Mg), являясь патогенетической основой самой дисплазии, замедляет синтез коллагена и способствует прогрессированию сердечной недостаточности и аритмий [6; 7]. Маркер деградации коллагена — оксипролин (ОП) — отражает активность диспластического процесса [8]. Несмотря на обилие данных о коморбидности ОКС и СНДСТ, в современной литературе недостаточно представлены персонифицированные подходы к ведению таких пациентов, позволяющие не только констатировать высокий риск, но и количественно его оценить для принятия тактических решений.

Цель исследования

Оптимизация ведения пациентов с острым коронарным синдромом на фоне недифференцированной дис-

плазии соединительной ткани путём разработки и внедрения алгоритмов прогнозирования риска развития жизнеугрожающих осложнений и острой постинфарктной аневризмы сердца.

Материал и методы

Дизайн исследования и критерии отбора. Работа выполнена на базе Регионального сосудистого центра ГБУЗ АО АМОКБ и ГКБ №3 им. С.М. Кирова (г. Астрахань) в период 2018–2025 гг. Проведено открытое продольное сравнительное исследование. Протокол одобрен Региональным независимым этическим комитетом (протокол №2 от 24.12.2020). От всех пациентов получено информированное согласие. Критерии включения: ОКС (инфаркт миокарда или нестабильная стенокардия) не позднее 12 часов от начала ангинозного приступа у пациентов 35–65 лет. Диагноз устанавливали согласно клиническим рекомендациям Минздрава РФ [9; 10]. Критерии исключения: гемодинамически значимые пороки сердца, некоронарогенные заболевания, острые воспалительные или обострение хронических заболеваний (менее 3 месяцев), онкопатология, болезни крови, хроническая сердечная недостаточность IIБ–III стадии до развития ИМ, тяжелая печеночная или почечная недостаточность, сахарный диабет. Характеристика групп. Первоначально скринировано 528 пациентов. После применения критериев исключения в исследование включен 241 пациент. Диагностика СНДСТ проводилась согласно клиническим рекомендациям с использованием анкеты Елыкомова В.А. и Копылова А.Н. (6 и более стигм дисэмбриогенеза) и подтверждалась определением уровня антител к коллагенам II и III типа (ОП) методом ИФА.

В зависимости от наличия СНДСТ сформированы две группы: 1-я группа (основная): 113 пациентов с ОКС и СНДСТ. Медиана возраста 48,0 [43; 53] лет. Мужчин — 70 (62 %), женщин — 43 (38 %); 2-я группа (сравнения): 128 пациентов с ОКС без СНДСТ. Медиана возраста 54,0 [47; 59] года. Мужчин — 86 (67 %), женщин — 42 (33 %). Группы были сопоставимы по полу. Возрастные различия (пациенты с СНДСТ были значимо моложе) являются одной из клинических особенностей и предметом изучения.

Всем пациентам при поступлении проводили стандартное клинико-лабораторное и инструментальное обследование (ЭКГ, ЭхоКГ, коронароангиография).

Дополнительно:

— Определение уровня гомоцистеина в сыворотке крови методом ИФА с помощью тест-системы «Axis Homocysteine» (Великобритания). Референсные значения <15 мкмоль/л.
— Определение уровня магния в сыворотке крови колориметрическим методом с использованием набора «Симко». Референсные значения 0,7–1,1 ммоль/л.
— Определение уровня оксипролина (антител к коллагенам II и III типа) методом ИФА (тест-система CEA 808 Ge, «Иммунотэкс», Ставрополь). Уровень >12,68 мкмоль/л считался повышенным.

Статистическая обработка. Статистический анализ проводили с использованием программ STATISTICA 18.0 и SPSS-16. Количественные признаки представлены в виде медианы и интерпроцентильного размаха [Q1; Q3]. Для сравнения независимых групп использовали U-критерий Манна-Уитни и критерий χ^2 Пирсона. Для разработки прогностических моделей применяли метод бинарной логистической регрессии. Оценку качества моделей проводили с помощью ROC-анализа с расчетом площади под кривой (AUC). Критический уровень значимости $p < 0,05$.

Результаты

Клиническая характеристика пациентов с ОКС на фоне СНДСТ: в ходе исследования установлено, что частота встречаемости СНДСТ у пациентов с ОКС составила 42 % (113 из 241). Обращает на себя внимание тот факт, что ОКС у пациентов с дисплазией развивался на 6 лет раньше — медиана возраста 48 лет против 54 лет в группе без СНДСТ ($p < 0,05$). Анализ течения ОКС выявил, что у пациентов с СНДСТ достоверно чаще регистрировался инфаркт миокарда с подъемом сегмента ST: 72 % (81 пациент) против 39 % (50 пациентов) в группе сравнения ($\chi^2=14,47$; $df=1$; $p < 0,001$). Общая частота развития осложнений в группе ОКС+СНДСТ была в 3,5 раза выше и составила 75,2 %, тогда как в группе ОКС — только 21,3 %. Среди анатомических особенностей, выявленных при коронароангиографии, у пациентов с СНДСТ достоверно чаще встречались: патологическое отхождение огибающей артерии (39 % против 6 %, $p < 0,001$), гипоплазия коронарных артерий (22 % против 4 %, $p < 0,001$) и мышечные мостики (26 % против 4 %, $p < 0,001$).

Лабораторные предикторы. При оценке лабораторных показателей установлено, что для пациентов с СНДСТ характерны выраженные метаболические сдвиги. Уровень гомоцистеина у пациентов с ОКС+СНДСТ составил 47,5 [45,4; 69,6] мкмоль/л, что было значимо выше, чем в группе ОКС — 26,8 [18,1; 35,5] мкмоль/л ($p < 0,001$). Гипергомоцистеинемия зафиксирована у 88 % пациентов основной группы. Уровень магния в группе ОКС+СНДСТ был значимо ниже и составил 0,63 [0,51; 0,77] ммоль/л против 0,82 [0,75; 0,89] ммоль/л в группе ОКС ($p < 0,001$). Гипомагниемия диагностирована у 91 % пациентов с СНДСТ. Уровень оксипролина, отражающий степень деградации коллагена, в группе ОКС+СНДСТ достигал 48,9 [37,5; 59,4] мкмоль/л, что также значимо превышало показатель группы ОКС — 18,3

[13,8; 25,0] мкмоль/л (p <0,001). Корреляционный анализ подтвердил тесную взаимосвязь этих показателей: между ГЦ и Mg выявлена обратная очень сильная связь (r = –0,97; p <0,001), а между ГЦ и ОП — прямая очень сильная связь (r = 0,93; p <0,001).

Алгоритм прогнозирования жизнеугрожающих осложнений (7 суток). Для прогнозирования развития кардиогенного шока и отека легких в первые 7 дней госпитализации методом бинарной логистической регрессии была построена модель. В результате пошагового анализа наиболее значимыми предикторами оказались уровни гомоцистеина и магния при поступлении.

Модель имеет вид:

$$z = 26{,}588 – 0{,}121 \times ГЦ — 45{,}165 \times Mg,$$

где ГЦ — уровень гомоцистеина (мкмоль/л), Mg — уровень магния (ммоль/л). Вероятность события (p) рассчитывается по формуле $p = 1 / (1 + e^{-z})$.

Качество модели оценено как отличное. Согласно Omnibus Test, модель статистически значима (χ^2=86,373; df=2; p <0,001).

Показатели эффективности разработанного алгоритма:

- — Диагностическая чувствительность составила 94,2 %.
- — Диагностическая специфичность составила 88,6 %.
- — Диагностическая эффективность (точность) — 92,0 %.

Площадь под ROC-кривой (AUC) составила 0,923±0,030 (95 % ДИ 0,864–0,982), что соответствует отличному качеству модели. С помощью ROC-анализа определены пороговые значения (cut-off points) для каждого предиктора:

- — Пороговый уровень ГЦ >29,25 мкмоль/л (чувствительность 95,7 %, специфичность 77,6 %);
- — Пороговый уровень Mg <0,59 ммоль/л (чувствительность 97,7 %, специфичность 76,8 %).

Превышение порога по ГЦ и/или снижение по Mg при поступлении позволяет отнести пациента в группу крайне высокого риска развития шока или отека легких.

Алгоритм прогнозирования острой постинфарктной аневризмы сердца (14 суток). Для прогнозирования риска формирования ОПАС в течение 14 дней от начала ОКС также построена регрессионная модель. Финальная модель включила 4 предиктора: уровни ГЦ, Mg, ОП и индекс атерогенности (ИА).

$$z = –101{,}5 + 0{,}66 \times ГЦ + 76{,}8 \times Mg + 1{,}24 \times ИА + 1{,}05 \times ОП$$

Модель обладает высокой статистической значимостью (Omnibus Test: χ^2=108,363; df=4; p <0,001).

Ее характеристики:

- — Диагностическая чувствительность — 93,6 %.
- — Диагностическая специфичность — 90,9 %.
- — Диагностическая эффективность (точность) — 92,0 %.

Площадь под ROC-кривой AUC = 0,975±0,012 (95 % ДИ 0,951–1,000), что свидетельствует об исключительном качестве прогностической способности алгоритма.

Пороговые значения отдельных предикторов, определенные методом ROC-анализа:

- — ГЦ >20,25 мкмоль/л (чувствительность 95,7 %, специфичность 83,3 %).
- — ОП >27,15 мкмоль/л (чувствительность 74,5 %, специфичность 74,2 %).
- — Mg <0,45 ммоль/л (чувствительность 72,3 %, специфичность 71,2 %).

Таким образом, пациенты, у которых уровень ГЦ превышает 20,25 мкмоль/л, уровень ОП — 27,15 мкмоль/л, а уровень Mg опускается ниже 0,45 ммоль/л, имеют максимальный риск формирования аневризмы ЛЖ в постинфарктном периоде.

Обсуждение

Полученные нами данные подтверждают и углубляют представления о СНДСТ как о значимом модификаторе течения ОКС. Частота выявления дисплазии (42 %) в нашей когорте оказалась выше общепопуляционной (около 25 %), что указывает на роль соединительнотканных нарушений как преморбидного фона для развития коронарной патологии. Более молодой возраст пациентов с СНДСТ (48 лет против 54 лет) согласуется с данными других авторов о ранней манифестации атеросклероза на фоне врожденной «слабости» сосудистой стенки. Выявленные анатомические аномалии коронарных артерий (ПООА, гипоплазия, мышечные мостики) у 39 %, 22 % и 26 % пациентов соответственно являются патоморфологическим субстратом, предрасполагающим к тромбозу и инфарцированию. Это полностью коррелирует с наблюдениями С.И. Аксенова и соавт., которые указывали на высокую частоту таких находок у лиц с ДСТ. Ключевым результатом работы является создание практических инструментов для врача — двух прогностических алгоритмов. В современной кардиологии, особенно в острых ситуациях, крайне важна стратификация риска, выходящая за рамки стандартных шкал (GRACE, TIMI). Наши модели позволяют сделать это с высокой точностью (AUC >0,9). Патофизиологическое обоснование выбранных предикторов (ГЦ, Mg, ОП) не вызывает сомнений. Выявленная нами очень сильная обратная

корреляция между ГЦ и Mg (r = –0,97) и прямая между ГЦ и ОП (r = 0,93) демонстрирует единый метаболический блок. Дефицит магния, являясь частью диспластического процесса, нарушает работу ферментов, зависимых от витаминов группы В, что ведет к накоплению гомоцистеина. Гомоцистеин, в свою очередь, повреждает эндотелий и запускает каскад коагуляции, а также усиливает деградацию внеклеточного матрикса, маркером чего и является оксипролин. Таким образом, формируется «порочный круг», приводящий к тяжелым осложнениям.

Предложенный нами первый алгоритм (для 7-дневного прогноза) позволяет уже при поступлении выделить пациентов с риском кардиогенного шока или отека легких (ГЦ >29,25 мкмоль/л, Mg <0,59 ммоль/л). Этим пациентам, согласно нашей концепции, показана максимально агрессивная тактика: не просто раннее, а экстренное чрескожное коронарное вмешательство, превентивное использование инотропной поддержки и тщательный мониторинг гемодинамики.

Второй алгоритм (для 14-дневного прогноза аневризмы) важен для планирования ведения пациента на этапе стационарного лечения и подготовки к выписке. Высокий уровень ОП (>27,15 мкмоль/л) и ГЦ (>20,25 мкмоль/л) в сочетании с гипомагниемией указывают на высокую активность процессов дезорганизации соединительной ткани и ремоделирования, что требует не только стандартной постинфарктной терапии, но и целенаправленной метаболической коррекции. В частности, назначение препаратов магния и витаминов группы В (особенно В6, В12 и фолиевой кислоты) может способствовать снижению уровня ГЦ и стабилизации внеклеточного матрикса, потенциально уменьшая риск аневризматического расширения.

Заключение

У пациентов с острым коронарным синдромом частота выявления синдрома недифференцированной дисплазии соединительной ткани достигает 42 %. Наличие дисплазии ассоциировано с более молодым возрастом дебюта ОКС, преобладанием инфарктов с подъемом ST, высокой частотой анатомических аномалий коронарного русла и трехкратным увеличением риска осложнений. Метаболическими маркерами неблагоприятного течения служат гипергомоцистеинемия, гипомагниемия и повышение уровня оксипролина. Разработанные и валидированные прогностические алгоритмы, основанные на определении этих биомаркеров, позволяют с высокой точностью (AUC 0,923 и 0,975) осуществить двухэтапную стратификацию риска. Первый этап (при поступлении) направлен на выявление угрозы кардиогенного шока и отека легких, что требует перевода пациента в режим максимальной терапевтической настороженности. Второй этап (в динамике) направлен на прогнозирование формирования острой постинфарктной аневризмы, что обосновывает необходимость включения в схему лечения метаболической коррекции (препараты магния, витамины группы В) для улучшения репаративных процессов в миокарде и сосудистой стенке. Внедрение данных алгоритмов в клиническую практику позволит персонифицировать ведение сложной когорты пациентов с коморбидной патологией и улучшить их прогноз.

Практические рекомендации:

1. Всем пациентам с острым коронарным синдромом, особенно молодого и среднего возраста (до 55 лет), целесообразно проводить скрининг на наличие синдрома недифференцированной дисплазии соединительной ткани с использованием анкетирования (по Елыкомову В.А. и Копылову А.Н.).
2. У пациентов с верифицированным СНДСТ при поступлении в стационар рекомендуется определять уровни гомоцистеина и магния в сыворотке крови.
3. При уровне гомоцистеина >29,25 мкмоль/л и/или магния <0,59 ммоль/л пациента следует относить к группе крайне высокого риска развития кардиогенного шока и отека легких, что требует интенсификации терапии (максимально ранняя реваскуляризация, готовность к инотропной поддержке, динамический мониторинг гемодинамики).
4. Для прогнозирования риска формирования острой постинфарктной аневризмы сердца (к 14 дню) рекомендовано использовать разработанную регрессионную модель. При высоких значениях вероятности (пороговые уровни: ГЦ >20,25 мкмоль/л, ОП >27,15 мкмоль/л, Mg <0,45 ммоль/л) в комплексную терапию следует включать препараты магния и витамины группы В (В6, В12, фолиевую кислоту) с целью метаболической коррекции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эрлих А.Д. 12-месячные исходы у пациентов с острым коронарным синдромом, включенных в Российский Регистр «Рекорд-3» / А.Д. Эрлих // Российский кардиологический журнал. — 2018. — №3(155). — С. 23–30.
2. Сметанин М.Ю. Дисплазия соединительной ткани и внезапная сердечная смерть / М.Ю. Сметанин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2016. — №9–3. — С. 405–408.
3. Султанова О.Э. Клинические особенности течения острого коронарного синдрома на фоне синдрома недифференцированной дисплазии соединительной ткани / О.Э. Султанова, Е.Н. Чернышева, Н.П. Сыроватская // Инновация. Наука. Образование. — 2020. — №22. — С. 690–696.
4. Логинов С.В. Структура и частота встречаемости маркеров соединительнотканной дисплазии сердца у больных ишемической болезнью сердца / С.В. Логинов, Т.А. Кудряшова, Ю.Г. Шварц // Успехи современного естествознания. — 2005. — №11. — С. 97.
5. Маслов А.П. Гипергомоцистеинемия и повышенный риск сердечно-сосудистых осложнений у больных ишемической болезнью сердца с атерогенной гиперхолестеринемией / А.П. Маслов, А.Т. Тепляков, А.В. Кузнецова // Сибирский медицинский журнал. — 2009. — №4. — С. 18–24.
6. Кочнева Е.В. Дефицит магния в клинической практике / Е.В. Кочнева // Вопросы диетологии. — 2018. — Т.8, №1. — С. 37–51.
7. Логинова Е.Н. Роль оротата магния в лечении аритмического синдрома на фоне дисплазий соединительной ткани / Е.Н. Логинова, Ю.В. Москвина, Г.И. Нечаева, И.В. Друк // Лечащий врач. — 2018. — №12. — С. 50–53.
8. Govorin A.V. Blood levels of matrix metalloproteinase-9, tissue inhibitor of metalloproteinases-1 and biomarkers of collagen in patients with acute transmural myocardial infarction complicated by aneurysm / A.V. Govorin, E.V. Ratsina et al. // Heart. — 2015. — №1. — P. 30.
9. Клинические рекомендации Российского научного медицинского общества терапевтов по диагностике, лечению и реабилитации пациентов с дисплазиями соединительной ткани (первый пересмотр) / под ред. А.И. Мартынова // Медицинский вестник Северного Кавказа. — 2018. — Т.3, №1.2. — С. 137–209.
10. Барбараш О.Л. Особенности клинического течения и стационарного этапа лечения пациентов с острым коронарным синдромом с подъемом сегмента ST в зависимости от пола (по данным Российского регистра острого коронарного синдрома «Рекорд-3») / О.Л. Барбараш, В.В. Кашталап, И.С. Быкова, А.Д. Эрлих и др. // Российский кардиологический журнал. — 2017. — №6(146). — С. 122–131.

© Султанова Оксана Эседуллаевна (oksanka.sultanova@mail.ru); Чернышева Елена Николаевна (lena.chernysheva@inbox.ru);
Попов Евгений Антонович (agmapro@mail.ru); Касаткина Светлана Григорьевна (SvetlanaAGMA@yandex.ru);
Варламова Александра Александровна (varlamova2498@mail.ru); Султанова Самира Шамилевна (taetae.samira.2004@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04.42

ВЫЯВЛЕНИЕ ПАТОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРЕДСТАТЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ПОСРЕДСТВОМ КРИСТАЛЛОГРАФИИ, КАК ОДНОГО ИЗ МЕТОДОВ РАННЕГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПРОСТАТИТА

DETECTION OF PATHOLOGICAL CHANGES IN THE PROSTATE GLAND USING CRYSTALLOGRAPHY AS A METHOD OF EARLY DIAGNOSIS OF PROSTATITIS

A. Fogel
L. Petrosov

Summary. Chronic prostatitis is not just a diagnosis, it is often a sentence to long-term suffering, reduced quality of life and constant discomfort for millions of men around the world. It is a disease characterized by inflammation of the prostate gland that lasts more than three months and can manifest itself in a wide range of symptoms, from mild to debilitating.

Unlike acute prostatitis, which often has a clear clinical picture and laboratory findings, the chronic form of the disease can be characterized by periods of remission and exacerbation, and the symptoms may be nonspecific and mimic other urological or even neurological problems. This makes it difficult to make an accurate diagnosis and choose an appropriate treatment, which can lead to the progression of the disease and exacerbate the patient's suffering.

Traditional diagnostic methods, such as digital rectal examination and urine and prostate secretion tests for infections, play a key role, but finding more accurate and informative markers of inflammation remains an important task.

Keywords: prostate secretion, prostatitis, crystallography, morphometry.

Фогель Андрей Владимирович
Кандидат биологических наук,
Пятигорский медико-фармацевтический институт — филиал, Волгоградский государственный медицинский университет
andru-fogel@mail.ru
Петросов Левон Артурович
Пятигорский медико-фармацевтический институт — филиал, Волгоградский государственный медицинский университет
petrosov.levon@mail.ru

Аннотация. Хронический простатит — это не просто диагноз, это зачастую приговор к длительным страданиям, снижению качества жизни и постоянному дискомфорту для миллионов мужчин по всему миру. Это заболевание, характеризующееся воспалением предстательной железы, которое длится более трех месяцев, и может проявляться широким спектром симптомов, от легких до изнуряющих.

В отличие от острого простатита, который часто имеет яркую клиническую картину и четкие лабораторные показатели, хроническая форма заболевания может протекать с периодами ремиссии и обострений, а симптомы могут быть неспецифическими и имитировать другие урологические или даже неврологические проблемы. Это затрудняет своевременную постановку диагноза и выбор адекватной терапии, что, в свою очередь, ведет к прогрессированию заболевания и усугублению страданий пациента.

Традиционные методы диагностики, такие как пальцевое исследование, анализ мочи и секрета простаты на наличие инфекций, играют ключевую роль, однако поиск более точных и информативных маркеров воспалительного процесса остается актуальной задачей.

Ключевые слова: секрет предстательной железы, простатит, кристаллография, морфометрия.

Введение

Секрет предстательной железы — это сложная биологическая жидкость, состав которой отражает функциональное состояние железы. В норме, при определенных условиях, компоненты секрета способны образовывать характерные кристаллические структуры. Наиболее известной и информативной является фигура, напоминающая «лист папоротника». Образование такой фигуры свидетельствует о нормальном физико-химическом составе секрета и адекватной работе инкреторной функции железы [5,6].

Однако, как показывают исследования, воспалительный процесс, развивающийся при хроническом простатите, оказывает существенное влияние на эти процессы. Нарушение кристаллизации секрета является прямым следствием изменения его физико-химических свойств и дисфункции железы [2,4]. Это явление, как отмечают И.И. Ильин (1971) и А. Бонев (1974), связано с нарушением баланса различных компонентов секрета, что препятствует формированию упорядоченных кристаллических структур. Несмотря на десятилетия исследований, диагностика и лечение простатита остаются сложной задачей, во многом из-за гетерогенности заболевания

и недостаточного понимания его патогенеза [1,3]. В этом контексте исследование секрета предстательной железы (СПЖ) приобретает особую актуальность, предлагая уникальные возможности для углубления наших знаний и улучшения клинической практики. Исследование помогает выявить воспаление, определить его характер (бактериальный или небактериальный) и возбудителя инфекции [7,10]. После курса терапии забор секрета может проводиться для контроля за динамикой заболевания и подтверждения полного выздоровления [8,9]. Таким образом, целью исследования секрета предстательной железы (сока простаты) при простатите является диагностика и раннее выявление воспаления в предстательной железе методом кристаллографии.

Методы и принципы исследования

Методы исследования. В исследовании характера кристаллизации секрета предстательной железы проводилось у 162 пациентов с подтвержденным диагнозом хронический простатит. Возраст пациентов в диапазоне 26–53 (35±0,5) лет. Длительность заболевания от 1 года до 8 лет.

Забор секрета предстательной железы: процедура проводилась врачом-урологом в специально оборудованном кабинете. Она включала в себя два основных этапа: массаж предстательной железы, сбор секрета. В лабораторных условиях готовился нативный препарат: биоматериал наносился на предметные стёкла, высушивался на открытом воздухе и окрашивался по Грамму. Затем проводись микроскопическое исследование нативного препарата во всех полях зрения.

Исследование лейкоцитов в секрете предстательной железы проводилось с помощью микроскопического исследования. Цель — выявить количество лейкоцитов, которое в норме не должно превышать 10 клеток в поле зрения.

Также проводят тест на «симптом папоротника»: на смотровое стекло наносили каплю секрета и столько же физраствора, смешивали и оставляли сохнуть. При кристаллизации формировался особый рисунок: если он похож на лист папоротника, можно судить об отсутствии в простате процессов воспаления, другой рисунок подтверждал подозрение на простатит. Микроскопирование и морфометрия проводились с помощью микроскопа Leica DM1000 и программного обеспечения Leica Image Manager.

Для объективной оценки степени нарушения кристаллизации секрета была разработана 5-балльная шкала, позволяющая оценить степень кристаллизации СПЖ:

Нормальная кристаллизация (1 балл): Характеризуется четким образованием фигуры «листа папоротника».

Умеренное нарушение (2 балла): Наблюдается истончение ветвей кристаллов и отсутствие поперечных ответвлений.

Выраженное нарушение (3 балла): Видны деформированные кристаллы с утолщенными ветвями.

Резкое нарушение (4 балла): Присутствуют отдельные бесформенные кристаллы и аморфные массы.

Отсутствие кристаллизации (5 баллов): Кристаллизация полностью отсутствует.

Основные результаты

Изучение характера кристаллизации секрета предстательной железы у 162 пациентов с хроническим простатитом выявило ряд важных закономерностей.

Корреляция с лейкоцитами: Была установлена определенная зависимость между характером кристаллизации и количеством лейкоцитов в секрете простаты. Повышенное содержание лейкоцитов более 10, являющихся маркером воспаления, коррелировало с более выраженными нарушениями кристаллизации, в частности наличие сферических структур различного размера и специфические характеристики кристаллов.

Зависимость от липоидных зерен: Исследования также показали прямую зависимость степени нарушения кристаллизации секрета от содержания в нем липоидных зерен, микроскопические частицы липидной природы, которые в норме присутствуют в секрете предстательной железы (простаты). Они образуются в эпителиальных клетках простаты и выделяются вместе с другими компонентами секрета. Норма содержания липоидных зёрен в секрете простаты от 5 до 10 в поле зрения микроскопа. При большом количестве липоидных зерен (17–19 липоидных зерен) нарушение кристаллизации было обнаружено у 15 из 162 больных, при умеренном (13–16) — у 17, при низком (11–12) — у 70, а при их отсутствии (менее 5) — у 75. Этот факт указывает на то, что изменения в липидном составе секрета, вероятно, также играют роль в нарушении формирования кристаллических структур. Липоидные включения могут мешать упорядоченному росту кристаллов или отражать общие метаболические нарушения в железе.

Морфометрическая характеристика секрета предстательной железы в норме и при простатите представлены в таблице 1.

Обсуждение

Показатели кристаллографии при простатите

Изучение образцов секрета предстательной железы с простатитом демонстрирует ряд характерных особен-

Таблицы 1.

Показатели кристаллографии секрета предстательной железы в норме и при простатите

Показатель	Показатели кристаллографии при простатите	Показатели кристаллографии в норме
LTB	40,029±1,022 мкм	14,786±1,107 мкм
ANG	81,486°±0,6°	66,083°±0,9°
CLO	1	3
BRE	30,031±1,225 мкм	14,268±2,169 мкм
ASS	1	2
LEN	403,671±1,004 мкм	249,002±1,198 мкм
PDS	4±1	7±1
Ширина краевой зоны	1394,847±0,235 мкм	1606,489±0,301 мкм
Ширина центра кристаллизации	1414,651±1,017 мкм	1009,012±1,106 мкм
Количество липоидных зерен	15±4	5±1
Количество лейкоцитов	12±1	6±2

LTB — длина кристалла до места «ветвления»; ANG — угол ветвления; CLO — число поколений ветвлений (1-го, 2-го и др. порядка); BRE — ширина кристалла; ASS — асимметрия ветвления: есть — 1, нет — 2; LEN — длина кристалла; PDS — число микроотростков по длине кристалла.

ностей, которые могут быть связаны с воспалительным процессом. При детальном микроскопическом исследовании в центральной части образца были выявлены структуры сферической формы, отличающиеся по размеру.

Сферические структуры:

Малые структуры: Обнаружены объекты сферической формы с диаметром, составляющим 295,805 мкм. Эти образования, вероятно, представляют собой клетки или их агрегаты, характерные для воспалительного инфильтрата. Их размер может указывать на определенную стадию развития воспаления или на тип вовлеченных клеток.

Большая структура: В центральной области также визуализируется более крупная сферическая структура диаметром 1586,05 мкм. Подобные крупные образования могут быть связаны с формированием абсцесса, скоплением гноя или другими патологическими полостями, возникающими в ответ на воспаление.

Кристаллические структуры:

Форма и размер: Кристаллы имеют удлиненную форму. Важно отметить, что их ширина больше по сравнению с образцами секрета, не имеющих признаков простатита. Это может свидетельствовать о различиях в химическом составе или условиях кристаллизации, что, в свою очередь, может быть обусловлено спецификой патологического процесса.

Ветвление: Граница ветвления кристаллов на поколения ветвей практически не выражена. Это означает, что кристаллы имеют более простую, менее разветвленную структуру. Отсутствие ярко выраженного ветвления может указывать на более медленный рост кристаллов или на иные факторы, влияющие на их морфологию.

Совокупность выявленных признаков — наличие сферических структур различного размера и специфические характеристики кристаллов — позволяет предположить, кристаллография отражает картину воспалительного процесса.

Сферические структуры могут быть ассоциированы с воспалительными клетками (например, нейтрофилами, макрофагами) или их скоплениями, а также с продуктами распада тканей или микроорганизмами, если воспаление имеет инфекционную природу.

Кристаллические структуры, особенно их размер и форма, могут быть метаболитами, образующимися в условиях воспаления, или продуктами деградации клеточных компонентов.

Показатели кристаллографии без признаков простатита

Первоначальный визуальный осмотр показал отсутствие структур сферической формы в его центральной части. Это наблюдение является ключевым, поскольку наличие или отсутствие таких структур может указывать на различные биологические процессы или типы материалов. В контексте данного исследования отсутствие сферических образований может свидетельствовать о:

Отсутствии клеточных элементов: Если сферические структуры ассоциируются с клетками (например, эритроцитами, лейкоцитами или бактериями), их отсутствие может указывать на стерильность образца или на то, что он состоит из неклеточного материала.

Отсутствии специфических отложений: В некоторых случаях сферические структуры могут представлять собой отложения солей или других соединений, которые не присутствуют в данном образце.

Отсутствии патологических изменений: Если сферические структуры являются маркерами определенных

патологических состояний, их отсутствие может быть индикатором нормального состояния исследуемого материала.

Значительные отличия образцов были выявлены при анализе его кристаллической структуры. Эти отличия проявляются в следующих аспектах:

Размеры кристаллов: Кристаллы, присутствующие в образцах при отсутствии простатита, характеризуются меньшей длиной по сравнению с кристаллами в образцах с простатитом.

Ширина кристаллов: Аналогично длине, ширина кристаллов в также меньше в образцах при отсутствии простатита. Это указывает на более тонкую и, возможно, более хрупкую кристаллическую структуру.

Граница ветвления кристаллов: Важным отличием является хорошо выраженная граница ветвления кристаллов на поколения ветвей в образцах при отсутствии простатита. Это означает, что процесс роста кристаллов был более упорядоченным и предсказуемым, с четко определенными точками разветвления.

Заключение

Совокупность выявленных особенностей образцов при отсутствии простатита позволяет сделать следующие выводы:

— Отсутствие воспаления: Отсутствие сферических структур, которые могли бы быть ассоциированы с воспалительными клетками или продуктами их жизнедеятельности, подтверждает предположение об отсутствии воспалительного процесса в данном образце.
— Специфический механизм кристаллизации: Меньшие размеры и более выраженное ветвление кристаллов в образцах при отсутствии простатита, по сравнению с образцами с простатитом, указывают на различия в условиях или механизмах кристаллизации.
— Морфологические показатели кристаллографии при наличии простатита выше, чем в образцах без воспалительного процесса, в частности длина кристалла до места «ветвления», угол ветвления, число поколений ветвлений, ширина кристалла, длина кристалла, число микроотростков по длине кристалла, асимметрия ветвления

Таким образом, анализ кристаллизации секрета предстательной железы представляет собой неинвазивный и потенциально высокоинформативный метод диагностики хронического простатита. Он позволяет не только выявить наличие заболевания, но и оценить степень его активности и длительность течения. Наблюдаемая корреляция с такими показателями, как количество лейкоцитов и длительность заболевания, делает этот тест ценным инструментом для мониторинга эффективности лечения и прогнозирования течения болезни.

Включение данного теста в рутинную клиническую практику может значительно расширить возможности врачей в диагностике и ведении пациентов с хроническим простатитом, особенно в случаях, когда традиционные методы не дают полной картины или требуют дополнительного подтверждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрология (Клинические рекомендации) Под ред. П.А. Щеплева, О.И. Аполихина. — М.: ИД МЕДПРАКТИКА-М, 2007, 164 с. — ISBN 987-5-98803-070-6.
2. Андрология для урологов. Клинические рекомендации. П.А. Щеплева. — М.: Медконгресс, 2020. — 262 с.
3. Братчиков О.И., Дубонос П.А., Тюзиков И.А., Шумакова Е.А. Механизмы окислительного стресса в патогенезе хронического бактериального простатита (обзор литературы). Андрология и генитальная хирургия. 2022; 23(3): 19–28.
4. Винник Ю.Ю. Клиническая диагностика хронического простатита. Клиническая дерматология и венерология. 2013;11(2):98–104.
5. Коган М.И., Белоусов И.И., Болоцков А.С. Артериальный кровоток в простате при синдроме хронической тазовой боли/ хроническом простатите. Урология. 2011; 3:22–28.
6. Крутиков Е.С., Житова В.А. Факторы иммунной защиты в патогенезе инфекций мочевыводящих путей (обзор литературы). Нефрология. 2020; 24(5): 9–17.
7. Кульчавеня Е.В., Неймарк А.И. Простатит. М.: ГЭОТАР-Медиа. 2022: 248 с. ISBN: 978-5-9704-7060-2.
8. Урология: учебник под ред. Ю.Г. Аляева, М.: МИА, 2021, 640 с.
9. Chronic Prostatitis/Chronic Pelvic Pain Syndrome: A Disease or Symptom? (2020).
10. Wagenlehner F.M., Naber K.G., Bschleipfer T., Brähler E., Weidner W. Prostatitis and male pelvic pain syndrome: diagnosis and treatment. Dtsch Arztebl Int. 2009 Mar;106(11):175–83.

© Фогель Андрей Владимирович (andru-fogel@mail.ru); Петросов Левон Артурович (petrosov.levon@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

Наши авторы

Abushova A. — Researcher, Institute of Molecular Biology of the Ministry of Science and Education of Azerbaijan, Baku

Aibazova F. — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, North Caucasus State Academy, Cherkessk

Akhmedov R. — Oncologist, Pirogov Clinic of High Medical Technologies, St. Petersburg State University

Alaiddin Judy — Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Albatsha A. — Senior Lecturer, National Research University Higher School of Economics

Alieva U. — Candidate of Medical Sciences, Associate professor, Dagestan state medical university

Aliyeva L. — Doctor of Philosophy in Biology, Senior Researcher, Institute of Molecular Biology of the Ministry of Science and Education of Azerbaijan, Baku

Apana K. — Postgraduate student, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Azab M. — Graduate student, ITMO University, Saint Petersburg

Babayeva I. — Doctor of Philosophy in Biology, Associate Professor, Institute of Molecular Biology of the Ministry of Science and Education of Azerbaijan, Baku

Bagdanov R. — Postgraduate Student, K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies, and Management (the First Cossack University), Moscow

Beloglyadova I. — Postgraduate Student, Kuban State Technological University, Krasnodar

Berezneva N. — Doctor of Medical Sciences, Professor, N.I. Pirogov Russian National Research Medical University (Pirogov University), Moscow

Bersanov R. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Chechen State University named after A.A. Kadyrov; Kh.I. Ibragimov Complex Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny

Bit-Sava E. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Pediatric Oncology and Radiation Therapy; Head, oncologist, St. Petersburg Clinical Scientific and Practical Center for Specialized Types of Medical Care (Oncological) named after N.P. Napalkov

Our authors

Bobrov V. — Postgraduate student, FSBEI HE Vavilov University, Saratov

Bogdasarov A. — Doctor of Medical Sciences, Professor, State Educational Institution of Higher Professional Education Ulyanovsk State University

Bogdasarova R. — Postgraduate Student, State Educational Institution of Higher Professional Education Ulyanovsk State University

Burchenkova N. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Tver State Medical University

Chasovskaja V. — Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M. Kirov

Chernysheva E. — Doctor of Medical Sciences, professor, Astrakhan State Medical University

Conde A. — Postgraduate student, Moscow State University of Technology STANKIN

Davidyan L. — Doctor of Medical Sciences, Professor, State Educational Institution of Higher Professional Education Ulyanovsk State University

Dibirov T. — Candidate of Medical Sciences, Associate professor, Dagestan state medical university

Elkin G. — HSE University, Saint Petersburg

Eruntsova E. — Graduate Student, Uhta State Technical University

Fetaroni Malak — Postgraduate, National University of Oil and Gas Gubkin University

Fogel A. — Candidate of Biological Sciences, Pyatigorsk Medical and Pharmaceutical Institute a branch, Volgograd State Medical University

Gaeva A. — Assistant, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Gaiduk D. — Kuban State Technological University, Krasnodar

Goldovsky Ya. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Russian University of Transport (MIIT), Moscow

Golikova O. — Candidate of Medical Sciences, Republican Hospital No. 1 of the National Medical Center, Yakutsk

Gorshkov A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Tver State Medical University

Gridneva Ya. — Candidate of Medical Sciences, Oncologist, Head. oncological department No. 8 of GBUZ «State Clinical Hospital named after S.S. Yudin DZM»; Associate professor Sechenov First Moscow State Medical University

Ichmelyan A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, State Educational Institution of Higher Professional Education Ulyanovsk State University

Ignatova E. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Saint Petersburg State Maritime Technical University, Saint Petersburg, Russian Federation

Ismailova R. — The general practitioner, Shali Central District Hospital

Iudin M. — Chief Designer of Biship LLC, Saint Petersburg

Ivanenko A. — Russian Scientific Research Neurosurgical Institute named after Professor A.L. Polenov (branch) Federal State Budgetary Institution National Medical Research Center named after V.A. Almazov, St. Petersburg

Ivanov D. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Chief Neonatologist of the, Rector, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Medical Education

Ivanova O. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk

Janibekova A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Medical Institute North Caucasus State Academy, Cherkessk

Janibekova L. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor North Caucasus State Academy; Cardiologist, Karachay-Cherkess Republican Clinical Hospital; Chief Freelance Cardiologist at the Ministry of Health, Cherkessk

Kalashnikova E. — Pathologist, National Center for Clinical Morphological Diagnostics

Kalutsky I. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow Polytechnic University; Associate Professor, RTU MIREA

Kanev A. — Senior Lecturer, Bauman Moscow State Technical University

Kapterev A. — Doctor of Pedagogical Sciences, Doctor of Social Sciences, Professor, Moscow City University

Kargapolova K. — Candidate of Agricultural Sciences, Associate professor, FSBEI HE Vavilov University, Saratov

Kartashev V. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Tver State Medical University

Kasatkina S. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Astrakhan State Medical University

Katkova A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, State Educational Institution of Higher Professional Education Perm State Medical University named after Academician E.A. Wagner

Kazakov A. — Candidate of Medical Sciences, Assistant, Professor, Tver State Medical University

Khodasevich E. — Candidate of Medical Sciences, Assistant, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko

Konovalova A. — Lecturer, State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow

Korendyasev S. — Post-graduate student, Moscow City University

Korotkikh I. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Honored Doctor of the Russian Federation, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko

Korzhuk V. — Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg

Kostyrkin M. — Postgraduate student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad

Kovalev A. — Bauman Moscow State Technical University

Kryazheva E. — Senior Lecturer, Uhta State Technical University

Kulikova I. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education MIREA — Russian Technological University

Kumykova Z. — I.M. Sechenov First Moscow State Medical University

Kushkin V. — State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow

Lazareva V. — Doctor of Biological Sciences, Professor, Uhta State Technical University

Mammadova A. — Senior Researcher, Institute of Molecular Biology of the Ministry of Science and Education of Azerbaijan, Baku

Mammedov S. — Postgraduate Student, Junior Researcher, Chechen State University named after A.A. Kadyrov; Kh.I. Ibragimov Complex Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny

Mamontova L. — Postgraduate student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko

Markevich D. — Graduate student, St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I

Maslov A. — Postgraduate student, Moscow State Technical University of Civil Aviation

Matveev V. — Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department Oncourology of the N.N. Blokhin National Research Medical Center

Mindlin Yu. — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, K.I. Skryabin Moscow State Academy of Veterinary Medicine, and Biotechnology

Nurgaziev R. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, K.I. Skryabin Moscow State Academy of Veterinary Medicine, and Biotechnology

Osennyaya E. — Branch Manager, State Budgetary Healthcare Institution Children's City Hospital No. 118, Moscow

Perlin D. — Doctor of Medical Sciences, Professor, VolGMU; Head. the doctor of GBUZ VOUNTS

Petrosov L. — Pyatigorsk Medical and Pharmaceutical Institute, a branch, Volgograd State Medical University

Petrov V. — Candidate of Technical Sciences, Moscow State University of Technology STANKIN

Pleshakov V. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow

Popov E. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Astrakhan State Medical University

Popov L. — Teacher, North-Eastern State University, Magadan

Popova A. — Resident, Tver State Medical University

Romashkova O. — Doctor of Engineering, Professor, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow

Rumyantseva G. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Tver State Medical University

Ryabets M. — Russian Scientific Research Neurosurgical Institute named after Professor A.L. Polenov (branch) Federal State Budgetary Institution National Medical Research Center named after V.A. Almazov, St. Petersburg

Samake B. — Postgraduate student, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus, Minsk

Sanakoev R. — Deputy Minister of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of South Ossetia for Civil Defense and Population Protection

Serdarov B. — Assistant Lecturer, Turkmen State Medical University named after M. Garryyev, Ashgabat

Seryogin S. — Ph.D. (Econ.), Associate Professor, Chief Specialist, Kerch State Maritime Technological University

Shakhbanov R. — Candidate of Medical Sciences, Associate professor, Dagestan state medical university

Shatskaya E. — Pediatric Cardiologist, State Budgetary Healthcare Institution Children's City Hospital No. 118, Moscow

Shemelyunas S. — Teacher, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University

Shichkina Yu. — Doctor of Technical Sciences, Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Shipulin G. — Candidate of Law Sciences, Associate Professor, RTU MIREA; Associate Professor, Moscow Polytechnic University

Shishkin M. — Graduate student, Nizhnevartovsk State University

Shornikov A. — Moscow Polytechnic University

Sidorin A. — Postgraduate student, FSBEI HE Vavilov University, Saratov

Sila A. — ITMO University, Saint Petersburg

Sinitsyna O. — Head. oncourological department No. 1 of GBUZ State Clinical Hospital named after S.S. Yudin DZM

Stepin Yu. — Doctor of Science in Engineering Sciences, professor, National University of Oil and Gas Gubkin University

Suleymanova Kh. — Candidate of Medical Sciences, Associate professor, Dagestan state medical university

Sultanova O. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Astrakhan State Medical University

Sultanova S. — Astrakhan State Medical University

Susanin S. — Bauman Moscow State Technical University

Tarasov P. — Postgraduate student, Tver State Technical University

Tkachenko O. — Candidate of Agricultural Sciences, Associate professor, FSBEI HE Vavilov University, Saratov

Tkhostova L. — The general practitioner, Interdistrict Multispecialty Hospital, Ministry of Health of the Kabardino-Balkarian Republic

Tsulaya E. — Uhta State Technical University

Ushakov N. — Kuban State Technological University, Krasnodar

Uzdenov M. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, North Caucasus State Academy, Cherkessk

Varlamova A. — Resident, Astrakhan State Medical University

Verezubova N. — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, K.I. Skryabin Moscow State Academy of Veterinary Medicine, and Biotechnology

Vikhtenko E. — Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Pacific National University, Khabarovsk

Vodolazskaya I. — Kerch State Maritime Technological University

Volkova M. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Doctor of the Oncological Department No. 8 of the S.S. Yudin DZM State Clinical Hospital; Scientific Secretary of the Moscow State Pedagogical University

Voropaeva E. — Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, A.S. Pushkin Leningrad State University, Saint Petersburg

Yakovlev A. — Doctor of Technical Sciences, Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University

Yanaeva M. — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Kuban State Technological University, Krasnodar

Yusufov V. — Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, Tver State Medical University

Zakaryukin M. — Postgraduate Student, Moscow University of Finance and Law

Zelinskaya D. — Doctor of Medical Sciences, Professor, N. I. Pirogov Russian National Research Medical University (Pirogov University), Moscow

Zhangorazova A. — Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Zhelenkova M. — Russian University of Transport (MIIT), Moscow

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 допускается.
- 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).