ISSN 2223–2966

СОВРЕМЕННАЯ НАУКА:
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 2 2026 (ФЕВРАЛЬ)

Учредитель журнала
Общество с ограниченной ответственностью
«НАУЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Журнал издается с 2011 года.

Редакция:

Главный редактор
А.В. Царегородцев

Выпускающий редактор
Ю.Б. Миндлин

Верстка
М.А. Комарова

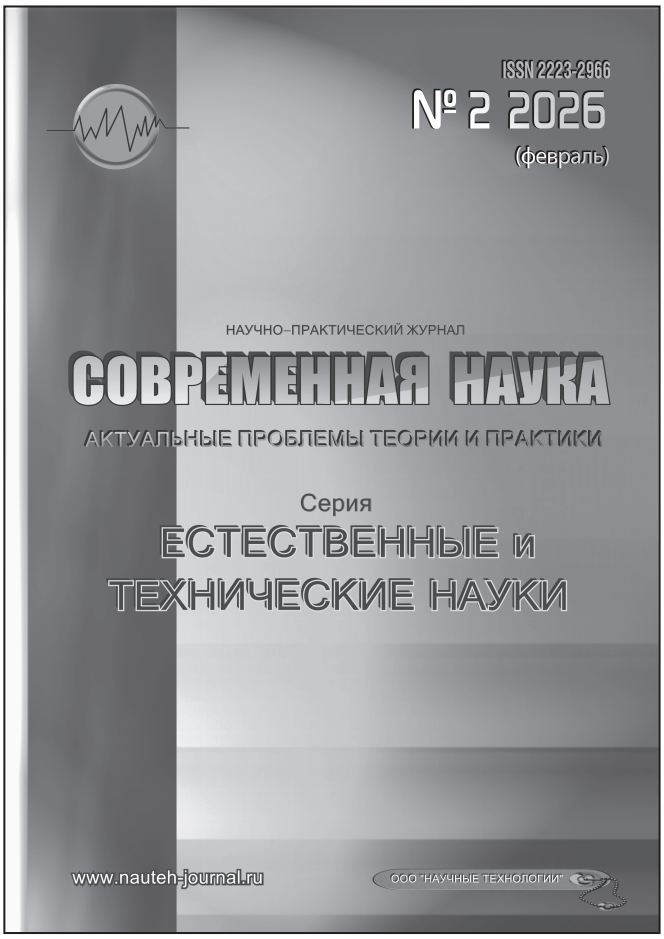
Подписной индекс издания
в каталоге агентства «Пресса России» — 80016

В течение года можно произвести подписку
на журнал непосредственно в редакции.

Научно-практический журнал

Scientific and practical journal

(ВАК — 1.1.2, 1.5.x, 2.3.x, 3.1.x)



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 12.02.2026 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

Педич Г.Г., Козюлина С.В. — Как отклонение в поведении демонстрируют пластичность психики животных
Pedich G., Kozyulina S. — Behavioral variations as evidence of neuroplasticity in animals. 8

Романова Д.А. — Морфофункциональные детерминанты специальной адаптации функциональных систем полиатлонисток на этапах многолетней подготовки
Romanova D.A. — Morphofunctional determinants of special adaptation of polyatlonists' functional systems at the stages of long-term training 12

Информатика, вычислительная техника и управление

Белов В.В., Никишов С.И. — Анализ современных фундаментальных архитектурных подходов и методов обучения больших языковых моделей: от трансформерной революции к новой парадигме эффективного искусственного интеллекта
Belov V., Nikishov S. — Analysis of modern fundamental architectural approaches and methods for training large language models: from the transformer revolution to a new paradigm of effective artificial intelligence 17

Бессарабская И.Э. — Оценка отклонения от нормального закона в центральной предельной теореме
Bessarabskaya I. — Estimation of the deviation from the normal law in the central limit theorem. 23

Богданова Е.А., Герасимова Е.О. — Системный анализ эволюции архитектур сетей связи: модели управления и обработки данных
Bogdanova E., Gerasimova E. — System analysis of the evolution of communication network architectures: data management and processing models 32

Верезубова Н.А., Яковлева О.А., Чекулаев А.А. — Применение архитектур глубокого обучения для идентификации заболеваний деревьев по изображениям
Verezubova N., Yakovleva N., Chekulaev A. — Application of deep learning architectures to identification of tree diseases from images 36

Горячкин Б.С., Жамнова М.С. — Анализ удобочитаемости для разных видов текста
Goryachkin B., Zhamnova M. — Readability analysis for different types of text 43

Горячкин Б.С., Самойлов Д.Е. — Системный анализ жизненного цикла дезинформации в цифровой медиасреде
Goryachkin B., Samoylov D. — Systematic analysis of the life cycle of disinformation in the digital media environment 50

Долгих А.А., Радостев Э.А. — Распознавание эмоций по параметрам мимики в виртуальной реальности
Dolgikh A., Radostev E. — Emotion Recognition from Facial Expression Parameters in Virtual Reality 59

Канталинский-Родин А.Е. — Универсальная модель корпоративной архитектуры ООВО
Kantalinskiy-Rodin A. — Reference enterprise architecture model for higher education insitutions. 67

Катасонов Д.Н., Москалева В.М. — Оптимизация траекторий перемещения при автоматической фокусировке в комплементарных системах лазерной микрообработки
Katasonov D., Moskaleva V. — Optimization of movement paths during automatic focusing in complementary laser micromachining systems. 75

Ким А.С., Крепак И.П. — Применение искусственного интеллекта в компьютерных атаках и противодействии таковым: комплексный фишинг, deepfake-менеджеры и автоматизированный OSINT
Kim A., Krepak I. — Application of Artificial Intelligence in computer attacks and their counteraction: Advanced phishing, deepfake managers, and automated OSINT 81

Клычков М.Д. — Вычислительные подходы к автоматизации наполнения морфологического словаря для церковнославянского языка
Klychkov M. — Computational approaches to automating the filling of a morphological dictionary for the church slavonic language.....85

Крынецкая А.Д., Трушина В.И. — Применение системного анализа и методов машинного обучения в среде Loginom для кластеризации данных экологического мониторинга атмосферного воздуха мегаполиса
Krynetskaya A., Trushina V. — Application of system analysis and machine learning methods in the Loginom environment for clustering environmental monitoring data of the megacity.....93

Кучмин В.К., Крепак И.П. — Аудит защищенности финансово-критичных организаций на основе OSINT-технологии
Kuchmin V., Krepak I. — Financially critical organizations' security audit based on OSINT-technology.....99

Леонтьева Т.В., Брютова С.Д. — Применение динамической балансировки нагрузки для эффективной генерации фрактальных бассейнов притяжения на суперкомпьютерных системах
Leontyeva T., Bryutova S. — Application of dynamic load balancing for efficient generation of fractal basins of attraction on supercomputer systems 107

Литвинов С.Н. — Применение сети эхо-состояний для прогнозирования потребления электроэнергии на горных предприятиях
Litvinov S. — Application of echo state networks for energy consumption forecasting in mining enterprises 114

Москалев Ил.С. — Алгоритм извлечения мета-данных из исполняемого файла на этапе дизассемблирования программного обеспечения
Moskalov I. — Algorithm for extracting meta-data from an executive file at the software disassembly stage..... 118

Овчинников Д.А., Овчинников А.Н. — Анализ преимуществ OpenGL перед Vulkan в разработке PyQt-приложений для визуализации и обработки сверхбольших облаков точек
Ovchinnikov D., Ovchinnikov A. — Analysis of the advantages of OpenGL over Vulkan in the development of PyQt applications for the visualisation and processing of extra-large point clouds 123

Петров Д.С. — Исследование применения нейронных сетей для планирования перемещения автономного робота
Petrov D. — Application of neural networks for path planning of an autonomous robot 128

Петрунина А.Э., Цыганков Н.С., Москалев А.К. — Максимизация качества поставляемой технологической ценности при ограниченном потенциале организационной системы
Petrunina A., Tsygankov N., Moskalev A. — Maximizing the quality of the supplied technological value with the limited potential of the organizational system 135

Подопригора В.Н., Соболев Д.В., Папко А.М., Александров Д.А., Попов Д.А. — Сравнительный анализ эффективности системных промптов для юридических агентов, основанных на большой языковой модели GPT-4o mini
Podoprigora V., Sobolev D., Papko A., Alexandrov D., Popov D. — Comparative analysis of the effectiveness of system prompts for legal agents based on the GPT-4o mini large language model..... 141

Попков С.С. — Интеграция эмоциональных и поведенческих данных для формирования психологического портрета сотрудников IT-компании
Popkov S. — Integration of emotional and behavioral data for building the psychological profile of IT company employees 146

Попов Д.А., Солдатов А.И. — Исследование частотного спектра акустических сигналов, получаемых при проведении помпажных тестов нагнетателей природного газа Н-370-18-1
Popov D., Soldatov A. — Investigation of the frequency spectrum of acoustic signals obtained during surge testing of H-380 natural gas compressors..... 153

Романовский П.Ю., Сметанин В.М., Каплиенко А.М., Самборенко Е.А., Русаков А.М. — Шаблон развертывания и управления состоянием для распределенных кэшей второго уровня (l2) в Kubernetes-кластерах с целью обеспечения zero-downtime операций

Romanovsky P., Smetanin V., Kapliyenko A., Samborenko E., Rusakov A. — Deployment and state management template for second-level distributed caches (l2) in Kubernetes clusters, in order to ensure zero-downtime operations 159

Рудаков Р.В. — Разработка гибридного подхода к управлению сложными техническими системами
Rudakov R. — Development of a hybrid approach to managing complex technical systems 166

Серов М.В., Ромашкова О.Н., Добрынина Т.Н. — Методы адаптивного формирования графических интерфейсов в программных платформах электронной коммерции
Serov M., Romashkova O., Dobrynina T. — Methods of adaptive graphical interface development in e-commerce software platforms 172

Солохов Т.Д. — Математическое моделирование цифровых поведенческих паттернов для прогнозирования риска развития тревожных расстройств
Solokhov T. — Digital behavioral pattern modeling for anxiety risk prediction 178

Титов Д.А., Ромашкова О.Н. — Защита и разграничение доступа при глобально распределённой обработке корпоративных данных в облаке с требованиями реального времени
Titov D., Romashkova O. — Protection and access control for global distributed processing of corporate data in the cloud with real-time requirements 182

Фетарони Малак — Метод анализа иерархий для оценки эффективности и рисков различных видов гидроразрыва пласта и выбора подходящего вида для внедрения
Fetaroni Malak — Hierarchical analysis method for assessing the efficiency and risks of different types of hydraulic fracturing and selecting the appropriate type for implementation 187

Ханнанов Н.К. — Адаптационный подход к импутации одномерных временных рядов спутниковых данных на основе методов машинного обучения
Khannanov N. — Adaptive approach to the imputation of one-dimensional time series of satellite data based on machine learning methods 193

Цимберов Д.М. — Методические подходы к сопровождению бизнес-процессов, связанных с продукцией машиностроения
Tsimberov D. — Methodological approaches to supporting business processes related to engineering products 202

Чумак Р.Р. — Разработка цифровой тени производства в среде виртуальной реальности для демонстраций и обучения технологического персонала
Chumak R. — Development of a digital shadow of production in a virtual reality environment for demonstrations and training of process personnel 207

Шипулин Г.Ф. — Построение распределенной системы сетевого сканирования веб-приложений с функциями спайдеринга и краулинга
Shipulin G. — Building a distributed web application network scanning system with spidering and crowling functions 212

Клиническая медицина

Бархатова Н.А., Бархатова Е.И. — Бета блокаторы и острая декомпенсация сердечной недостаточности: эффекты отмены, лечебная тактика
Barkhatova N., Barkhatova E. — Beta-blockers and acute decompensation of heart failure: withdrawal effects, treatment strategy 217

Богатырева В.А., Морова Н.А. — Факторы риска расширения восходящего отдела аорты у больных серонегативными спондилоартритами
Bogatyreva V., Morova N. — Risk factors for ascending aortic dilation in patients with seronegative spondylarthritides 225

Горпинич А.Б., Шаталов Р.П. — Применение математической модели для выявления наиболее информативных ультразвуковых и кристаллографических признаков описания жидкостных образований, осложняющих течение острого деструктивного панкреатита
Gorpinich A., Shatalov R. — Use of a mathematical model to identify the most informative ultrasonic and crystallographic features to describe fluid formations complicating the course of acute destructive pancreatitis 234

Загорулько А.И., Черняев М.В., Нистратов Г.П., Рыков С.П. — Лечение солитарного метастаза в легком методом локальной микроволной абляции под контролем ПДКТ в отделении ангиографии. Клинический пример
Zagorulko A., Chernyaev M., Nistratov G., Rykov S. — Treatment of a solitary lung metastasis using local microwave ablation under PDCT guidance in the angiography department. A clinical case report. 238

Кулиева Г.З., Мкртчян Л.С., Кучеров В.В., Крикунова Л.И., Иванов С.А., Каприн А.Д. — Клинико-морфологические характеристики МРРШМ как факторы прогноза эффективности химиоэмболизации маточных артерий
Guliyeva G., Mkrtchyan L., Kucherov V., Krikunova L., Ivanov S., Kaprin A. — Clinical and morphological characteristics of locally advanced cervical cancer as predictors of the effectiveness of uterine artery chemoembolization 242

Курбанова С.Г., Смолькина А.В., Чебыкин С.Г., Евсеев Р.М., Слесарева Е.В., Берч Е.Д. — Применение кислотосодержащей присыпки в местном лечении гнойных ран
Kurbanova S., Smolkina A., Chebykin S., Evseev R., Slesareva E., Birch E. — The use of acid-containing powder in the local treatment of purulent wounds 250

Ломова И.П., Тихонова М.Б. — Роль внеклеточных везикул в патогенезе ишемического инсульта в экспериментальных и клинических исследованиях (обзор литературы)
Lomova I., Tikhonova M. — The role of extracellular vesicles in the pathogenesis of ischemic stroke: experimental and clinical studies (literature review) 258

Никифоров И.А., Чернобровкина Т.В., Костюк Г.П., Кондратюк М.Г., Бурыгина Л.А., Белова М.Ю., Кардашян Р.А., Игумнов С.А., Истомина В.В., Кочина А.О. — Факторы развития и биомаркеры нейровоспаления в постковидном синдроме (обзор литературы). Часть I
Nikiforov I., Chernobrovkina T., Kostyuk G., Kondratyuk M., Burygina L., Belova M., Kardashian R., Igumnov S., Istomina V., Kochina A. — Developmental factors and biomarkers of neuroinflammation in postcovoid syndrome (literature review). Part I 271

Осадчая Е.И., Целкович Л.С., Балтер Р.Б., Иванова Т.В., Ильченко О.А. — Результаты комплексного лечения женщин со вторичным стресс-ассоциированным гипогонадотропным гипогонадизмом
Osadchaya E., Tselkovich L., Balter R., Ivanova T., Ilchenko O. — Results of comprehensive treatment for women with secondary stress-induced hypogonadotropic hypogonadism 278

Петросян К.В., Юлдашев Ф.Ш., Дадабаев Г.М. — Эндоваскулярное лечение обструктивных поражений брахиоцефальных артерий у пациентов с сопутствующей кардиальной патологией
Petrosyan K., Yuldashev F., Dadabaev G. — Endovascular treatment of obstructive lesions of the brachiocephalic arteries in patients with concomitant cardiac pathology 285

Сагымбаев Б.А., Ванеева А.М., Петросян К.В. — Ремоделирование правых отделов сердца у пациентов с хронической тромбоэмболической легочной гипертензией по данным эхокардиографии после баллонной ангиопластики ветвей легочных артерий
Sagymbaev B., Vaneeva A., Petrosyan K. — Remodeling of the right heart in patients with chronic thromboembolic pulmonary hypertension according to echocardiography after balloon angioplasty of the branches of the pulmonary arteries. 298

Сергеев О.М. — Влияние несостоятельности колоректального анастомоза на отдаленные результаты лечения: обзор современных данных
Sergeev O. — The impact of colorectal anastomotic leakage on long-term treatment outcomes (review) 305

Трушникова М.А., Корягина Н.А., Корягин В.С., Авдеев А.В., Шихвинцева Т.В., Онянова Т.О. — Сравнительный анализ показателей гемодинамики и лабораторных данных у пациентов с фибрилляцией предсердий пожилого и старческого возраста
Trushnikova M., Koriagina N., Koriagin V., Avdeev A., Shikhvintseva T., Onyanova T. — Comparative analysis of hemodynamic and laboratory data in elderly and old patients with atrial fibrillation 310

Чудопал С.М., Улимбашева Э.С., Сабанчиева Ж.Х., Дешев А.Л., Порошина А.А., Татимова Э.Л. — Особенности течения миастенического криза при позднем дебюте заболевания
Chudopal S., Ulimbasheva E., Sabanchieva Z., Deshev A., Poroshina A., Tatimova E. — Features of the course of myasthenic crisis in late-debuting disease 315

Юлдашев Ф.Ш., Петросян К.В., Дадабаев Г.М., Суладзе В.Г. — Диагностика и интервенционное лечение каротидной патологии. Краткий исторический экскурс. Особенности интервенционного пособия сочетанной каротидной и кардиальной патологии
Yuldashev F., Petrosyan K., Dadabaev G., Suladze V. — Diagnosis and interventional treatment of carotid pathology. A brief historical excursion. Features of interventional benefits for combined carotid and cardiac pathologies..... 319

Наши авторы 329

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.27

КАК ОТКЛОНЕНИЕ В ПОВЕДЕНИИ ДЕМОНСТРИРУЮТ ПЛАСТИЧНОСТЬ ПСИХИКИ ЖИВОТНЫХ

BEHAVIORAL VARIATIONS AS EVIDENCE OF NEUROPLASTICITY IN ANIMALS

G. Pedich
S. Kozyulina

Summary. The article examines the phenomenon of animal mental plasticity — a complex capacity of the nervous system and behavior to change under the influence of internal and external stimuli, which ensures adaptation to dynamic environmental conditions. The key role of plasticity as an evolutionary mechanism that enhances species survival in conditions of ecological diversity is emphasized.
The aim of the study is to analyze how behavioral deviations in animals reveal the boundaries and potentials of mental plasticity, as well as to identify the mechanisms underlying adaptive and maladaptive behavioral changes.

Keywords: animal mental plasticity, behavioral deviations, adaptation, stereotypies, stress responses, ethology, evolutionary flexibility.

Педич Галина Геннадьевна
старший преподаватель, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии — МВА имени К.И. Скрябина
Козюлина Светлана Вадимовна
ассистент преподавателя, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии — МВА имени К. И. Скрябина

Аннотация. В статье рассматривается феномен пластичности психики животных — комплексная способность нервной системы и поведения изменяться под влиянием внутренних и внешних стимулов, обеспечивающая адаптацию к динамичным условиям среды. Подчёркивается ключевая роль пластичности как эволюционного механизма, повышающего выживаемость видов в условиях экологического разнообразия.
Цель исследования — проанализировать, как отклонения в поведении животных раскрывают границы и возможности психической пластичности, а также выявить механизмы, лежащие в основе адаптивных и дезадаптивных поведенческих изменений.

Ключевые слова: пластичность психики животных, отклонения в поведении, адаптация, стереотипии, стрессовые реакции, этология, эволюционная гибкость.

Пластичность психики животных представляет собой комплексную способность их нервной системы и поведения подвергаться изменениям в ответ на внутренние и внешние стимулы, что обеспечивает адаптацию к постоянно меняющимся условиям окружающей среды. Эта характеристика является ключевым механизмом эволюционной гибкости, который позволяет видам успешно приспосабливаться в процессе эволюции и способствовать их выживанию в условиях экологического разнообразия. Пластичность включает в себя изменение нейронных связей, перестройку когнитивных процессов и способность к поведению, направленному на эффективное реагирование на новые или стрессовые ситуации.[1]

В контексте исследований поведения животных важное значение приобретает изучение худших вариантов проявления этой пластичности — отклонений от обычных моделей поведения. Анализ таких отклонений позволяет понять, каким образом животные используют свою психологическую гибкость, адаптируясь к новым условиям, а также выявить механизмы, которые помогают им преодолевать последствия негативных факторов окружения.

Изучение отклонений в поведении служит ценным инструментом для понимания границ и возможностей пластичности психики. В определенных ситуациях такие отклонения могут свидетельствовать о наличии у животного способности к созданию новых стратегий поведения, либо, наоборот, указывать на негативные последствия стрессовых воздействий, приводящие к дезадаптации. Важность данной темы обусловлена также тем, что отклонения могут выступать в качестве сигналов о нарушениях в функционировании нервной системы или о преддверии патологических состояний, вследствие чего их изучение помогает не только понять механизмы адаптации, но и разработать меры по корректировке поведения в случае необходимости. [2]

Обобщая, пластичность психики включает в себя несколько взаимозависимых аспектов — нейронную, поведенческую и когнитивную:

- *Нейронная пластичность* обеспечивает перестройку нервных связей, которая способствует запоминанию новой информации и освоению новых навыков.
- *Поведенческая пластичность* проявляется в способности животных изменять свои реакции,

маршруты перемещения и формы поведения в соответствии с изменяющимися условиями.
- *Когнитивная пластичность* связана с возможностью переработки информации, принятием решений и прогнозированием исходов.

Все эти аспекты играют важную роль в формировании приспособительных стратегий и указывают на глубокую взаимосвязь между пластичностью психики и способностью животных к адаптации в разнообразных экологических контекстах. [3]

Типы отклонений в поведении животных

Отклонения в поведении животных представляют собой разнообразные проявления реакции на внутренние и внешние воздействия, которые выходят за пределы типичных моделей поведения и могут носить как временный, так и устойчивый характер. Временные отклонения связаны с краткосрочными адаптивными реакциями, возникшими в ответ на ситуативные стимулы, стрессовые ситуации или временные нарушения среды, и как правило, быстро исчезают при восстановлении нормальных условий, однако уже через часы или дни при возвращении к привычным условиям поведения нормализуется. У диких животных аналогичные кратковременные сдвиги наблюдают после поимки и краткой фиксации для взятия проб крови или измерений: сразу после освобождения животные могут двигаться меньше, чаще прятаться или избегать открытых участков, но эти изменения проходят, если вмешательство не повторяется [4,5]

В свою очередь, устойчивые или хронические отклонения продолжаются длительное время и могут сигнализировать о длительных изменениях в функционировании нервной системы или социальной среды животного. Так, если грызунов в течение нескольких недель многократно подвергать социальным конфликтам (регулярно подсаживать к более сильному, доминирующему животному, которое их атакует и прогоняет), у части из них формируется стойкое избегание контактов, снижение активности и интереса к новой среде, сохраняющееся даже тогда, когда конфликты прекращаются. [6]

У животных, длительно содержащихся в бедной, однообразной среде (маленькая клетка без укрытий и игрушек), нередко возникают хронические стереотипии — однообразные повторяющиеся движения, такие как постоянная ходьба взад-вперёд по одному маршруту или ритмичное покачивание головой, которые могут сохраняться месяцами и не исчезают полностью даже после улучшения условий. Виды отклонений связаны с различными аспектами поведения и физиологического состояния животных. Например, агрессивное поведение может проявляться в ответ на угрозу или конкуренцию и служить стратегией защиты ресурсов или территории. Тревожность, наоборот, связана с повышенной чувствительностью к опасностям и вызывает избегающее поведение, что может стать адаптивным механизмом при наличии опасных условий. Повторяющееся поведение, такое как стереотипии у животных в ограниченных условиях, считается реакцией на стресс или дефицит стимулов. Изменение маршрутов миграции и других долгосрочных моделей поведения также может быть вызвано экологическими изменениями или воздействием человека и служит механизмом адаптации к новым условиям среды.

Механизмы проявления пластичности через такие отклонения основаны в основном на способности животного учиться и перерабатывать полученный опыт. Адаптивные отклонения могут возникать как результат формирующихся новых навыков и стратегий при контакте с измененной средой, а также в условиях необходимости устранения или минимизации угроз. В этих случаях поведенческие изменения представляют собой встроенные механизмы обучения и саморегуляции, позволяющие животному эффективнее реагировать на вызовы окружающей среды. Стрессовые ситуации, такие как угрозы со стороны хищников, дефицит ресурсов, болезни или изменения условий среды, вызывают активные реакции в поведении — повышение тревожности, агрессии или, напротив, апатии. Эти реакции могут служить защитными или компенсаторными механизмами, позволяющими животным перераспределять ресурсы, избегать опасностей или создавать новые возможности для выживания. [7,8]

Кроме того, существуют особые случаи проявления поведения, которые в значительной степени иллюстрируют механизм пластичности. Так, ситуация, при которой животное имитирует поведение другого вида или объекта (например, мимикрия у насекомых или рыб), что служит стратегией маскировки и избегания хищников или конкурентов. Мимикрия и другие формы имитации позволяют животным успешно скрываться в окружающей среде, повышая их шансы на выживание. Эти адаптивные стратегии являются яркими примерами проявления пластичности психики, так как они предполагают высший уровень когнитивной переработки информации и способности к изменению поведения с целью достижения конкретных целей.

В целом, механизмы проявления пластичности через отклонения в поведении свидетельствуют о высокой гибкости нервной системы животных и их способности к переработке опыта, что, в конечном счёте, способствует их адаптации в условиях изменяющейся среды и сохраняет их выживаемость в разнообразных экологических системах.

Примеры из исследований и практики

В рамках современных исследований и практических наблюдений было выявлено множество примеров, иллюстрирующих проявление отклонений в поведении животных в условиях изменения среды или при вводе новых факторов, что свидетельствует о высокой степени их пластичности. Например, животные, перемещающиеся в новые ареалы или сталкивающиеся с изменениями в среде обитания, нередко демонстрируют изменение паттернов поведения, включая развитие новых стратегий поиска пищи, изменения в маршрутах миграции или активизации ранее неиспользуемых ресурсов. В таких случаях можно наблюдать как положительные отклонения, способствующие адаптации и выживанию, так и отрицательные, проявляющиеся в стрессовых реакциях или дезадаптивных моделях поведения.[9]

Изменения в поведении животных при преобразовании среды дают ценное представление о механизмах их психологической гибкости. Например, в результате экологических изменений у некоторых видов птиц и млекопитающих наблюдается изменение во времени и маршрутах миграции, что свидетельствует о способности к переработке информации, переориентации и адаптации к новым условиям. Аналогично, случаи выраженного переобучения в условиях искусственного обогащения или ограничения среды показывают, что поведенческие отклонения могут служить индикаторами высокого уровня пластичности и возможности к адаптивной перестройке поведения. Следует подчеркнуть, что положительные отклонения в поведении, например, более эффективное использование ресурсов, снижение уровня тревожности или развитие новых форм коммуникации, свидетельствуют о высоком потенциале саморегуляции и приспособленности. В то же время отрицательные отклонения, такие как хронический стресс, агрессивность, часто указывают на наличие дезадаптивных изменений или нарушения в системе поведения, что требует дополнительного изучения и оценки степени их влияния на физиологическое и психологическое состояние животных.

Значение отклонений в поведении для понимания психики животных трудно переоценить. Они выступают как ключевые показатели, раскрывающие механизмы пластичности, являющейся важнейшим механизмом выживания в постоянно меняющихся условиях. Пластичность служит базовым механизмом, позволяющим животным не только реагировать на окружающие изменения, но и самостоятельно инициировать изменения, управляемые когнитивными процессами и опытом. Отклонения свидетельствуют о способности к саморегуляции, перестройке поведения и развитию новых адаптивных стратегий, что является доказательством внутренней гибкости нервной системы. В практике научных исследований, особенно в области зоологии и нейробиологии животных, изучение этих проявлений позволяет понять внутренние механизмы приспособления, выявить особенности психического развития и способность к саморегулятивным процессам у различных видов животных.[10]

В практическом аспекте, например, в зоопсихологии и охране природы, такие знания применяются для разработки программ по улучшению условий содержания животных, выработки методов природоохранных мероприятий и реабилитации животных, оказавшихся в экстремальных условиях. В целом, отклонения в поведении, будучи симптомами пластических процессов, помогают глубже понять природу психики животных и особенности их адаптивных возможностей, что способствует развитию более эффективных подходов к сохранению биоразнообразия и обеспечению благополучия животных в условиях антропогенного воздействия.

В заключение следует подчеркнуть, что отклонения в поведении животных являются неотъемлемой составной частью их психической пластичности, служащей важнейшим механизмом адаптации к постоянно меняющимся экологическим, социальным и стрессовым условиям. Эти отклонения, проявляющиеся как временные или устойчивые изменения, отражают способность нервной системы и поведения животных к переработке информации, обучению и саморегуляции, что в совокупности обеспечивает их выживание и успешную адаптацию. Особенно значимым аспектом является то, что положительные проявления таких отклонений могут свидетельствовать о высокой степени гибкости когнитивных процессов и развитии новых стратегий поведения, а отрицательные — служить индикаторами дезадаптивных реакций и возможных патологий. Взаимосвязь между отклонениями и пластичностью психики помогает раскрыть не только механизмы внутренней перестройки поведения, но и понять уровни и границы адаптивных возможностей каждого вида, что актуально для теоретических исследований и практических задач охраны, реабилитации и содержания животных.

Дальнейшие перспективы исследований в данной области включают углубление изучения молекулярно-нейронных механизмов, лежащих в основе проявления и регулировки пластичности, а также межвидового сравнения и выявление факторов, усиливающих или обусловливающих склонность к определенным типам отклонений. В области экспериментальных исследований необходимо разрабатывать моделирующие ситуации, позволяющие выявить причинно-следственные связи между конкретными внешними воздействиями, внутренним состоянием животных и характером отклонений, а также оценивать эффективность различных методов коррекции и обучения. Кроме того, актуальной

является интеграция данных из нейронаук, психологии, этологии и экологической науки для разработки комплексных моделей понимания процессов пластичности и их проявлений.[11]

Практическое значение понимания связи между отклонениями и пластичностью психики неоспоримо. Оно служит базой для совершенствования методов содержания и ухода за животными в зоопарках, питомниках, при реабилитации и в условиях дикой природы, способствуя созданию благоприятных условий для проявления их естественных поведенческих и когнитивных способностей. Такой подход позволяет не только уменьшить стрессовые реакции и дезадаптивные модели поведения, но и способствовать развитию у животных новых навыков, повышая их адаптивный потенциал и качество жизни. В целом, интеграция знаний о взаимосвязи между отклонениями и пластичностью психики открывает новые горизонты для теоретического и прикладного зоологического знания, способствует более глубокому пониманию психического функционирования животных и формированию эффективных стратегий их сохранения и благополучия в условиях антропогенного воздействия и экологических изменений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вагнер В.А. Биологические основания сравнительной психологии: биопсихология: в 2 т. / В.А. Вагнер. — Москва: Наука, 2005. — (Памятники психологической мысли/ Рос. акад. наук, Ин-т психологии).
2. Келер В., Коффка К. Гештальтпсихология. В. Келер. Исследование интеллекта человекоподобных обезьян; К. Коффка. Основы психического развития / В. Келер, К. Коффка. — Москва: АСТ, 1998. — 682, с. — (Гештальтпсихология, Классики зарубежной психологии). — ISBN 5-15-000898-
3. Bliss T.V., Lomo T. Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of the perforant path // The Journal of Physiology. — 1973. — Vol. 232, No. 2. — P. 331–356. — doi:10.1113/jphysiol. 1973.sp010273. — PMID 4727084
4. Environment and Population: Problems and Adaptation: An Experimental Book Integrating Statements by 162 Contributors. Издано Praeger в 1983 году. Объём — 486 страниц, ISBN 0-275-90955-7.
5. Дольник В.Р. «Непослушное дитя биосферы». СПб.: Петроглиф, 2004.
6. Шабанов П.Д., Лебедев А.А. Зоосоциальное поведение крыс // Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии. — 2007. — Т. 5, № 3. — С. 2–79.
7. Орбели Л.А. Вопросы высшей нервной деятельности: лекции и доклады, 1922–1949 гг. / акад. Л.А. Орбели. — М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1949. — 801 с. — (Итоги и проблемы современной науки).
8. Григорьев А.И., Григорьян Н.А. «Научная школа академика Леона Абгаровича Орбели: к 125-летию со дня рождения» (Москва: Наука, 2007).
9. Ладыгина-Котс Н.Н. Дитя шимпанзе и дитя человека в их инстинктах, эмоциях, играх, привычках и выразительных движениях [Текст] со 145 таблицами: в 2 т. / Н.Н. Ладыгина-Котс; Российская акад. образования, Московский психолого-социальный ин-т. — 2-е изд., испр. — Москва, Воронеж: Изд-во Московского психолого-социального ин-та, МОДЭК, 2011. — ISBN 978-5-9770-0334-6 (МПСИ), 978-5-89395-906-2 (МОДЭК).
10. Мак-Фарленд Д. Поведение животных. Психобиология, этология и эволюция / Пер. с англ. Н.Ю. Алексеенко и др.; под ред. П.В. Симонова. — М.: Мир, 1988. — 518, с.: ил.; 25 см. — ISBN 5-03-001230-3.
11. Тинберген Н. Социальное поведение животных / Пер. с англ. Ю.Л. Амченкова, под ред. акад. РАН П.В. Симонова. — М.: Мир, 1993. — 152 с. — ISBN 5-03-002788-2.

© Педич Галина Геннадьевна; Козюлина Светлана Вадимовна
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.34

МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ДЕТЕРМИНАНТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ АДАПТАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОЛИАТЛОНИСТОК НА ЭТАПАХ МНОГОЛЕТНЕЙ ПОДГОТОВКИ

MORPHOFUNCTIONAL DETERMINANTS OF SPECIAL ADAPTATION OF POLYATLONISTS' FUNCTIONAL SYSTEMS AT THE STAGES OF LONG-TERM TRAINING

D. Romanova

Summary. The article is devoted to the topic of morphofunctional determinants of special adaptation of functional systems of polyathlon athletes at various stages of long-term sports training. Special attention is paid to the patterns of changes in morphological, functional, and psychomotor indicators of the athletes' bodies under the influence of systematic training effects of a complex nature.

The purpose of the study is to establish the morphofunctional determinants of special adaptation of functional systems of polyathlon athletes and to determine their relationship with the components of competitive performance at the stages of long-term training.

Methods. 135 female polyathletes aged 14-30 years of various qualifications were examined. Anthropometry, bioimpedansometry, dynamometry, spirometry, functional tests of the cardiorespiratory system, tetrapolar chest rheography, psychomotor testing, methods of variational statistics and correlation analysis were used.

Results. A progressive increase in active cellular.

Keywords: polyathlon, morphofunctional determinants, special adaptation, functional systems, long-term training, body composition, cardiorespiratory system, female athletes, sports physiology, long-term adaptation.

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

Аннотация. Статья посвящена теме морфофункциональных детерминант специальной адаптации функциональных систем полиатлонисток на различных этапах многолетней спортивной подготовки. Особое внимание уделяется закономерностям изменения морфологических, функциональных и психомоторных показателей организма спортсменок под влиянием систематических тренировочных воздействий комплексной направленности.

Цель исследования — установить морфофункциональные детерминанты специальной адаптации функциональных систем полиатлонисток и определить их взаимосвязь с компонентами соревновательной результативности на этапах многолетней подготовки.

Методы. Обследованы 135 полиатлонисток 14–30 лет различной квалификации. Применялись антропометрия, биоимпедансометрия, динамометрия, спирометрия, функциональные пробы кардиореспираторной системы, тетраполярная грудная реография, психомоторное тестирование, методы вариационной статистики и корреляционного анализа.

Результаты. Выявлено прогрессивное увеличение активной клеточной массы (от 29,8±2,1 до 50,3±3,2 кг), мышечной массы (от 19,6±1,8 до 37,7±3,1 кг), показателей центральной гемодинамики и улучшение психомоторных параметров. Установлены сильные корреляционные связи между морфофункциональными показателями и компонентами соревновательного результата.

Выводы. Морфофункциональные детерминанты специальной адаптации представляют собой интегративный комплекс характеристик, закономерно изменяющихся на этапах многолетней подготовки, и могут использоваться для управления тренировочным процессом, индивидуализации подготовки и прогнозирования спортивной результативности полиатлонисток.

Ключевые слова: полиатлон, морфофункциональные детерминанты, специальная адаптация, функциональные системы, многолетняя подготовка, компонентный состав тела, кардиореспираторная система, спортсменки, спортивная физиология, долговременная адаптация.

Введение

Современная спортивная физиология рассматривает адаптацию как фундаментальное свойство живых систем, обеспечивающее приспособление организма к изменяющимся условиям среды и специфическим нагрузкам. По мнению К.В. Судакова, «функциональная система представляет собой динамическую саморегулирующуюся организацию, избирательно объединяющую различные органы и ткани для достижения полезного приспособительного результата» [15, с. 123]. В контексте спортивной деятельности морфофункциональные детерминанты выступают интегративными показателями, определяющими направленность и эффективность адаптационных перестроек организма спортсмена. Полиатлон как комплексный вид спорта, включающий разнонаправленные двигательные режимы — силовую гимнастику, стрельбу из пневматического оружия и лыжную гонку — предъявляет специфические требования к морфофункцио-

нальному статусу спортсменок на различных этапах многолетней подготовки.

Специальная адаптация функциональных систем полиатлонисток характеризуется комплексными перестройками кардиореспираторной, нервно-мышечной, эндокринной и вегетативной систем организма. В.Н. Платонов отмечает, что «специфика соревновательной деятельности в многоборных видах спорта обусловливает необходимость формирования уникального комплекса морфофункциональных характеристик, обеспечивающих эффективную реализацию двигательного потенциала в разнонаправленных видах нагрузки» [13, с. 48].

Материалы и методы

В исследовании приняли участие 135 полиатлонисток различной квалификации в возрасте от 14 до 30 лет, тренирующихся в спортивных школах олимпийского резерва и клубах Северо-Западного, Центрального, Уральского, Сибирского и Приволжского федеральных округов Российской Федерации. Согласно этапам многолетней спортивной подготовки обследуемые были распределены на пять групп: первая группа — спортсменки 14–16 лет этапа совершенствования спортивного мастерства начальной специализации (n=38, квалификация КМС и I разряд, стаж занятий 3–6 лет); вторая группа — 17–19 лет этапа совершенствования спортивного мастерства углубленной специализации (n=34, квалификация КМС и МС, стаж 6–9 лет); третья группа — 20–23 года этапа высшего спортивного мастерства до двух лет (n=35, квалификация МС, стаж 8–12 лет); четвертая группа — 24–30 лет этапа высшего спортивного мастерства свыше двух лет (n=28, квалификация МС и МСМК, стаж 10–16 лет). Контрольные группы составили лица, не занимающиеся спортом систематически, соответствующего возраста (n=92).

Комплексное обследование морфофункционального статуса включало антропометрические измерения с расчетом индексов физического развития (индекс Кетле, индекс Пинье), биоимпедансометрию для определения компонентного состава тела (активная клеточная масса, мышечная масса сегментов тела), динамометрию с вычислением силового индекса, спирометрию с определением жизненной емкости легких и жизненного индекса, функциональные пробы кардиореспираторной системы (проба Штанге, проба Генчи, индекс Руфье-Диксона), определение показателей центральной гемодинамики (ударный объем крови, минутный объем крови, сердечный индекс, ударный индекс) методом тетраполярной грудной реографии, психомоторное тестирование (время простой и сложной реакции, теппинг-тест). Т.С. Гильмутдинов подчеркивает, что «комплексная оценка морфофункционального состояния полиатлонистов позволяет выявить лимитирующие факторы специальной работоспособности и осуществить целенаправленную коррекцию тренировочного процесса». Исследования проводились в соревновательном периоде годичного цикла подготовки во время всероссийских соревнований по полиатлону в дисциплинах «3-борье с лыжной гонкой» и «3-борье с лыжероллерной гонкой» непосредственно до и после соревновательной нагрузки. Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием методов вариационной статистики, корреляционного и факторного анализа с применением программного обеспечения SPSS Statistics 23.0, критический уровень значимости принимался при $p < 0,05$.

Литературный обзор

Теоретические основы специальной адаптации функциональных систем к спортивной деятельности базируются на концепции функциональных систем, разработанной П.К. Анохиным и развитой К.В. Судаковым [15] применительно к спортивной физиологии. Д.Н. Давиденко определяет специальную адаптацию как «процесс формирования устойчивых морфофункциональных изменений в организме спортсмена, специфичных для конкретного вида мышечной деятельности и обеспечивающих повышение специальной работоспособности» [4, с. 118]. В.Б. Иссурин отмечает, что «современная система спортивной подготовки должна учитывать закономерности долговременной адаптации организма к специфическим нагрузкам, проявляющиеся в структурно-функциональных перестройках различных физиологических систем» [5, с. 105].

Морфофункциональные детерминанты, согласно позиции Ю.Н. Кузнецова, представляют собой «совокупность морфологических, биохимических и функциональных показателей организма, определяющих направленность и эффективность адаптационных реакций на тренировочные и соревновательные нагрузки» [7, с. 72].

Исследования морфофункционального статуса в комплексных видах спорта демонстрируют специфические особенности адаптационных перестроек. А.С. Мозжухин указывает: «Полиатлон как многоборный вид спорта требует комплексного развития различных физических качеств — силы, выносливости, координации, что отражается в уникальном профиле морфофункциональных характеристик спортсменов» [8, с. 43]. Э.В. Науменко подчеркивает значимость «системного подхода к оценке функционального состояния полиатлонистов, включающего мониторинг показателей кардиореспираторной системы, нервно-мышечного аппарата и вегетативной регуляции» [9]. А.А. Новиков отмечает, что «индивидуализация тренировочного процесса на основе объективных морфофункциональных критериев является необходимым условием достижения высоких спортивных

результатов в современном спорте» [10, с. 104]. С. Норрис в своих исследованиях демонстрирует, что «специфика энергообеспечения мышечной деятельности в полиатлоне характеризуется сочетанием анаэробных алактатных, анаэробных гликолитических и аэробных механизмов, что требует соответствующих адаптационных перестроек метаболизма» [11, с. 252].

О.А. Ревтова указывает на важность учета «половозрастных особенностей адаптационных реакций у спортсменок, проявляющихся в специфике морфофункциональных изменений на различных этапах многолетней подготовки» [14, с. 482]. А.Ю. Кейно отмечает, что «этапы многолетней подготовки полиатлонистов характеризуются последовательным увеличением объема и интенсивности специфических нагрузок, сопровождающимся закономерными изменениями морфофункционального статуса» [6, с. 61].

Результаты исследования

Анализ морфологических показателей полиатлонисток различных этапов подготовки выявил закономерные изменения компонентного состава тела, отражающие специфику адаптационных перестроек (таблица 1).

Таблица 1.

Морфофункциональные детерминанты специальной адаптации полиатлонисток на этапах многолетней подготовки

Показатель	Группа 1 (14–16 лет)	Группа 2 (17–19 лет)	Группа 3 (20–23 года)	Группа 4 (24–30 лет)	p
Активная клеточная масса, кг	29,8±2,1	36,6±2,4	43,5±2,8	50,3±3,2	<0,05
Мышечная масса, кг	19,6±1,8	25,6±2,1	31,4±2,6	37,7±3,1	<0,05
Ударный объем крови, мл	78,8±6,4	95,8±8,2	112,4±9,6	129,9±10,8	<0,05
Сердечный индекс, л/мин×м^2	3,3±0,4	3,8±0,5	4,3±0,5	4,8±0,5	<0,05
ЖЕЛ, мл	3650±185	4285±220	4720±248	5120±272	<0,05
Силовой индекс правой кисти, %	50,8±4,1	62,4±5,2	70,8±6,0	79,0±6,8	<0,05
Время реакции выбора, мс	420,3±28,4	395,2±26,8	370,5±25,6	344,9±24,7	<0,05

*составлено автором

Активная клеточная масса продемонстрировала прогрессивное увеличение от первой к четвертой группе: 29,8±2,1 кг, 36,6±2,4 кг, 43,5±2,8 кг и 50,3±3,2 кг соответственно (p <0,05), что свидетельствует о гипертрофических процессах в метаболически активных тканях под влиянием систематических тренировочных нагрузок. Мышечная масса также демонстрировала статистически значимое увеличение: 19,6±1,8 кг у спортсменок первой группы, 25,6±2,1 кг во второй группе, 31,4±2,6 кг в третьей группе и 37,7±3,1 кг в четвертой группе (p <0,05). Особый интерес представляет анализ мышечной массы верхних конечностей, имеющей непосредственное значение для выполнения силового компонента троеборья — подтягивания на перекладине: мышечная масса правой руки составила 1,9±0,2 кг, 2,4±0,3 кг, 2,9±0,3 кг и 3,5±0,4 кг; мышечная масса левой руки — 1,6±0,2 кг, 2,2±0,3 кг, 2,7±0,3 кг и 3,5±0,4 кг соответственно группам (p<0,05).

Функциональные показатели кардиореспираторной системы отражали специфику адаптации к комбинированным нагрузкам аэробно-анаэробной направленности. Показатели центральной гемодинамики демонстрировали экономизацию деятельности сердечно-сосудистой системы: ударный объем крови увеличивался от 78,8±6,4 мл до 129,9±10,8 мл (p<0,05), ударный индекс — от 48,8±4,2 мл/м^2 до 75,9±6,5 мл/м^2 (p<0,05), минутный объем крови — от 5,2±0,6 л/мин до 8,3±0,9 л/мин (p<0,05), сердечный индекс — от 3,3±0,4 л/мин×м^2 до 4,8±0,5 л/мин×м^2 (p<0,05). Гипоксические пробы отражали повышение устойчивости к кислородной недостаточности: проба Штанге увеличивалась от 48,2±5,3 с до 72,1±4,9 с (p <0,05), проба Генчи — от 28,6±3,2 с до 44,3±4,0 с (p<0,05).

Силовые показатели верхних конечностей, критичные для выполнения силового компонента троеборья, демонстрировали закономерное увеличение на этапах многолетней подготовки. Динамометрия правой кисти составила 31,8±3,6 кг, 39,1±4,0 кг, 46,5±4,8 кг и 53,8±5,2 кг в группах с первой по четвертую соответственно (p<0,05); динамометрия левой кисти — 30,2±3,4 кг, 37,8±3,9 кг, 44,6±4,6 кг и 51,2±5,0 кг (p<0,05). Силовой индекс правой кисти изменялся от 50,8±4,1 % до 79,0±6,8 % (p <0,05), силовой индекс левой кисти — от 48,2±3,9 % до 75,3±6,5 % (p <0,05), что отражает не только абсолютное увеличение силовых возможностей, но и оптимизацию соотношения силы к массе тела.

Психомоторные показатели, имеющие значение для стрелкового компонента троеборья и координационной структуры двигательных действий, также демонстрировали положительную динамику. Время реакции выбора сокращалось от 420,3±28,4 мс в первой группе до 344,9±24,7 мс в четвертой группе (p <0,05), отражая совершенствование процессов переработки информации и принятия двигательного решения.

Корреляционный анализ выявил статистически значимые взаимосвязи между морфофункциональными показателями и компонентами соревновательного результата. Активная клеточная масса демонстрировала сильную положительную корреляцию с общим количеством набранных очков (r=0,850, p <0,01), мышечная масса — с результатами в силовой гимнастике (r=0,827, p <0,01) и лыжной гонке (r=0,611, p <0,05). Показатели центральной гемодинамики коррелировали с результативностью в лыжном компоненте: ударный объем крови (r=0,836, p <0,01), ударный индекс (r=0,843, p <0,01), минутный объем крови (r=0,704, p <0,01), сердечный индекс (r=0,636, p <0,05). Психомоторные параметры демонстрировали отрицательную корреляцию с результатами в стрельбе: время реакции выбора (r=–0,731, p <0,01), время реакции на звук ногой (r=–0,512, p <0,05), и положительную — теппинг-тест рукой (r=0,671, p <0,05).

Обсуждение

Полученные результаты свидетельствуют о закономерных морфофункциональных перестройках организма полиатлонисток в процессе многолетней спортивной подготовки, отражающих специфику адаптации к комбинированным нагрузкам аэробно-анаэробной и координационно-силовой направленности. Прогрессивное увеличение активной клеточной массы и мышечной массы на этапах многолетней подготовки соответствует концепции долговременной адаптации, сформулированной Ф.З. Меерсоном и развитой применительно к спортивной деятельности Н.А. Агаджаняном [1, с. 105]. Согласно этой концепции, систематические тренировочные воздействия индуцируют активацию синтеза нуклеиновых кислот и белков в наиболее нагруженных функциональных системах, что приводит к структурным изменениям на клеточном и органном уровнях. В.Н. Платонов отмечает, что «морфологические изменения скелетных мышц у спортсменов высокой квалификации включают гипертрофию мышечных волокон, увеличение капилляризации, повышение митохондриальной плотности и активности окислительных ферментов» [13, с. 156].

Этапность морфофункциональных изменений в процессе многолетней подготовки отражает закономерности возрастного развития и специфику адаптационных реакций на систематические тренировочные воздействия различной направленности. О.А. Ревтова подчеркивает: «Учет биологического возраста и индивидуального темпа развития спортсменок является необходимым условием рациональной организации тренировочного процесса и профилактики состояний перетренированности и дезадаптации» [14, с. 486]. Э.В. Науменко указывает на важность «системного подхода к оценке функционального состояния организма спортсменок, включающего не только морфологические и функциональные параметры, но и показатели вегетативной регуляции, гормонального статуса и иммунной резистентности» [9]. В.Б. Иссурин отмечает, что «современная концепция спортивной подготовки предполагает использование блоковой периодизации с концентрацией специализированных нагрузок, что требует точного дозирования тренировочных воздействий на основе объективного контроля морфофункционального статуса» [5, с. 264].

Заключение

Проведенное исследование позволило установить морфофункциональные детерминанты специальной адаптации функциональных систем полиатлонисток на этапах многолетней подготовки, включающие морфологические параметры (активная клеточная масса, мышечная масса сегментов тела, силовые индексы), функциональные показатели кардиореспираторной системы (ударный и минутный объем крови, сердечный индекс, жизненная емкость легких, гипоксические пробы) и психомоторные характеристики (время сложной реакции, показатели теппинг-теста). Выявленные закономерности морфофункциональных изменений отражают специфику долговременной адаптации к комбинированным нагрузкам аэробно-анаэробной, силовой и координационной направленности, характерным для соревновательной деятельности в полиатлоне. Установленные корреляционные взаимосвязи между морфофункциональными показателями и компонентами соревновательного результата обосновывают их использование в качестве критериев специальной работоспособности и эффективности тренировочного процесса.

Практическое значение исследования заключается в возможности использования выявленных морфофункциональных детерминант для оптимизации системы многолетней подготовки полиатлонисток, включая спортивный отбор, планирование тренировочных нагрузок и текущий контроль функционального состояния. Количественные характеристики морфофункционального статуса спортсменок высшей квалификации могут служить модельными ориентирами для полиатлонисток более ранних этапов подготовки, обеспечивая целенаправленное развитие необходимых морфофункциональных предпосылок специальной работоспособности. Комплексный подход к оценке морфофункционального статуса с учетом специфики вида спорта и этапа многолетней подготовки создает объективную основу для реализации принципов индивидуализации и рационализации тренировочного процесса в полиатлоне.

Таким образом, морфофункциональные детерминанты специальной адаптации функциональных систем полиатлонисток на этапах многолетней подготовки представляют собой интегративный комплекс морфологических, функциональных и психомоторных характеристик, закономерно изменяющихся под влиянием

систематических тренировочных воздействий специфической направленности. Прогрессивное увеличение активной клеточной массы, мышечной массы, показателей кардиореспираторной системы и улучшение психомоторных параметров отражают формирование устойчивой долговременной адаптации, обеспечивающей высокую специальную работоспособность в условиях комбинированных нагрузок полиатлона. Выявленные детерминанты могут использоваться в качестве объективных критериев для управления тренировочным процессом, индивидуализации подготовки и прогнозирования спортивной результативности полиатлонисток различных этапов многолетней спортивной подготовки. Дальнейшие исследования целесообразно направить на изучение биохимических и молекулярно-генетических механизмов специальной адаптации полиатлонисток, что позволит углубить понимание физиологических основ спортивного мастерства в данном виде спорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агаджанян Н.А. Проблемы адаптации и учение о здоровье / Н.А. Агаджанян, Р.М. Баевский, А.П. Берсенева. М., 2006. 288 с.
2. Верхошанский Ю.В. На пути к научной теории и методологии спортивной тренировки / Ю.В. Верхошанский // Теория и практика физической культуры. 1998. № 2 — С. 21.
3. Гильмутдинов Т.С. Исследование научной обоснованности соответствия условий и требований единой Всероссийской спортивной классификации для выполнения спортивных званий и разрядов в многоборьях полиатлона / Т.С. Гильмутдинов, В.А. Козлов, Н.П. Иванова // Наука и спорт: современные тенденции. 2019 — Т.7. № 2 — С. 30–39
4. Давиденко Д.Н. Методологические подходы к исследованию функциональных резервов спортсменов / Д.Н. Давиденко // Физиол. пробл. адаптации. Тарту: Минвуз СССР, 1984. С. 118–119.
5. Иссурин В.Б. Подготовка спортсменов XXI века: научные основы и построение тренировки / В.Б. Иссурин. М.: Спорт, 2016. 464 с.
6. Кейно А.Ю. Пути повышения эффективности многолетней подготовки полиатлонистов высшего спортивного мастерства / А.Ю. Кейно, Д.А. Родимкин // Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки. 2018. Т.23. № 1 (171). С. 61–67.
7. Кузнецов Ю.Н. Общая теория функциональных систем как теоретико-методологическая основа педагогической системы обеспечения качества / Ю.Н. Кузнецов // Педагогика и просвещение. 2021. № 1. С. 72–80.
8. Мозжухин А.С. Характеристика функциональных резервов человека / А.С. Мозжухин // Пробл. резерв. возможностей человека. М.: Всесоюз. НИИ физ. культуры, 1982. С. 43–50.
9. Науменко Э.В. Комплексный контроль функционального состояния атлетов / Э.В. Науменко, А.Ю. Бутов, Д.Д. Дальский // Спортивная медицина. Здоровье и физическая культура [Электронный ресурс]: материалы Всерос. (с междунар. участием) науч.-практ. конф., провед. в рамках Конгресса «Медицина спорта. Сочи-2012», (Сочи, 20–23 июня 2012 г.) / Волгоград. гос. ун-т. Электрон. дан. Волгоград, 2012. –1 электрон. опт. диск (CD-ROM) (Дата обращения: 08.06.2021).
10. Новиков А.А. Основы спортивного мастерства: монография / А.А. Новиков. М.: Советский спорт, 2012. 256 с.
11. Норрис С. Физиология / С. Норрис, Д. Смит // Спорт. медицина. К.: Олимп. лит., 2003. С. 252–264.
12. Платонов В.Н. Общая теория подготовки спортсменов в олимпийском спорте: учеб. для студ. вузов физ. воспитания и спорта / В.Н. Платонов. К.: Олимп. лит., 1997.
13. Платонов В.Н. Система подготовки спортсменов в олимпийском спорте. Общая теория и ее практическое применение: учеб. для студ. вузов физ. воспитания и спорта / В.Н. Платонов. К.: Олимп. лит., 2004. 808 с.
14. Ревтова О.А. Влияние спорта на нервную систему человека. // Научное сообщество студентов. Междисциплинарные исследования. Электронный сборник статей по материалам XLII международной студенческой научно-практической конференции. Новосибирск: Ассоциация научных сотрудников «Сибирская академическая книга», 2018. С. 482–486.
15. Судаков К.В. Физиология. Основы и функциональные системы / К.В. Судаков. М.: Медицина, 2000. 784 с.
16. Шептикина Т.С., Сентябрев, Н.Н., Шептикин, С.А. Теория функциональных систем как универсальная концепция организации спортивной подготовки / Т.С. Шептикина, Н.Н. Сентябрев, С.А. Шептикин // Физическая культура. Спорт. Туризм. Двигательная реакция. 2024. Т. 9, № 1. С. 58–66.

© Романова Дина Андреевна (din.romanova2016@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.02

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ПОДХОДОВ И МЕТОДОВ ОБУЧЕНИЯ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ: ОТ ТРАНСФОРМЕРНОЙ РЕВОЛЮЦИИ К НОВОЙ ПАРАДИГМЕ ЭФФЕКТИВНОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

ANALYSIS OF MODERN FUNDAMENTAL ARCHITECTURAL APPROACHES AND METHODS FOR TRAINING LARGE LANGUAGE MODELS: FROM THE TRANSFORMER REVOLUTION TO A NEW PARADIGM OF EFFECTIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE

V. Belov
S. Nikishov

Summary. This article presents a comprehensive analysis of the current state of research in the field of Large Language Models (LLMs). It examines the evolution of fundamental architectural solutions from the classical transformer to modern specialized approaches: decoder models with effective attention mechanisms, Mixture of Experts, and multimodal architectures. This book provides a detailed analysis of modern learning methods, including optimal scaling according to Chincha's law, advanced approaches to training data curation, methods for aligning with human preferences (RLHF, DPO), and effective fine-tuning strategies (PEFT, LoRA). Key trends are identified: the shift from extensive parameter augmentation to intelligent architecture design, the democratization of access through open models, and the shift toward next-generation multimodal systems. Particular attention is given to promising research areas, including state-space models for infinite contexts and hybrid architectures.

Keywords: large language models, transformer architecture, mixed experts, multimodal learning, AI alignment, efficient fine-tuning, long context, open models.

Белов Вячеслав Викторович
Аспирант, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, г. Москва
slavabelov@fasthome.net
Никишов Сергей Иванович
Доктор экономических наук, доцент, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, г. Москва
nikishov-si@ranepa.ru

Аннотация. Статья представляет собой комплексный анализ современного состояния исследований в области больших языковых моделей (Large Language Models, LLM). Рассматривается эволюция фундаментальных архитектурных решений от классического трансформера до современных специализированных подходов: декодер-моделей с эффективными механизмами внимания, смешанных экспертных систем (Mixture of Experts) и мультимодальных архитектур. Детально анализируются современные методы обучения, включая оптимальное масштабирование согласно закону Чинча, передовые подходы к курированию обучающих данных, методы выравнивания с человеческими предпочтениями (RLHF, DPO) и эффективные стратегии тонкой настройки (PEFT, LoRA). Выявляются ключевые тренды: переход от экстенсивного увеличения параметров к интеллектуальному проектированию архитектур, демократизация доступа через открытые модели и сдвиг в сторону создания мультимодальных систем нового поколения. Особое внимание уделяется перспективным направлениям исследований, включая модели с состоянием (State-Space Models) для бесконечного контекста и гибридные архитектуры.

Ключевые слова: большие языковые модели, архитектура трансформера, смешанные эксперты, мультимодальное обучение, выравнивание ИИ, эффективная тонкая настройка, длинный контекст, открытые модели.

Введение

За последние пять лет область обработки естественного языка претерпела революционные изменения, обусловленные появлением и стремительным развитием больших языковых моделей (LLM). Эти модели, основанные на трансформерной архитектуре, продемонстрировали беспрецедентные способности в генерации связного текста, решении сложных логических задач и понимании смысловых нюансов. Однако современный этап развития LLM характеризуется не только количественным ростом параметров, но и качественной трансформацией архитектурных подходов и методологии обучения.

Несмотря на их повсеместное внедрение и значительное влияние на различные секторы, глубокое понимание особенностей их архитектуры и методов обучения, лежащих в основе их функциональности, а также системный анализ перспектив их применения в широ-

ком спектре отраслей, остается ключевой задачей для специалистов и исследователей. Сложность внутренних механизмов этих моделей, их масштабируемость и непрерывное развитие требуют постоянного осмысления и актуализации знаний.

Настоящая статья ставит целью систематизировать и проанализировать современные фундаментальные архитектурные подходы и методы обучения LLM, выявив ключевые тенденции и перспективные направления исследований. Актуальность работы обусловлена необходимостью осмысления перехода от парадигмы «чем больше, тем лучше» к более сбалансированной стратегии, сочетающей интеллектуальный дизайн архитектуры, оптимальное использование данных и обеспечение надежности моделей.

Эволюция архитектурных подходов

Трансформерная архитектура как базис

Фундаментальной основой всех современных LLM остается архитектура трансформера, предложенная в 2017 году. Её ключевое отличие от предшественников (RNN, LSTM) — механизм самовнимания (self-attention), позволяющий модели одновременно анализировать все токены входной последовательности, вычисляя взвешенные зависимости между ними. Это устраняет проблему исчезающих градиентов и обеспечивает эффективное распараллеливание вычислений.

Специализация архитектур: от универсальности к целевой оптимизации

Эволюция LLM привела к формированию трех доминирующих архитектурных парадигм:

1. Декодер-архитектуры (авторегрессионные модели): GPT-серия, LLaMA, PaLM. Оптимизированы для задач генерации текста. Ключевые инновации сосредоточены в области эффективного кодирования позиционной информации:
— Rotary Positional Embeddings (RoPE) [3] — метод позиционного кодирования, использующий вращающиеся матрицы для лучшего улавливания относительных позиций токенов.
— ALiBi (Attention with Linear Biases) — добавляет линейный штраф к вниманию в зависимости от расстояния между токенами, обеспечивая экстраполяцию на контексты, превышающие обучающие.
— Grouped-Query Attention (GQA) — компромисс между точностью и эффективностью, группируя запросы для снижения требований к памяти при инференсе.
2. Смешанные экспертные модели (Mixture of Experts, MoE): Mixtral, Switch Transformer. Представляют качественный скачок в архитектурном дизайне.

Вместо одного полносвязного слоя (FFN) в каждом трансформерном блоке используется множество «экспертов» — меньших подмоделей. Для каждого токена динамически активируется лишь небольшое подмножество экспертов через механизм маршрутизации (router). Это позволяет увеличивать общее число параметров модели до триллионов при линейном росте вычислительных затрат на инференс.

3. Мультимодальные архитектуры: Flamingo, GPT-4V, Gemini. Решают задачу интеграции различных типов данных (текст, изображение, аудио). Выделяются два основных подхода:
— Раннее слияние: Проекция патчей изображения или аудио-сегментов в пространство текстовых токенов с последующей обработкой единой трансформерной моделью.
— Позднее слияние: Использование отдельных специализированных энкодеров для каждой модальности с последующим объединением их представлений на более глубоких уровнях.
— Современный тренд — создание моделей, изначально обучаемых на мультимодальных потоках, что обеспечивает более глубокое семантическое взаимодействие между разными типами информации.

Современные парадигмы обучения

Предобучение: от масштабирования к курированию данных

Закон Чинча (Chinchilla) [5] стал поворотным моментом, доказав, что оптимальная эффективность достигается при согласованном масштабировании размера модели (N параметров) и объема обучающих данных (~20N токенов). Это сместило фокус сообщества с простого увеличения моделей к тщательному отбору данных.

Ключевые принципы современного предобучения:
— Качество над количеством: Использование многоуровневых пайплайнов фильтрации для удаления низкокачественного, дублированного и вредоносного контента. Проекты типа RefinedWeb демонстрируют, что тщательно отфильтрованные данные позволяют меньшим моделям превосходить более крупные, обученные на необработанных корпусах.
— Баланс доменов: Стратегическое составление датасетов из научных статей, книг, кодексов, диалогов и других источников для формирования широких компетенций.
— Вычислительная оптимизация: Повсеместное внедрение смешанной точности (bfloat16), эффективных оптимизаторов (AdamW, LION) и продвинутых расписаний скорости обучения.

Выравнивание с человеческими ценностями: RLHF и его альтернативы

Предобученная модель, хотя и обладает энциклопедическими знаниями, часто генерирует нежелательные, несвязные или опасные ответы. Решение этой проблемы — этап выравнивания (alignment).

Классический подход — RLHF (Reinforcement Learning from Human Feedback):

1. Supervised Fine-Tuning (SFT): Тонкая настройка на высококачественных диалогах «инструкция-ответ».
2. Обучение модели вознаграждения (Reward Model): На основе парных сравнений ответов людьми-аннотаторами.
3. Обучение с подкреплением (PPO): Оптимизация политики модели для максимизации оценки от модели вознаграждения.

Прямая оптимизация предпочтений (DPO — Direct Preference Optimization) [6] — революционная альтернатива, устраняющая сложный этап RL. DPO напрямую оптимизирует политику модели, используя теорему о двойственности, что обеспечивает сравнимую эффективность при большей стабильности и простоте реализации. Развитие этого направления включает методы IPO (Identity Preference Optimization) и KTO (Kahneman-Tversky Optimization), решающие проблемы переобучения.

Эффективная адаптация: Parameter-Efficient Fine-Tuning (PEFT)

Прямая тонкая настройка моделей с миллиардами параметров требует непомерных вычислительных ресурсов. PEFT методы решают эту проблему:

— LoRA (Low-Rank Adaptation) [7] — добавление к матрицам весов адаптивных низкоранговых разложений, обучаемых при замороженной основной модели. Стал стандартом де-факто в сообществе.
— QLoRA — комбинация LoRA с 4-битной квантизацией, позволяющая адаптировать модели с 70B+ параметров на одном потребительском GPU.
— Adapter Layers — встраивание компактных дополнительных слоев между основными блоками трансформера.

Эти методы не только делают адаптацию LLM доступной, но и позволяют создавать «модели-шедефы» — единую базовую модель с множеством специализированных легковесных адаптеров для различных задач.

Ключевые тренды и перспективные направления

Смена парадигмы: от масштабирования к эффективности

Наблюдается четкий тренд: доминирование относительно компактных (7B-70B параметров) моделей, которые при оптимальном обучении и качественной адаптации конкурируют с гигантскими системами предыдущего поколения. Примеры — семейства LLaMA 3, Mistral и Qwen.

Демократизация через открытые модели

Появление мощных открытых LLM (LLaMA, Falcon, Mistral) и их активное развитие сообществом создали альтернативу закрытым коммерческим моделям. Это ускоряет инновации, повышает прозрачность и снижает порог входа для исследователей.

Архитектурные инновации для длинного контекста

Обработка длинных последовательностей (100K+ токенов) остается вычислительной проблемой для классического самовнимания (квадратичная сложность). Перспективные решения:

— Алгоритмические оптимизации: FlashAttention, эффективно использующий иерархию памяти GPU.
— Архитектурные нововведения: State-Space Models (SSM), в частности Mamba с линейной сложностью относительно длины контекста.
— Гибридные подходы (трансформер + SSM), как в модели Jamba, сочетают сильные стороны обоих подходов.

Мультимодальность как основа следующего поколения ИИ

Будущие модели будут не просто «понимать» разные модальности, а изначально обучаться на их совместном представлении. Это требует новых архитектурных решений для эффективного взаимодействия между текстом, изображением, звуком и структурированными данными.

Повышение надежности и снижение галлюцинаций

Критически важное направление для практического применения:

— RAG (Retrieval-Augmented Generation): Гибридный подход, сочетающий генеративные способности LLM с доступом к внешним базам знаний.
— Контролируемая генерация и верификация выводов: Методы, позволяющие модели проверять свои утверждения и генерировать ответы с цитированием источников.
— Пошаговое рассуждение (Chain-of-Thought): Стимулирование модели к эксплицитному формулированию промежуточных шагов решения.

Контекстуализация и инструментальное расширение: LLM как ядро агентных систем

Современные LLM перестают быть изолированными генераторами текста, превращаясь в когнитивные ядра

автономных агентов, способных планировать, взаимодействовать с инструментами и окружением.

Архитектурные и методологические аспекты:

— Архитектура «Размышление-Действие-Наблюдение» (Reasoning-Acting-Observation): Модель функционирует в цикле, где на шаге размышления формулирует план, на шаге действия — выбирает и вызывает внешний инструмент (калькулятор, поиск в интернете, API, исполнитель кода), а на шаге наблюдения — анализирует результат и корректирует дальнейшие действия. Это требует архитектурных расширений для работы с «функциональными токенами» и обработки структурированных ответов от инструментов.
— Специализированное обучение и тонкая настройка: Для надежного использования инструментов применяются:
— Обучение с подкреплением для выбора инструмента (Tool-Use RL).
— Синтетическая генерация данных вызовов функций и их результатов.
— Обучение в симулированных средах, где модель получает обратную связь от «исполнителя».

Этот метод кардинально расширяет применимость LLM за пределы текстовой сферы, превращая их в универсальные интерфейсы для решения практических задач в реальном мире (робототехника, научное discovery, автоматизация бизнес-процессов). Он ставит новые исследовательские вопросы об архитектуре, надежности, долгосрочном планировании и безопасности автономных систем на основе LLM.

Устойчивое развитие и экономика LLM: фокус на энергоэффективность и специализацию

Экспоненциальный рост вычислительных затрат на обучение и инференс LLM делает вопросы их экономической и экологической устойчивости критически важными.

Ключевые направления:

— Специализированные «малые» модели: Создание узкоспециализированных моделей с 1-10B параметров, которые по качеству в своей предметной области превосходят гигантские универсальные модели. Обучение таких моделей требует на порядки меньше энергии и вычислительных ресурсов.
— Алгоритмическая и аппаратная ко-оптимизация:

1. Квантизация и дистилляция: Развитие методов посттрейновой квантизации (INT4, INT8) и дистилляции знаний для развертывания легковесных версий больших моделей без потери качества.
2. Специализированные процессоры: Разработка аппаратного обеспечения (например, нейроморфные чипы, ускорители с поддержкой низкоранговых адаптаций), оптимизированного под специфику нагрузок LLM (матричные умножения, внимание).
3. Экономические модели LLM: Анализ Total Cost of Ownership (TCO) для моделей разных масштабов, включая стоимость предобучения, адаптации, инференса и обслуживания. Это смещает бизнес-фокус с обладания самой большой моделью к оптимизации ROI (Return on Investment) от внедрения ИИ.

Это нововведение переводит область из фазы чистого исследования в фазу ответственной индустриализации. Без решения проблем энергопотребления и экономической целесообразности широкое внедрение LLM в промышленность станет невозможным. Акцент на эффективность также стимулирует инновации в области алгоритмов и микроархитектуры, делая технологии более доступными и снижая их углеродный след.

Выводы и результаты

Проведенный анализ позволяет сформулировать следующие ключевые выводы относительно современного состояния и траекторий развития больших языковых моделей:

1. Произошел качественный сдвиг от экстенсивного к интеллектуальному масштабированию. Доминирующей парадигмой стало не просто увеличение количества параметров, а комплексная оптимизация, включающая: а) соблюдение закона Чинча для баланса между размером модели и объемом данных; б) архитектурные инновации (MoE, эффективное внимание), повышающие вычислительную эффективность; в) бескомпромиссное курирование и фильтрация обучающих датасетов. Результатом стало появление относительно компактных моделей (7B-70B параметров), чьи практические возможности сопоставимы с гигантскими системами предыдущего поколения.
2. Архитектурный ландшафт диверсифицировался, породив специализированные семейства моделей. Трансформерная архитектура перестала быть монолитом, эволюционировав в несколько высокооптимизированных направлений: авторегрессионные декодеры с длинным контекстом (Llama, GPT), разреженные смешанные экспертные системы (Mixtral) для эффективного масштабирования и мультимодальные модели (GPT-4V, Gemini) нового поколения. Это указывает на переход от поиска универсальной архитектуры к созданию специализированных решений под конкретные классы задач.
3. Методология обучения и адаптации моделей достигла высокой степени зрелости, сделав технологии доступными. Сформировался стан-

дартизированный пайплайн: предобучение на отфильтрованных данных → инструктивная настройка → выравнивание с человеческими предпочтениями (где революционный метод DPO составляет конкуренцию классическому RLHF). Критическим фактором демократизации стали методы параметрически-эффективной тонкой настройки (PEFT), прежде всего LoRA и QLoRA, позволившие адаптировать модели с миллиардами параметров на минимальных вычислительных ресурсах. Результатом стал взрывной рост открытых моделей и сообществ вокруг них.

4. Определились новые стратегические векторы исследований, формирующие повестку следующего этапа. Анализ выявил несколько приоритетных направлений:

— Преодоление «проклятия квадратичного внимания» через алгоритмы (FlashAttention) и принципиально новые архитектуры, такие как State-Space Models (Mamba), с линейной сложностью.

— Контекстуализация LLM как агентных систем, способных к планированию и использованию инструментов, что трансформирует их роль из генераторов текста в автономные решатели задач.

— Фокус на устойчивость и эффективность, включающий разработку энергоэффективных специализированных моделей, методов квантизации и создание соответствующего аппаратного обеспечения, что является обязательным условием для широкой индустриализации технологий.

— Системное решение проблемы надежности через гибридные парадигмы (RAG), верификацию выводов и пошаговое рассуждение, что критически важно для ответственного внедрения в чувствительные области (медицина, финансы, юриспруденция).

Область больших языковых моделей вышла из начальной фазы «лабораторного прорыва» в стадию зрелой технологической дисциплины. Основные усилия смещаются с достижения рекордных показателей на бенчмарках к созданию эффективных, управляемых, безопасных и экономически целесообразных систем, интегрируемых в реальные процессы и продукты. Будущее развитие будет определяться не столько масштабом, сколько глубиной интеграции ИИ в человеко-машинные системы и его способностью действовать как надежный и понятный интеллектуальный партнер.

Заключение

Современный этап развития больших языковых моделей характеризуется переходом от экстенсивного роста к качественной оптимизации всех компонентов системы: архитектуры, данных и методов обучения. Доминирующими трендами становятся интеллектуальный дизайн специализированных архитектур (MoE, гибридные модели), приоритет качества данных над их объемом, развитие эффективных и устойчивых методов выравнивания (DPO) и демократизация технологий через открытые модели.

Перспективные направления исследований включают создание архитектур для бесконечно длинного контекста (SSM), разработку по-настоящему интегрированных мультимодальных систем и повышение надежности моделей через гибридные подходы (RAG) и верификацию. Эти тенденции формируют новую парадигму искусственного интеллекта, в которой эффективность, прозрачность и надежность становятся не менее важными, чем генеративные способности.

Перспективные направления исследований включают создание архитектур для бесконечно длинного контекста (SSM), разработку по-настоящему интегрированных мультимодальных систем и повышение надежности моделей через гибридные подходы (RAG). Особое значение приобретают две взаимосвязанные парадигмы: превращение LLM в ядра автономных агентных систем, способных к планированию и использованию инструментов, и фокус на устойчивое развитие, требующий ко-оптимизации алгоритмов, архитектур и аппаратного обеспечения для снижения экономических и экологических издержек. Эти тенденции формируют новую парадигму искусственного интеллекта, в которой эффективность, прозрачность, надежность и практическая применимость становятся не менее важными, чем генеративные способности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vaswani A. et al. Attention Is All You Need // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). — 2017. — Т. 30. — Фундаментальная работа, вводящая архитектуру Трансформера.
2. Devlin J. et al. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding // Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics (NAACL). — 2019. — С. 4171–4186. — Классическая работа по двунаправленным трансформерным моделям.
3. Brown T.B. et al. Language Models are Few-Shot Learners // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). — 2020. — Т. 33. — С. 1877–1901. — Статья о GPT-3, демонстрирующая свойства масштабирования и немногих примеров.
4. Radford A. et al. Improving Language Understanding by Generative Pre-Training // OpenAI Technical Report. — 2018. — Первая значительная работа по GPT, описывающая парадигму предобучения-дообучения.

5. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning // Nature. — 2015. — Т. 521. — № 7553. — С. 436–444. — Фундаментальный обзор по глубокому обучению, полезный для контекста.
6. Joulin A. et al. Bag of Tricks for Efficient Text Classification // Proceedings of the 15th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics (EACL). — 2017. — С. 427–431. — Более ранняя, но важная работа по эффективным методам для текста.
7. Howard J., Ruder S. Universal Language Model Fine-tuning for Text Classification // Proceedings of the 56th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL). — 2018. — С. 328–339. — Введение метода ULMFiT, важный этап в развитии тонкой настройки.
8. Митрохин Д.А., Астафьева А.С. Нейронные сети для обработки естественного языка: от RNN к Transformer // Труды института системного программирования РАН. — 2020. — Т. 32. — № 2. — С. 37–52. — Российский обзор эволюции архитектур для NLP.
9. Соколов И.В., Тутубалина О.В. Применение архитектуры Transformer для автоматического реферирования текстов на русском языке // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2020. — № 1. — С. 45–56. — Российское исследование применения трансформеров для конкретной задачи.
10. Луценко Е.В., Клековкин А.С. Сравнительный анализ методов предобучения языковых моделей для русского языка // Программные продукты и системы. — 2020. — Т. 33. — № 4. — С. 652–660. — Сравнительный анализ BERT, GPT и их модификаций для русского языка.
11. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory // Neural Computation. — 1997. — Т. 9. — № 8. — С. 1735–1780. — Классическая работа по LSTM, важная для понимания предшественников Трансформера.
12. Bahdanau D., Cho K., Bengio Y. Neural Machine Translation by Jointly Learning to Align and Translate // International Conference on Learning Representations (ICLR). — 2015. — Введение механизма внимания в seq2seq модели.
13. Kingma D.P., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization // International Conference on Learning Representations (ICLR). — 2015. — Описание оптимизатора Adam, ставшего стандартом.
14. Sutskever I., Vinyals O., Le Q.V. Sequence to Sequence Learning with Neural Networks // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). — 2014. — Т. 27. — Фундаментальная работа по архитектуре seq2seq.
15. Мельник М.С., Потапов М.А. Глубокое обучение в задачах обработки текстовой информации: учебное пособие // М.: Издательский дом МЭИ. — 2019. — 150 с. — Российское учебное пособие, охватывающее основные методы, включая RNN и Transformer.
16. Papers with Code — State of the Art (SOTA) in Language Modeling [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://paperswithcode.com/task/language-modelling (дата обращения: 20.10.2025). — Актуальная подборка state-of-the-art моделей и методов с кодом и бенчмарками.
17. Hugging Face — Transformers Documentation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://huggingface. co/docs/transformers/index (дата обращения: 5.11.2025). — Исчерпывающая документация, учебные пособия и модель-хаб для самых современных архитектур.
18. Архив препринтов arXiv (Категория cs.CL) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://arxiv.org/list/cs.CL/recent (дата обращения: 20.11.2025). — Первичный источник самых свежих научных статей по компьютерной лингвистике и NLP.
19. Stanford CS224N: Natural Language Processing with Deep Learning — Course Materials and Lectures [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://web.stanford.edu/class/cs224n/ (дата обращения: 5.12.2025). — Лекции одного из ведущих курсов, охватывающие фундаментальные и современные темы, включая Transformer, BERT, GPT.
20. Towards Data Science / Machine Learning Mastery — Статьи и туториалы по NLP и Transformer [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://towardsdatascience.com/search?q=transformer / https://machinelearningmastery.com/?s=transformer (дата обращения: 18.12.2025). — Популярные платформы с большим количеством разъясняющих статей, визуализаций и практических руководств по ключевым концепциям, описанным в статье.

© Белов Вячеслав Викторович (slavabelov@fasthome.net); Никишов Сергей Иванович (nikishov-si@ranepa.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.03

ОЦЕНКА ОТКЛОНЕНИЯ ОТ НОРМАЛЬНОГО ЗАКОНА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ПРЕДЕЛЬНОЙ ТЕОРЕМЕ

ESTIMATION OF THE DEVIATION FROM THE NORMAL LAW IN THE CENTRAL LIMIT THEOREM

I. Bessarabskaya

Summary. This work investigates the rate of convergence in the Central Limit Theorem for sums of independent and identically distributed random variables. Numerical experiments are conducted for the uniform, exponential, and beta distributions to evaluate the Kolmogorov distance between the distribution of the standardized sum and the standard normal law for various numbers of summands. A logarithmic regression approach is used to estimate the convergence order and a empirical analogue of the Berry–Esseen constant. The obtained estimates are consistent with the leading terms of the Edgeworth expansion and demonstrate the influence of the asymmetry of the underlying distribution on the rate of normal approximation. The proposed approach provides quantitative characteristics of the asymptotic behavior of distributional convergence and can be applied to assess the quality of normal approximation for a wide class of distributions.

Keywords: central limit theorem, edgeworth expansion, berry–esseen inequality, continuous distributions, rate of convergence.

Бессарабская Ирина Эдуардовна
кандидат технических наук, доцент, МИРЭА — Российский Технологический университет
irina.bessarabskaya@gmail.com

Аннотация. В работе исследуется скорость сходимости суммы независимых одинаково распределённых случайных величин к нормальному распределению в рамках Центральной предельной теоремы. Для равномерного, показательного и бета-распределений выполнено численное моделирование оценки Колмогоровского расстояния между распределением стандартизованной суммы и нормальным законом при различных значениях числа слагаемых. Использован анализ логарифмических зависимостей, позволяющий оценить порядок сходимости и аналог константы Берри-Эссеена. Полученные оценки согласуются с ведущими членами разложения Эджворта и демонстрируют влияние асимметрии исходного распределения на скорость приближения к нормальной аппроксимации. Предложенный подход позволяет получать количественные характеристики асимптотического поведения распределений сумм и может быть применён для анализа качества нормальной аппроксимации в широком классе распределений.

Ключевые слова: центральная предельная теорема, разложение Эджворта, неравенство Берри-Эссеена, непрерывные распределения, скорость сходимости.

Введение

Центральная предельная теорема (ЦПТ) является одним из ключевых результатов теории вероятностей, обеспечивая фундаментальную основу для нормальной аппроксимации сумм независимых одинаково распределённых случайных величин. Однако ЦПТ не предоставляет оценок скорости сходимости, тогда как для практических задач статистического моделирования такая информация является весьма важной.

Существуют два основных теоретических инструмента, позволяющих анализировать величину отклонения стандартизованной суммы случайных величин от нормального закона. Первым является неравенство Берри-Эссеена [1,2], которое дает верхнюю оценку для колмогоровского расстояния между распределением суммы и нормальным распределением. Эта оценка выражается через третий абсолютный момент исходного распределения и константу Берри-Эссеена, точное значение которой до сих пор неизвестно. Современные теоретические оценки [3] дают диапазон возможных значений константы Берри–Эссеена: $0.409 \le C \le 0.4748$.

Вторым инструментом является разложение Эджворта [4], уточняющее структуру отклонений стандартизованной суммы случайных величин от нормального закона и связывающее скорость сходимости с коэффициентами асимметрии и эксцесса распределения.

Численные исследования скорости сходимости в ЦПТ позволяют получить оценки аналога константы, присутствующей в неравенстве Берри–Эссеена, и оценить скорость сходимости для конкретных распределений. Однако такое моделирование проводилось ограниченно. Для симметричных распределений, например равномерного или Бернулли при $p = 0.5$ известны отдельные вычислительные результаты. В работах [5,6] исследования равномерного распределения ограничиваются визуализацией сходимости и не содержат систематического регрессионного анализа зависимости колмогоровского расстояния от числа слагаемых n. Для несимметричных распределений подобных данных тоже немного. Например, в работе [7] представлены оценки для распределения Бернулли, включая случаи сильной асимметрии. В статье [8] исследованы выборочные средние для гамма-распределения. В целом, до настоящего

времени численный анализ скорости сходимости в ЦПТ остается ограниченным.

Цель настоящей работы — численная оценка скорости сходимости стандартизованных сумм для ряда непрерывных распределений: равномерного, показательного и бета-распределений с различной степенью асимметрии. Рассматриваются зависимости колмогоровского расстояния от числа суммируемых случайных величин, а также вычисляются численные аналоги константы Берри–Эссеена.

Для анализа используется метод логарифмических зависимостей, позволяющий исследовать асимптотический характер сходимости и получить количественные оценки порядка скорости сходимости и соответствующих констант в моделируемых зависимостях. Такой подход позволяет выделить поведение, соответствующее первому члену разложения Эджворта.

Полученные результаты расширяют существующие численные данные для классических непрерывных распределений и конкретизируют применение разложения Эджворта в случаях асимметричных распределений. Показано, что метод логарифмической регрессии ln(D□)—ln(*n*) является эффективным инструментом для оценки порядка сходимости и соответствующих констант в ЦПТ.

Особое внимание уделено показательному распределению, для которого ранее приводились численные оценки константы Берри–Эссеена, полученные как максимум констант для различных *n*. Такие оценки, как правило, завышены из-за существенного вклада в результат неасимптотических членов, шума и случайных выбросов. В настоящей работе используется логарифмическая регрессия, позволяющая получать значения, отражающие асимптотический порядок сходимости; для показательного распределения такие оценки оказываются существенно меньшими и согласуются с ведущим членом разложения Эджворта.

Методы анализа и данные

Математическая модель

Пусть $X_1, X_2, \ldots, X_n$ — независимые и одинаково распределённые случайные величины с математическим ожиданием μ, дисперсией $\sigma^2 > 0$ и конечным третьим центральным моментом. Определим сумму этих случайных величин и её стандартизованную форму:

$$S□ = X_1 + \cdots + X□,\ Z□ = (S□ - n\mu)/(\sigma\sqrt{n}). \qquad 1)$$

Центральная предельная теорема утверждает, что Z□ сходится по распределению к стандартному нормальному закону N(0,1), однако не даёт информации о скорости этой сходимости. Эту информацию дают неравенство Берри–Эссеена и разложение Эджворта.

Неравенство Берри–Эссеена имеет вид:

$$\sup_x |F□(x) - \Phi(x)| \le (C\rho_{abs})/\sqrt{n}, \qquad 2)$$

где F□(x) — функция распределения вероятностей стандартизованной суммы n независимых случайных величин, Φ(x) — стандартная нормальная функция распределения вероятностей, $\rho_{abs} = M(|X - M(X)|^3) / \sigma^3$, а C — константа Берри-Эссеена. Для константы C неизвестно точное значение. Обозначим:

$$D_n = \sup_x |F_{Z_n}(x) - \Phi(x)|, \qquad 3)$$

где $F_{Z_n}(x)$— функция распределения вероятностей стандартизованной суммы случайных величин Z_n. D_n — оценка величины расхождения двух распределений по Колмогорову. Тогда можно записать: $D_n \le (C\rho_{abs}) / \sqrt{n}$.Таким образом, неравенство Берри-Эссеена устанавливает верхнюю границу отклонения распределения стандартизованной суммы независимых случайных величин от стандартного нормального закона и не зависит от того, какое распределение имеют суммируемые случайные величины.

Ф.И. Эджвортом [3] было введено разложение, названное его именем, которое описывает не только предельную форму распределения суммы случайных величин, но и структуру отклонений распределения такой суммы от нормального.

Пусть μ_3 и μ_4 — третий и четвертый центральные моменты соответственно исходного распределения. Обозначим $\gamma_1 = \frac{\mu_3}{\sigma^3}$ — коэффициент асимметрии, $\gamma_2 = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3$ — коэффициент эксцесса.

Согласно разложению Эджворта плотность распределения вероятностей стандартизованной суммы случайных величин, $f_{z_n}(x)$ может быть представлена в виде ряда по степеням $1/\sqrt{n}$:

$$f_{z_n}(x) = \varphi(x)\left(1 + \frac{P_1(x)}{\sqrt{n}} + \frac{P_2(x)}{n}\right) + o\left(\frac{1}{n}\right). \qquad 4)$$

Здесь $\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$, $x \in (-\infty; +\infty)$ — плотность стандартного нормального распределения, $P_1(x)$, $P_2(x)$— некоторые многочлены.

Первый многочлен, $P_1(x)$, выражается через коэффициент асимметрии γ_1:

$$P_1(x) = (\gamma_1/6)(x^3 - 3x). \quad 5)$$

Второй многочлен $P_2(x)$ зависит от коэффициентов асимметрии и эксцесса:

$$P_2(x) = (\gamma_2/24)(x^4 - 6x^2 + 3) + (\gamma_1^2/72)(x^6 - 15x^4 + 45x^2 - 15). \quad 6)$$

Функция распределения вероятностей стандартизованной суммы случайных величин Z□ выражается аналогично:

$$F_{Z_n}(x) = \Phi(x) - \varphi(x)\frac{\gamma_1(x^2-1)}{6\sqrt{n}} - \varphi(x)\left(\frac{\gamma_2(x^3-3x)}{24n} + \frac{\gamma_1^2(x^5-10x^3+15x)}{72n}\right) + o\left(\frac{1}{n}\right) \quad 7)$$

Если $\gamma_1 \neq 0$ (распределение несимметричное), то главный член поправки имеет порядок $1/\sqrt{n}$, и скорость сходимости распределения к нормальному также порядка $O(1/\sqrt{n})$. Если же $\gamma_1 = 0$, но $\gamma_2 \neq 0$, то следующий член разложения становится ведущим, сходимость ускоряется и становится порядка O(1/n). Этим объясняется быстрая сходимость для симметричных распределений. Для симметричных распределений $D_n \sim b/n$, где b — некоторая константа, так же, как и C, не зависящая от n.

Таким образом, разложение Эджворта связывает асимптотическую скорость сходимости с асимметрией и коэффициентом эксцесса исходного распределения, а неравенство Берри–Эссеена даёт верхнюю не асимптотическую оценку этой скорости.

Оценим с помощью разложения Эджворта скорость сходимости суммы показательно распределенных случайных величин к нормальному. Запишем разложение (7) в виде разности $F_{Z_n}(x)$ и $\Phi(x)$, оставив в разложении член порядка $O(1/\sqrt{n})$:

$$F_{Z_n}(x) - \Phi(x) = \varphi(x)\frac{\gamma_1(x^2-1)}{6\sqrt{n}} + O\left(\frac{1}{n}\right). \quad 8)$$

$\max_x |F_{Z_n}(x) - \Phi(x)|$ достигается при x=0 так как $\varphi(x)|x^2 - 1| \leq \varphi(0)$. Отсюда получаем, что $\max_x |F_{Zn}(x) - \Phi(x)| \leq \frac{\gamma_1}{6\sqrt{2\pi n}} + O\left(\frac{1}{n}\right) \approx \frac{0.0665\gamma_1}{\sqrt{n}} + O\left(\frac{1}{n}\right)$.

Для показательного распределения коэффициент асимметрии $\gamma_1 = 2$. Подставляя величину $\gamma_1 = 2$ в полученное выше неравенство, получаем:

$$\max_x |F_{Z_n}(x) - \Phi(x)| \leq \frac{0.133}{\sqrt{n}}. \quad 9)$$

Заметим, что данная оценка получена на основе первого члена разложения Эджворта и, таким образом, является асимптотической оценкой, справедливой при больших *n*. Разложение Эджворта не является строгим неасимптотическим неравенством. Поэтому данная оценка используется в статье как теоретический ориентир для сопоставления с результатами численного моделирования. Вывод строгого неасимптотического неравенства выходит за рамки настоящей работы.

Методика численного моделирования

Целью описываемого далее численного эксперимента являлась оценка скорости сходимости к нормальному закону сумм независимых одинаково распределённых случайных величин с различной степенью асимметрии исходного распределения, а именно: равномерного, показательного и бета-распределений, а также оценка численного аналога константы Берри-Эссеена. Под аналогом константы Берри-Эссеена понимается коэффициент в зависимостях вида D□ ~ $C\rho_{abs}/n^{\alpha}$.

Для каждого рассматриваемого распределения моделировалась серия значений Z□ стандартизованной суммы n независимых одинаково распределённых случайных величин. Далее количество моделируемых значений суммарной случайной величины обозначается через M. Для каждого *n* вычислялось значение D□. Для всех *n* и M эксперимент повторялся с различными начальными условиями генератора случайных чисел для контроля устойчивости результатов.

Следует учесть, что определение $D_n = \sup_x |F_{Z_n}(x) - \Phi(x)|$ справедливо для теоретического значения D_n. Однако, в численном эксперименте оценивается приближение этого значения, с помощью эмпирической функции распределения, построенной по *M* смоделированным значениям суммарной случайной величины. Таким образом, смоделированная величина D_n является случайной величиной, ошибка которой имеет порядок $\frac{1}{\sqrt{M}}$. Следовательно, масштаб статистического шума можно оценить как $O(1/\sqrt{M})$.

Для суммарных распределений строились следующие графики.

1. Гистограммы смоделированной плотности распределения стандартизованной суммы Z□, приведенная на одном графике с кривой, соответствующей плотности стандартного нормального распределения.
2. Q–Q-график. На этих графиках сравнивались квантили эмпирического распределения сумм S_n

с квантилями стандартного нормального распределения.

По оси X отложены теоретические квантили, по оси Y — эмпирические квантили. Чем ближе к прямой $y = x$ расположены точки Q–Q-графика, тем ближе смоделированное распределение к нормальному. Единицы измерения на Q–Q-графиках — стандартные отклонения σ .

3. Графики зависимости ln(D□) от ln(n) (ln–ln-графики). Поскольку в работе проверяется зависимость вида $D_n \sim \tilde{C} n^{-\alpha}$, где $\alpha = 1$ или $\alpha = \frac{1}{2}$ (в зависимости от симметричности или несимметричности изначального распределения), то предпочтительнее рассматривать эту зависимость в логарифмической форме, в которой получаем линейную зависимость:

$$\ln D_n \approx \ln \tilde{C} - \alpha \ln n. \qquad 10)$$

Здесь α— наклон прямой, а $\ln \tilde{C}$— свободный член, откуда можно получить оценку $\tilde{C}$ — аналога константы Берри–Эссеена для каждого конкретного распределения. На логарифмическом графике моделируемая зависимость при численных расчетах должна приближаться к прямой, параметры которой можно оценить методом наименьших квадратов, построив по полученным точкам линейную регрессию. Регрессия на ln–ln-графиках позволяет определить показатель степени и константу в зависимости D□ от n или $\sqrt{n}$ и оценить константу в этой зависимости.

Для показательного распределения приведённая выше теоретическая оценка скорости сходимости использовалась далее в статье как эталонная скорость сходимости, позволяющая сопоставить результат моделирования с ожидаемым главным членом Эджворта и оценить корректность вычисленных углов наклона на ln–ln-графиках.

В первую серию моделей вошли распределения с нулевой асимметрией: равномерное на отрезке [–0,5; 0,5] и симметричное бета-распределение β (2,2). Для этих распределений рассматривались значения n до 32, и большое количество смоделированных значений случайных величин M=5· 10^6 соответственно. Выбор такого M обусловлен тем, что для быстро сходящихся распределений, которыми являются симметричные распределения, статистический шум (порядка $1 / \sqrt{M}$) вносит заметный вклад в D□ и коэффициенты регрессии уже при n>30.

Для каждого распределения были построены следующие графики.

1. Q–Q-графики, единица измерения — стандартная ошибка отклонения.
2. Графики зависимости ln(D□) от ln(n) (ln–ln-графики), безразмерные единицы.

Во второй серии экспериментов рассматривались показательное распределение, и несимметричные бета-распределения (α, β) с α ≠ β. Для этих распределений использовались существенно большие значения n (до n = 500) и M = 1· 10^6. Такое сочетание обеспечивает баланс между численной точностью и диапазоном исследуемых n.

Для каждой фиксированной степени асимметрии были построены следующие графики.

1. Гистограммы смоделированной плотности распределения стандартизованной суммы Z□ n случайных величин, безразмерные единицы.
2. Q–Q-графики, единица измерения — стандартные отклонения σ.
3. Графики зависимости ln(D□) от ln(n) (ln–ln-графики), безразмерные координаты.

Численные расчёты выполнялись на языке Python (версия 3.11) с использованием библиотек NumPy и SciPy. Для генерации независимых реализаций случайных величин применялся генератор псевдослучайных чисел библиотеки NumPy с фиксированными начальными значениями (seed) для каждого набора параметров, что обеспечивает воспроизводимость результатов моделирования. Полный исходный код программы, реализующей описанную методику, опубликован в открытом доступе [9].

Результаты

Результаты моделирования для равномерного распределения и симметричного бета-распределение β (2,2) показали быструю сходимость сумм к нормальному распределению. На рис. 1 показаны Q–Q-графики, определенные при n=14, для равномерного распределения (слева) и для бета распределения β (2,2) (справа). Видно, что соответствующие значения эмпирических и теоретических квантилей располагаются вдоль прямой линии, что говорит о близости суммы к нормальному закону.

На рис. 2 представлены ln–ln-графики для обоих симметричных распределений. Регрессия, построенная по ln–ln-графику для равномерного распределения имеет вид: $\ln(D_n) = -3.481(\pm 0,09) - 0.994(\pm 0,035)\cdot\ln(n)$. Угол наклона $\alpha = -0,994(\pm 0,035)$. Для бета-распределения β(2,2) уравнение регрессии: $\ln(D_n) = -3,883(\pm 0,087) - 0.959(\pm 0,034)\cdot\ln(n)$. Угол наклона $\alpha = -0,959(\pm 0,034)$. В обоих случаях расчеты показывают, что скорость схо-

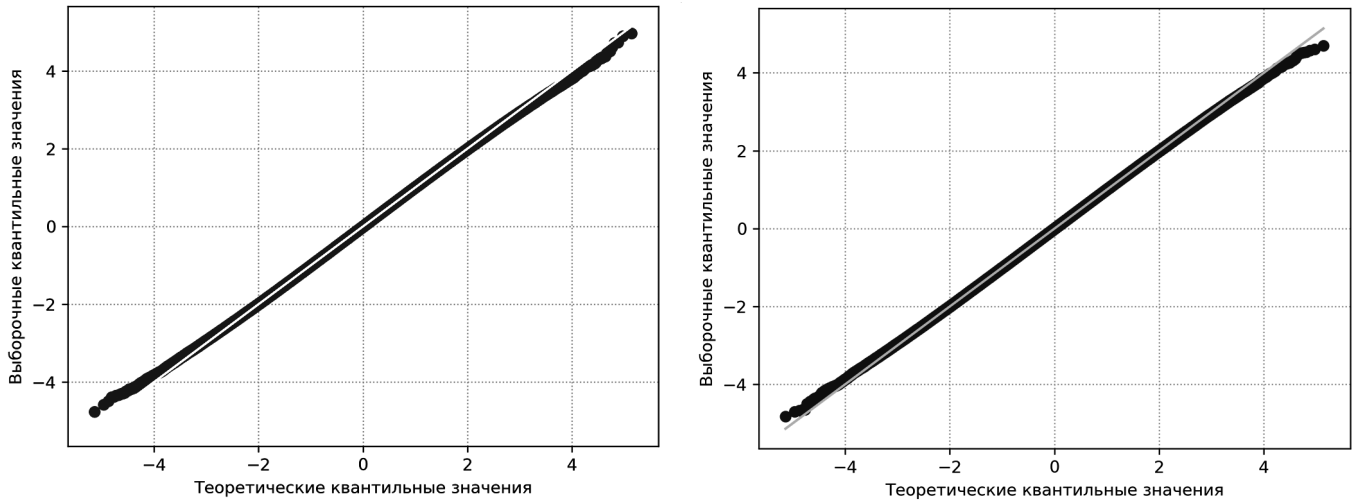


Рис. 1. Q–Q-графики для симметричных распределений: равномерного (слева) и β (2, 2) (справа)

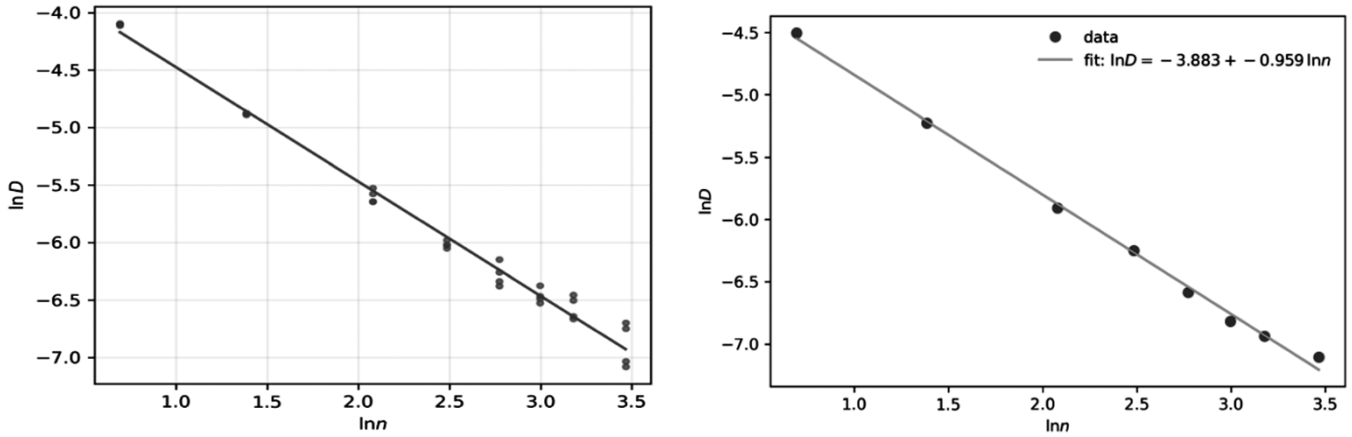


Рис. 2. ln–ln-графики для симметричных распределений: равномерного и β (2, 2)

димости симметричных распределений значительно выше, чем O(1/$\sqrt{n}$) и имеет порядок ≈ $O\left(\frac{1}{n}\right)$.

Чтобы проиллюстрировать рост влияния шума Монте-Карло на результаты эксперимента при увеличении *n*, на левом графике для каждого значения *n* показаны 4 значения $\ln(D_n)$, полученные при моделировании с 4 разными seeds (начальное значение генератора случайных чисел). Видно, что при небольших n точки практически сливаются, но при росте *n* растет разброс экспериментальных точек. Это объясняется тем, что для симметричных распределений с ростом *n*, D_n быстро стремится к нулю и добавка шума становится существенной.

Аналогичные расчеты были проведены для несимметричных распределений. Показательное распределение рассматривалось с параметром 1. На рис. 3 слева направо показаны гистограмма распределения плотности вероятности суммы случайных величин, Q–Q-график и ln–ln-график. Расчеты проведены при n=100.

Регрессия на ln–ln-графике для показательного распределения имеет вид: $\ln(D_n) = -2{,}026(\pm 0{,}012) - 0{,}496(\pm 0{,}003)\cdot\ln(n)$. Угол наклона $\alpha = -0{,}496(\pm 0{,}003)$, что практически полностью совпадает с теоретической скоростью сходимости порядка O ($n^{-0{,}5}$).

Чтобы сравнить величину численной константы в зависимости $D_n \sim \tilde{C} n^{-\alpha}$ с теоретической оценкой, константой Берри–Эссена, найдем величину $\tilde{C} = e^{-2{,}022} \approx 0{,}132$. Затем полученную величину $\tilde{C}$ следует разделить на величину ρ_{abs}, которая для показательного распределения равна: $\rho_{abs} \approx 2{,}414$. Получаем, что для показательного распределения оценка аналога константы Берри–Эссеена равна $\tilde{C} / \rho_{abs} \approx 0{,}0547$.

Для несимметричного бета-распределения β (2,5) коэффициент асимметрии $\gamma_1 \approx 0{,}596$. На рис. 4 слева направо показаны гистограмма распределения плотности вероятности суммы, Q–Q-график и ln–ln-график. Гистограмма и Q–Q-график приведены для n=100. Гистограмма хорошо соответствует плотности нормального распределения, так же, как и Q–Q-график. Регрессия

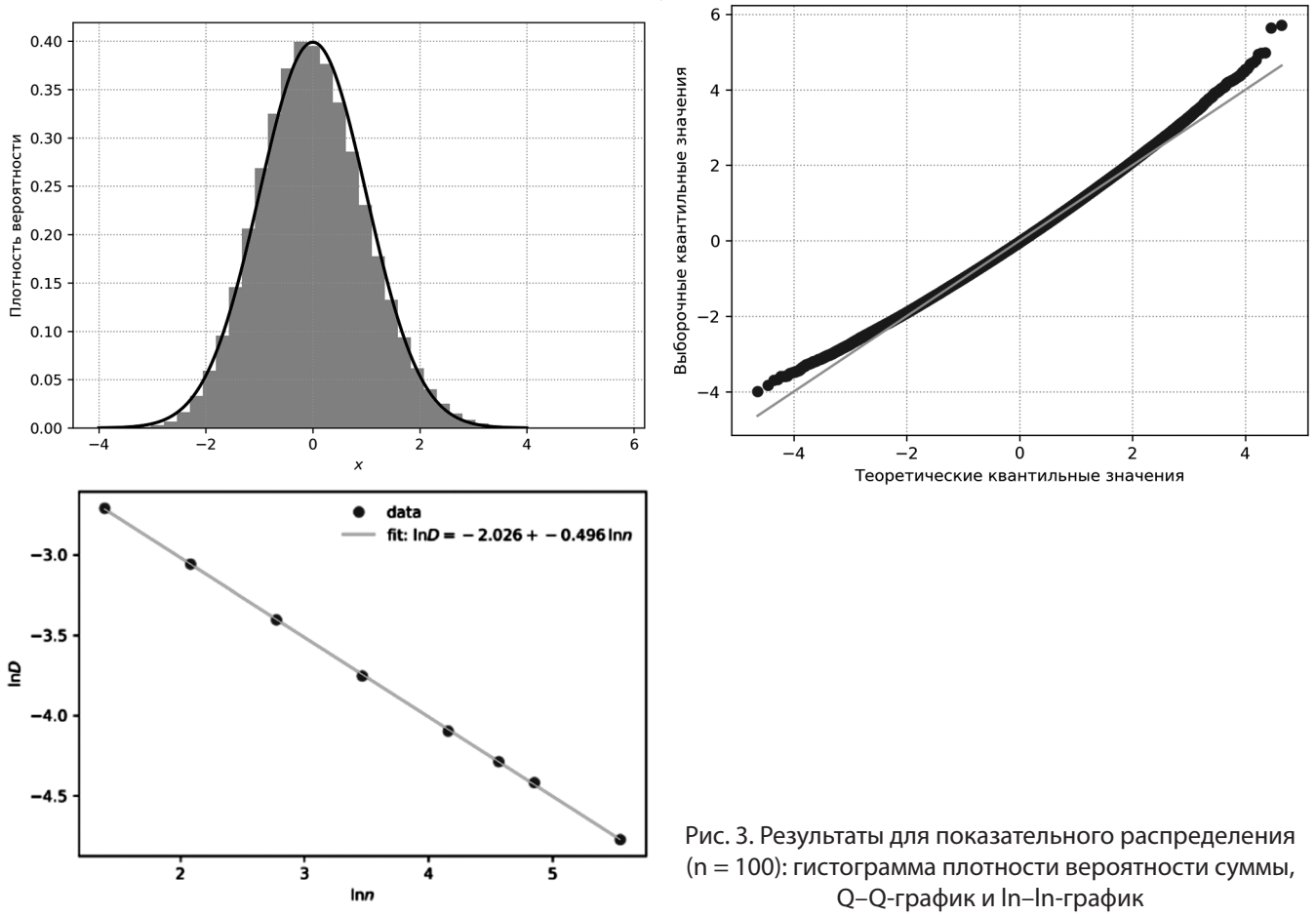


Рис. 3. Результаты для показательного распределения (n = 100): гистограмма плотности вероятности суммы, Q–Q-график и ln–ln-график

на ln–ln-графике для этого распределения имеет вид: $\ln(D_n) = -3,267(\pm 0,123) - 0.473(\pm 0,028) \cdot \ln(n)$. Параметр $\alpha = -0,473(\pm 0,028)$ близок к теоретической скорости сходимости порядка O ($n^{-0,5}$).

Величина численной константы $\tilde{C}$ в зависимости $D_n \sim \tilde{C} n^{-\alpha}$ равна$\tilde{C} = e^{-3,263} \approx 0,0381$. Коэффициент ρ_{abs} для бета-распределения с параметрами (2,5) равен: $\rho_{abs} \approx 1,55$. Отсюда оценка аналога константы Берри–Эссеена $\tilde{C} / \rho_{abs} \approx 0,0246$. Эта величина меньше аналогичной для показательного распределения, что объясняется меньшим коэффициентом асимметрии.

Последний расчет был выполнен для бета-распределения с параметрами (0,5,7). Для этого варианта бета-распределения коэффициент асимметрии $\gamma_1 \approx 2,13$. На рис. 5 слева направо расположены гистограмма распределения плотности вероятности суммы (n=128), Q–Q-график (n=128) и ln–ln-график. Гистограмма в целом хорошо соответствует плотности нормального распределения, однако, заметна небольшая перекошенность, вызванная асимметрией начального распределения.

На Q–Q-графике в центральной части, по-прежнему, наблюдается хорошее совпадение эмпирических и теоретических квантилей, Отклонение эмпирических квантилей от теоретических существенно лишь на хвостах распределения, вне интервала ±3σ от математического ожидания.

Регрессия на ln–ln-графике для этого распределения имеет вид:

$\ln(D_n) = -1,91(\pm 0,045) - 0,506(\pm 0,01) \cdot \ln(n)$. Параметр $\alpha = -0,506(\pm 0,01)$, то есть, скорость сходимости по-прежнему близка к теоретической порядка O ($n^{-0,5}$).

Величина численной константы $\tilde{C}$ в зависимости $D_n \sim \tilde{C} n^{-\alpha}$ равна $\tilde{C} = e^{-1,91} \approx 0,148$. Коэффициент ρ_{abs} для бета-распределения с параметрами (0,5,7) равен: $\rho_{abs} \approx 2,446$. Отсюда оценка аналога константы Берри–Эссеена $\tilde{C} / \rho_{abs} \approx 0,061$.

Обсуждение и выводы

Проведённые исследования позволили получить новые численные оценки скорости сходимости законов распределения сумм ряда независимых одинаково распределённых случайных величин с различной степенью асимметрии к нормальному закону. Полученные резуль-

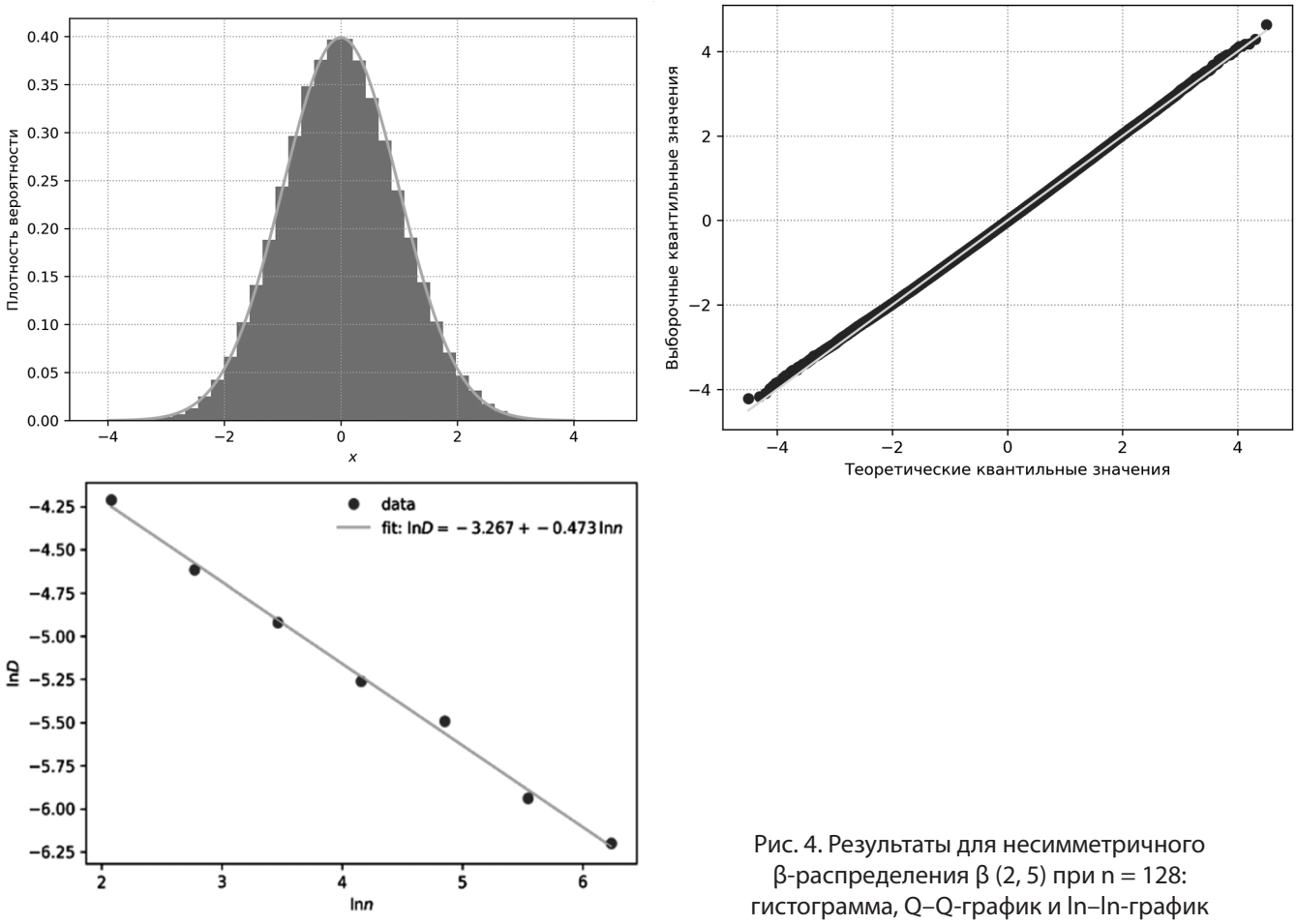


Рис. 4. Результаты для несимметричного β-распределения β (2, 5) при n = 128: гистограмма, Q–Q-график и ln–ln-график

таты согласуются с теоретическими оценками первых членов разложения Эджворта, подробно изложенными в работах [11,12], и подтверждают влияние асимметрии распределения на скорость сходимости [10].

Результаты моделирования для равномерного распределения и симметричного бета-распределение β (2,2) показали, что скорость сходимости сумм к нормальному распределению $D_n \approx O(1/n)$. Именно такой характер сходимости для распределений с нулевой асимметрией следует из разложения Эджворта.

Для показательного распределения визуальный анализ гистограмм и Q–Q-графиков показывает хорошее согласование с нормальным распределением Отклонение эмпирических квантилей от теоретических существенно лишь для хвостовых областей, вне интервала $\pm 3\sigma$ от математического ожидания, который соответствует области почти всех возможных значений суммарной случайной величины.

Регрессионный анализ зависимости D_n от n в логарифмических координатах демонстрирует устойчивый наклон, близкий к $-0,5$, что подтверждает теоретический порядок сходимости $O\left(n^{-1/2}\right)$, кроме того, величина численной константы в этой зависимости оказалась равной $\tilde{C} \approx 0,132$, что практически совпадает с полученной выше теоретической оценкой, см. (9), из разложения Эджворта. Скорость сходимости сумм показательно распределенных независимых случайных величин значительно превышает общую оценку из неравенства Берри-Эссеена.

Для несимметричных бета-распределений $\beta(2,5)$ и $\beta(0,5,7)$ также получено хорошее соответствие между распределением сумм и нормальной аппроксимацией.

На Q–Q-графиках в центральной части, наблюдается хорошее совпадение эмпирических и теоретических квантилей. Отклонение эмпирических квантилей от теоретических возникает лишь на хвостах распределения и усиливается с ростом асимметрии. Значительное расхождение квантилей наблюдается вне интервала $\pm 3\sigma$ от математического ожидания.

Анализ уравнения регрессии на ln–ln-графиках для обоих распределений показал, что скорость сходимости соответствует теоретической скорости порядка $O(n^{-0,5})$. Увеличение асимметрии приводит к росту константы при $n^{-0,5}$, что согласуется с теоретической зави-

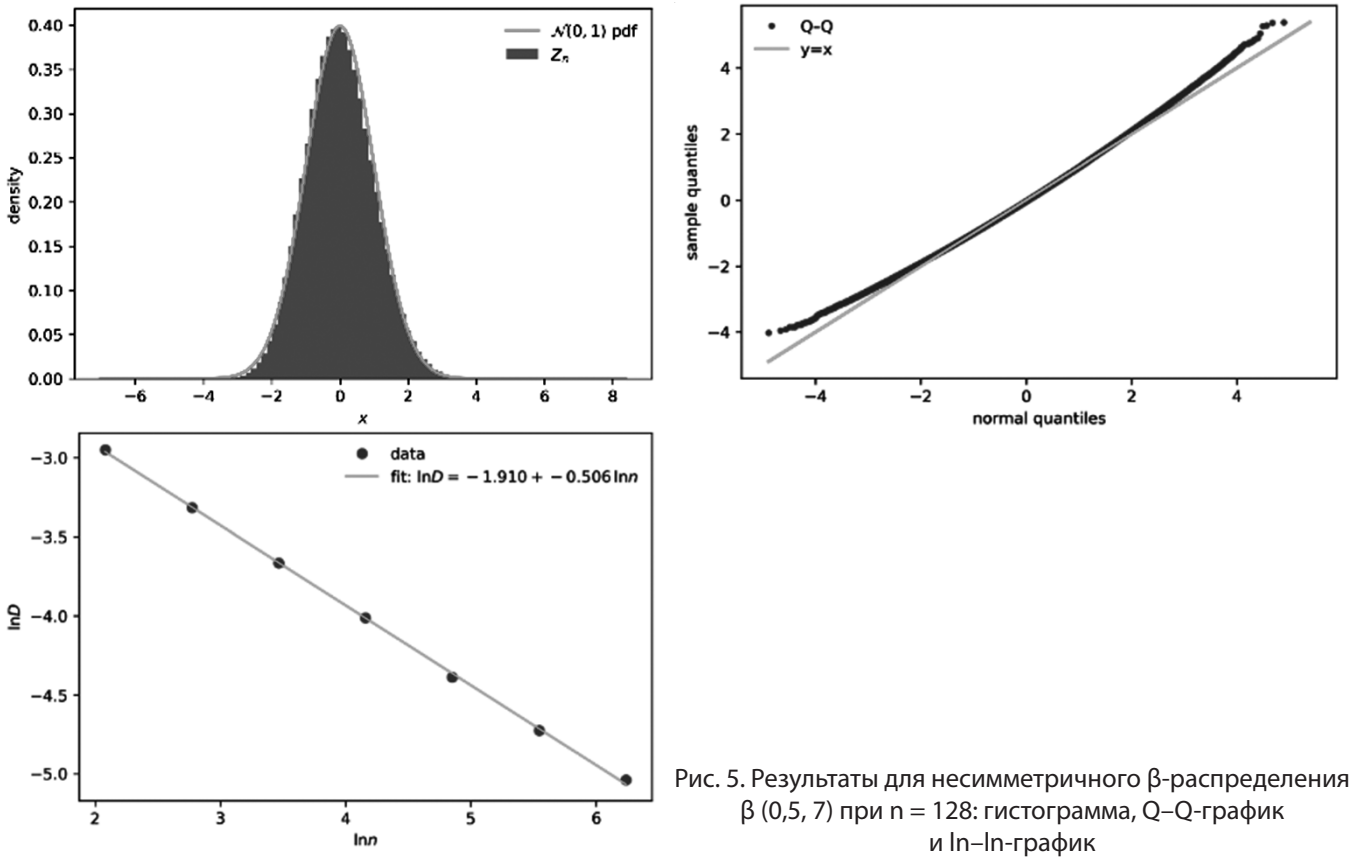


Рис. 5. Результаты для несимметричного β-распределения β (0,5, 7) при n = 128: гистограмма, Q–Q-график и ln–ln-график

симостью отклонения от третьего центрального момента [11,12].

Следует подчеркнуть, что полученные в настоящей работе значения аналога константы Берри–Эссеена $(0{,}024 - 0{,}061)$ для конкретных несимметричных непрерывных распределений закономерно оказались существенно ниже универсальной константы $0{,}4748$ [4]. Универсальная константа является верхней границей в неравенстве Берри–Эссеена, то есть оценивает наихудший возможный случай по всем распределениям с конечным третьим моментом. Поэтому индивидуальные коэффициенты, рассчитанные для конкретных распределений, должны быть меньше универсальной верхней оценки.

Полученные по регрессионной модели значения аналога константы Берри–Эссеена для показательного распределения (порядка $0{,}05$) значительно ниже ранее опубликованных аналогичных численных оценок для показательного распределения при умеренных n [13, 14], где соответствующие величины лежали в интервале $0{,}66 - 0{,}70$. Разница объясняется тем, что в работах [13, 14] численные оценки нормальной аппроксимации для конкретных распределений получались путём прямого вычисления величины $K(n) = D_n\sqrt{n}$ на фиксированной сетке значений n, после чего в качестве оценки «эффективной» константы выбиралось максимальное значение $K(n)$ на этом диапазоне. Такой подход отражает поведение при умеренных n, но неизбежно завышает оценку коэффициента из-за существенного вклада членов порядка n^{-1}, шумов Монте-Карло и случайных выбросов.

В настоящей работе используется иной метод: коэффициент при $n^{-1/2}$ оценивается по регрессионной зависимости D_n от n в логарифмических координатах. Этот подход задействует всю совокупность значений D_n, сглаживает локальные колебания и позволяет выделить устойчивый наклон, соответствующий теоретической скорости сходимости. Поэтому полученные численные значения аналога константы Берри–Эссеена отражают именно асимптотическое поведение и оказываются существенно меньше оценок, основанных на максимумах $K(n)$ при конечных n.

В настоящей работе представлены детальные численные расчёты аналога константы Берри–Эссеена для нескольких бета-распределений, различающихся степенью асимметрии. Эти результаты расширяют набор распределений, для которых численные характеристики скорости нормальной аппроксимации получены в явном виде.

Рассчитанные значения (ln(D□); ln(n)) очень близко сгруппированы относительно прямой регрессии, что

говорит о малой величине статистической ошибки при моделировании случайных величин. Для симметричных распределений отмечено влияние статистического шума, обусловленного очень высокой скоростью сходимости, что отразилось на ln–ln-графиках.

Разработанная методика анализа на основе линейной регрессии в логарифмических координатах показала высокую устойчивость и может быть использована для оценки скорости сходимости и определения констант Берри–Эссеена для широкого класса распределений.

Полученные результаты согласуются с ведущими членами разложения Эджворта и подтверждают корректность оценённого порядка скорости сходимости. Разработка строгих неасимптотических оценок для экспоненциального и бета-распределений требует отдельного теоретического анализа на основе методов Эссеена и выходит за рамки настоящей работы. Вместе с тем мы видим, что для распределений с небольшой асимметрией мы можем пользоваться первыми членами разложения Эджворта для оценки скорости сходимости, несмотря на их асимптотический характер.

Полученные результаты могут быть использованы в прикладных задачах статистического моделирования, анализа случайных процессов и оценки точности нормальных аппроксимаций. Исследования есть смысл распространить на уточнение скорости сходимости в ЦПТ для распределений с существенной не симметрией и для оценки возникающих ошибок квантилей, что важно в различных задачах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Berry A.C. The accuracy of the Gaussian approximation to the sum of independent variates // Transactions of the American Mathematical Society. — 1941. — Vol. 49, No. 1. — P. 122–136. — DOI: 10.2307/1990253.
2. Esseen C.-G. On the Liapunoff limit of error in the theory of probability // Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik. — 1942. — Vol. 28A, No. 9. — P. 1–19. — DOI: 10.1007/BF02481954.
3. Шевцова И.Г. Об абсолютных константах в неравенствах типа Берри–Эссеена для одинаково распределённых слагаемых // Препринт. — 2011. — arXiv:1111.6554. — URL: https://arxiv.org/abs/1111.6554.
4. Edgeworth F.Y. The law of error // Transactions of the Cambridge Philosophical Society. — 1905. — Vol. 20. — P. 36–65.
5. Dinov I.D., Christou N., & Sanchez J. (2008). Central Limit Theorem: New SOCR Applet and Demonstration Activity. Journal of Statistics Education, 16(2), 1–15.
6. Dambolena I.G. (1984). Teaching the Central Limit Theorem through Computer Simulation. Mathematics & Computer Education, 18(2), P.128–132.
7. Золотухин Н., Нагаев С., Чеботарёв А. Константа Берри–Эссеена для распределений Бернулли: численные эксперименты // Препринт arXiv. — 2018. — arXiv:1810.09681. — URL: https://arxiv.org/abs/1810.09681
8. Chang H.-J., Wu C.-H., Ho J.-F., Chen P.-Y. On sample size in using Central Limit Theorem for Gamma distribution // Information and Management Sciences. 2008. Vol. 19, no. 1. P. 153–174.
9. Бессарабская И.Э., Бессарабский А.Ю. Numerical Experiments for CLT. Версия 1: программное обеспечение. — Zenodo, 2025. — DOI 10.5281/zenodo.17783275 — URL: https://doi.org/10.5281/zenodo.17783275
10. Hall P. Fast rates of convergence in the central limit theorem // Zeitschrift für Wahrscheinlichkeitstheorie und Verwandte Gebiete. 1983. Vol. 62, No. 4. P. 491–507. DOI: 10.1007/BF00534201.
11. Bhattacharya R.N., Rao R.R. Normal Approximation and Asymptotic Expansions. New York: Wiley, 1976. 300 p.
12. Petrov V.V. Limit Theorems of Probability Theory: Sequences of Independent Random Variables. Oxford: Clarendon Press, 1995. 292 p.
13. Тюрин Ю.Н. Об оценках константы Берри–Эссеена // Теория вероятностей и её применения. — 2010. — Т. 55, № 3. — С. 612–628.
14. Королёв В.Ю., Шевцова И.Г. Оценки расстояния между распределением суммы независимых случайных величин и нормальным распределением // Теория вероятностей и её применения. — 2010. — Т. 55, № 3. — С. 498–515.

© Бессарабская Ирина Эдуардовна (irina.bessarabskaya@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.05

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ АРХИТЕКТУР СЕТЕЙ СВЯЗИ: МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

SYSTEM ANALYSIS OF THE EVOLUTION OF COMMUNICATION NETWORK ARCHITECTURES: DATA MANAGEMENT AND PROCESSING MODELS

E. Bogdanova
E. Gerasimova

Summary. The article examines the evolution of communication network architectures from the standpoint of system analysis, cybernetics and the theory of complex adaptive systems. It is shown that the development of communication networks follows a trajectory from rigidly deterministic hierarchical systems to programmable centralized architectures and further to distributed intelligent systems with elements of self-organization. The main attention is paid to the transformation of control models, data processing mechanisms and feedback loops, as well as the analysis of system constraints and new classes of risks.

Keywords: communication networks, system analysis, SDN, NFV, 5G/6G, complex adaptive systems, autonomous networks, and digital twins.

Богданова Елена Александровна
Кандидат технических наук, доцент, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара
helen.bogdan@mail.ru
Герасимова Екатерина Олеговна
Аспирант, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара
e.o.gerasimova@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается эволюция архитектур сетей связи с позиций системного анализа, кибернетики и теории сложных адаптивных систем. Показано, что развитие сетей связи следует траектории от жестко детерминированных иерархических систем к программируемым централизованным архитектурам и далее — к распределённым интеллектуальным системам с элементами самоорганизации. Основное внимание уделяется трансформации моделей управления, механизмов обработки данных и контуров обратной связи, а также анализу системных ограничений и новых классов рисков.

Ключевые слова: сети связи, системный анализ, SDN, NFV, 5G/6G, сложные адаптивные системы, автономные сети, цифровые двойники.

Введение

Современные сети связи представляют собой крупномасштабные распределённые информационно-управляющие системы, обеспечивающие передачу, обработку и управление потоками данных в условиях высокой динамики и неопределённости [1]. Эволюция сетевых архитектур сопровождается не только ростом пропускной способности и вычислительных возможностей, но и качественными изменениями парадигм управления и обработки информации [2].

Целью данной работы является системный анализ эволюции архитектур сетей связи через призму изменения моделей управления, характера обратной связи и роли данных в принятии решений. Общая траектория эволюции архитектур сетей связи как информационно-управляющих систем представлена на рис. 1. Анализ проводится с позиций теории систем, кибернетического подхода и теории сложных адаптивных систем (Complex Adaptive Systems, CAS) [3].

1. Классические сети связи как детерминированные иерархические системы

1.1. Модель управления

Классические сети связи, включая телефонные сети общего пользования (ТфОП) и IP/MPLS-сети, могут быть охарактеризованы как иерархические детерминированные системы с локализованным управлением. Управляющие функции распределены по сетевым узлам (АТС, маршрутизаторы), которые принимают решения на основе заранее заданных алгоритмов и статических или квазистатических таблиц коммутации и маршрутизации [4].

Управление носит преимущественно реактивный характер: система реагирует на входные события (поступление вызова или пакета) в соответствии с предопределёнными правилами. Централизованный контур управления отсутствует, а прогнозирование и проактивная оптимизация параметров сети практически не реализуются.

1.2. Обработка информации и ограничения

Обработка информации в таких сетях сводится к коммутации каналов или пересылке пакетов на основе заголовочной информации без учёта семантики и контекста трафика [5]. Каждое сетевое устройство располагает лишь локальной информацией о состоянии собственных интерфейсов и соседних узлов.

Системный анализ и оптимизация выполняются постфактум на основе агрегированной статистики, собираемой средствами мониторинга. Это приводит к низ-

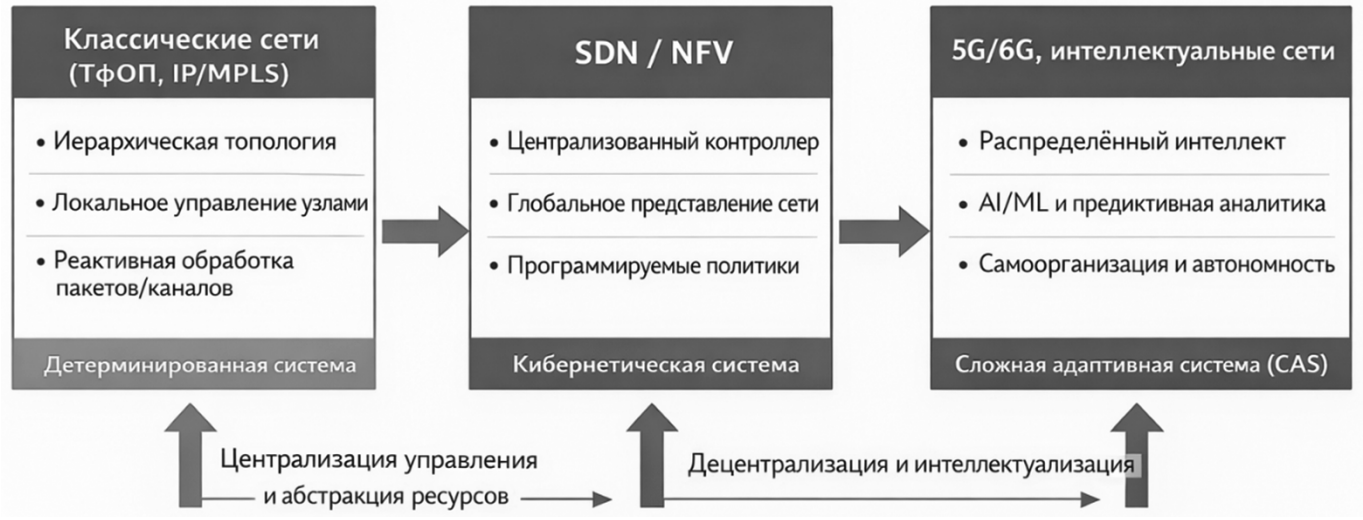


Рис. 1. Эволюция архитектур сетей связи как информационно-управляющих систем

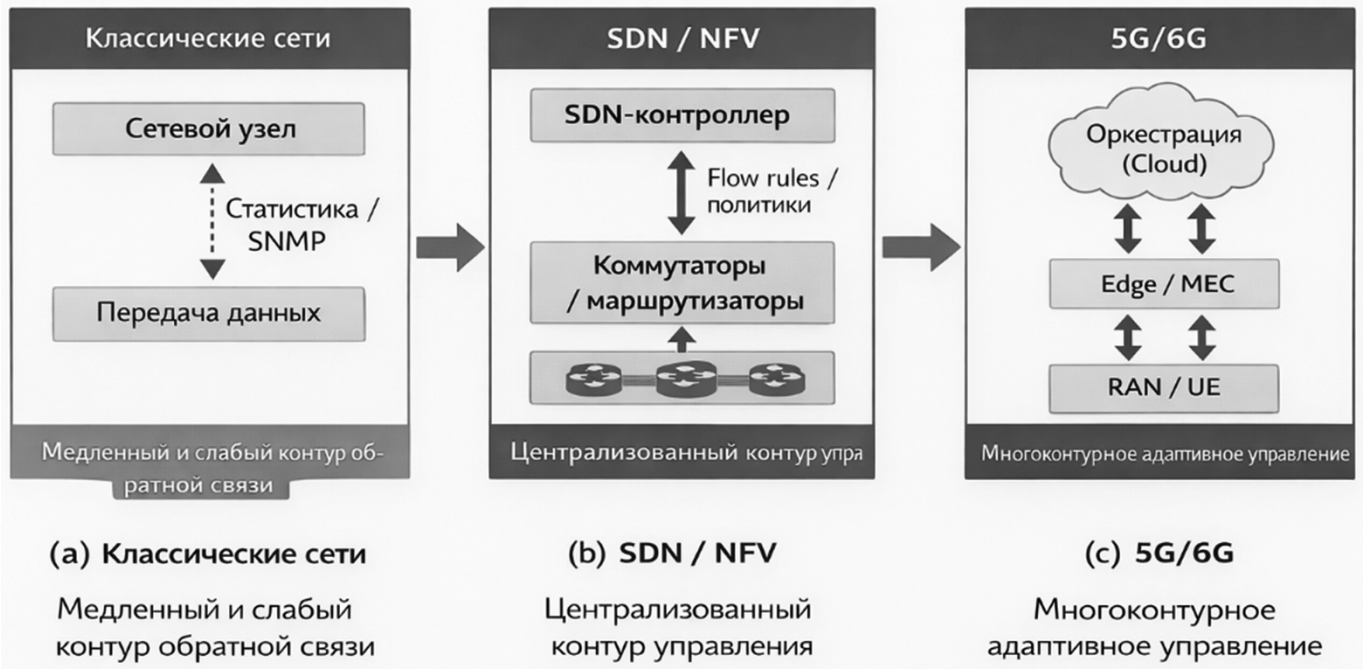


Рис. 2. Трансформация контуров управления и обратной связи

кой адаптивности, сложности обеспечения сквозного качества обслуживания (QoS) и повышенному риску каскадных отказов при локальных сбоях [6]. Эволюция контуров управления и обратной связи в сетях связи на различных этапах их развития показана на рис. 2.

2. Программно-определяемые сети и виртуализация функций

2.1. Централизация и программируемость управления

Появление программно-определяемых сетей (Software-Defined Networking, SDN) и виртуализации сетевых функций (Network Functions Virtualization, NFV) ознаменовало переход к кибернетической модели управления с чётко выраженными контурами прямой и обратной связи [7]. Принципиальным отличием SDN является разделение плоскости управления и плоскости передачи данных.

Централизованный SDN-контроллер формирует глобальное представление о топологии и состоянии сети и вычисляет управляющие воздействия в виде правил обработки потоков. Виртуализация сетевых функций и появление уровня оркестрации (MANO) позволяют решать задачи размещения, масштабирования и обеспечения отказоустойчивости сетевых сервисов как задачи системного планирования.

2.2. Системные преимущества и вызовы

Централизация управления существенно повышает управляемость и гибкость сети, сокращает время

внедрения новых политик и сервисов [8]. Вместе с тем формируется новая критическая точка — контроллер и оркестратор, отказ или компрометация которых может привести к деградации всей системы. Кроме того, масштабирование централизованной обработки телеметрии становится нетривиальной задачей для сетей операторского масштаба.

3. Облачно-ориентированные и интеллектуальные архитектуры как сложные адаптивные системы

3.1. Распределённый интеллект и сервис-ориентированное управление

Архитектуры сетей пятого и перспективного шестого поколений (5G/6G) характеризуются переходом от централизованного управления к распределённому интеллекту. Service-Based Architecture (SBA) 5G реализует управление в виде набора взаимодействующих сервисов, а вычисления смещаются ближе к границе сети (Multi-access Edge Computing, MEC).

Управление приобретает целеориентированный характер: оператор задаёт целевые показатели (KPI), а система автоматически адаптирует параметры сети. Гибридная модель распределённого управления в сетях 5G/6G, сочетающая централизованную оркестрацию и локальное принятие решений, представлена на рис. 3. Для этого используются методы машинного обучения, включая обучение с подкреплением, а также концепция автономных сетей (Autonomous Networks).



Рис. 3. Гибридная модель управления в сетях 5G/6G

3.2 Роль данных и цифровых двойников

Ключевым элементом современных сетей становится обработка больших объёмов данных в реальном времени и переход от описательной телеметрии к предиктивной аналитике. Создание цифровых двойников сетей позволяет проводить моделирование, прогнозирование и безопасную апробацию управляющих воздействий без риска для реальной инфраструктуры [9].

Интеллектуальные алгоритмы применяются для классификации трафика, выявления аномалий, оптимизации радиодоступа (например, RAN Intelligent Controller в O-RAN) и автоматизированного анализа первопричин отказов.

Обсуждение и системные риски

Переход к распределённому интеллекту приводит к возникновению эмерджентных свойств, таких как повышенная устойчивость и способность к самоорганизации. Вместе с тем усложняется задача верификации корректности работы системы, возрастает зависимость от качества данных и появляются новые векторы атак, ориентированные на алгоритмы машинного обучения.

Сравнительный системный анализ архитектур

Таблица 1.

Сравнение архитектур сетей связи с позиций системного анализа

Характеристика	Классические сети (ТфОП, IP/MPLS)	SDN / NFV	5G/6G, интеллектуальные сети
Тип системы	Детерминированная иерархическая	Кибернетическая	Сложная адаптивная (CAS)
Модель управления	Локальная, распределённая	Централизованная	Гибридная, распределённая
Контур обратной связи	Слабый, медленный	Явный, централизованный	Многоконтурный, адаптивный
Уровень автоматизации	Низкий	Средний–высокий	Высокий (автономный)
Использование данных	Статистика постфактум	Телеметрия в реальном времени	Предиктивная аналитика, AI/ML
Масштабируемость управления	Ограниченная	Проблемная при росте	Высокая за счёт распределения
Основные риски	Каскадные отказы	Центральная точка отказа	Сложность верификации, data bias

Составлено автором на основании [10]

Заключение

Системный анализ эволюции архитектур сетей связи показывает закономерный переход от управления детерминированными иерархическими системами к управлению сложными адаптивными системами. Клю-

чевыми факторами этого перехода являются централизация и последующая децентрализация управления, рост роли данных и внедрение интеллектуальных механизмов принятия решений. Полученные выводы могут быть использованы при проектировании и анализе перспективных автономных сетей связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов А.В. Системный анализ: Уч. / А.В. Антонов. — М.: Инфра-М, 2016. — 158 с.
2. Иго Т. Arduino, датчики и сети для связи устройств / Т. Иго. — СПб.: BHV, 2019. — 544 с.
3. Нетес В.А. Стандартизация в области надёжности сетей связи / В.А. Нетес // Инновации для построения цифрового будущего: Материалы XXIX Международного форума МАС' 2025, Москва, 25 апреля 2025 года. — Москва: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет просвещения», 2025. — С. 65–69. — EDN PYDYHK.
4. Ильин Н.С. Искусственный интеллект в сетях связи: перспективы и вызовы / Н.С. Ильин, С.Б. Андреев // Современные и информационные технологии в социальной сфере: Сборник научных трудов в 2 томах, Чебоксары, 25 апреля 2025 года. — Чебоксары: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2025. — С. 160–162. — EDN PDBLLR.
5. Еркаев А.А. Исследование применения искусственного интеллекта в сетях связи / А.А. Еркаев // Современные проблемы телекоммуникаций: материалы Всероссийской научно-технической конференции, Новосибирск, 22–25 апреля 2024 года. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2024. — С. 241–245. — DOI 10.55648/SPT-2024-1-241. — EDN ATMAXQ.
6. Салманов Р.М. Будущее информатизации в различных сферах деятельности / Р.М. Салманов // Наука, общество, инновации: актуальные вопросы современных исследований: сборник статей Международной научно-практической конференции, Пенза, 25 мая 2023 года. — Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2023. — С. 60–62. — EDN FHHLJH.
7. Ким П.В. Сетевые оверлейные технологии: OTV, LISP / П.В. Ким, В.В. Герасимов // Студенческий вестник. — 2019. — № 21–7(71). — С. 89–91. — EDN IIBBGA.
8. Transition technologies towards 6G networks / T.R. Raddo, S. Rommel, B. Cimoli [et al.] // Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking. — 2021. — Vol. 2021, No. 1. — P. 1–22. — DOI 10.1186/s13638-021-01973-9. — EDN CISAZN.
9. Towards a Scaleable 5G Fronthaul: Analog Radio-over-Fiber and Space Division Multiplexing / S. Rommel, B. Cimoli, A. Morales [et al.] // Journal of Lightwave Technology. — 2020. — Vol. 38, No. 19. — P. 5412–5422. — DOI 10.1109/JLT.2020.3004416. — EDN FAKFPN.
10. Khorsandi B.M. Centralized vs. distributed algorithms for resilient 5G access networks / B.M. Khorsandi, F. Tonini, C. Raffaelli // Photonic Network Communications. — 2019. — Vol. 37, No. 3. — P. 376–387. — DOI 10.1007/s11107-018-00819-7. — EDN WKKLHE.

© Богданова Елена Александровна (helen.bogdan@mail.ru); Герасимова Екатерина Олеговна (e.o.gerasimova@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.06

ПРИМЕНЕНИЕ АРХИТЕКТУР ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗАБОЛЕВАНИЙ ДЕРЕВЬЕВ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ

APPLICATION OF DEEP LEARNING ARCHITECTURES TO IDENTIFICATION OF TREE DISEASES FROM IMAGES

N. Verezubova
N. Yakovleva
A. Chekulaev

Summary. This paper focuses on automating the diagnosis of woody plant pathologies using deep learning methods. The relevance of the study lies in the need for timely detection of fungal infections to minimize environmental and economic damage. A dataset of leaf images was used, including healthy specimens and those affected by Uromyces appendiculatus (rust) and Mycosphaerella angulata (angular leaf spot). The methodology is based on a deep neural network with a contrastive learning strategy (SimCLR) and subsequent supervised retraining. The Grad-CAM attention visualization algorithm was used to verify decisions and ensure the interpretability of the model. The results confirm the effectiveness of the proposed approach for accurate disease identification and its applicability to intelligent plant monitoring systems.

Keywords: neural networks, computer vision, plant pathology, contrastive learning.

Верезубова Наталья Афанасьевна
Кандидат экономических наук, доцент, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии имени К.И. Скрябина
nverez@mail.ru
Яковлева Ольга Анатольевна
Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии имени К.И. Скрябина
yakovleffo@yandex.ru
Чекулаев Артур Анатольевич
Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии имени К.И. Скрябина

Аннотация. Работа посвящена автоматизации диагностики патологий древесных растений с применением методов глубокого обучения. Актуальность исследования обусловлена необходимостью своевременного выявления грибковых инфекций для минимизации экологического и экономического ущерба. В качестве материала использован набор изображений листьев, включающий здоровые образцы и экземпляры, пораженные Uromyces appendiculatus (ржавчина) и Mycosphaerella angulata (угловая пятнистость). Методология базируется на использовании глубокой нейронной сети с применением стратегии контрастивного предварительного обучения (SimCLR) и последующего контролируемого дообучения. Для верификации принимаемых решений и обеспечения интерпретируемости модели использован алгоритм визуализации внимания Grad-CAM. Результаты подтверждают эффективность предложенного подхода для точной идентификации болезней и его применимость в системах интеллектуального мониторинга насаждений.

Ключевые слова: нейронные сети, компьютерное зрение, фитопатология, контрастивное обучение.

Введение

Сохранение здоровья лесных массивов и сельскохозяйственных насаждений является фундаментальным условием обеспечения экологической стабильности и продовольственной безопасности. Деревья, выступая ключевым звеном биосферы, подвержены широкому спектру патологических воздействий. Распространение фитопатогенов — грибковой, бактериальной или вирусной природы — ежегодно приводит к существенным потерям биомассы и наносит значительный экономический ущерб лесопромышленному и аграрному секторам [1].

В условиях меняющегося климата, способствующего миграции вредителей и болезней, задача своевременного выявления патологий становится критически важной.

Традиционные методы мониторинга состояния деревьев преимущественно опираются на визуальный осмотр, проводимый профильными специалистами-фитопатологами [2]. Однако данный подход обладает рядом существенных ограничений: он трудоемок, требует высокой квалификации персонала и плохо поддается масштабированию на большие территории. Кроме того, человеческий фактор неизбежно вносит элемент субъективности в диагностику, что может приводить

к ошибкам на ранних стадиях развития заболевания, когда визуальные симптомы еще слабо выражены. Лабораторные же методы, хоть и точны, требуют значительных временных затрат, что часто не позволяет принять оперативные меры по локализации очага заражения.

В последние годы развитие методов искусственного интеллекта, и, в частности, технологий глубокого обучения (Deep Learning), открыло новые перспективы в области автоматизированной диагностики. Сверточные нейронные сети продемонстрировали исключительную эффективность в задачах компьютерного зрения, позволяя выявлять сложные закономерности на цифровых изображениях, недоступные человеческому глазу. Применение подобных алгоритмов для анализа изображений листьев, коры или стволов деревьев позволяет создать системы неинвазивного, быстрого и точного мониторинга [3, 4].

Целью данной работы является разработка и исследование эффективности метода классификации болезней деревьев на основе глубоких нейронных сетей. В рамках исследования решается задача подбора алгоритмической модели, способной с высокой точностью идентифицировать тип патологии по визуальным признакам, минимизируя при этом вероятность ложноположительных и ложноотрицательных результатов.

Актуальность данного подхода обусловлена необходимостью перехода к точному земледелию и лесоводству, где автоматизация процессов диагностики служит основой для принятия своевременных и обоснованных решений по защите растений.

Материалы и методы

Эмпирическую базу для проведения вычислительных экспериментов составил аннотированный набор цифровых изображений, фиксирующих состояние листового аппарата растений. Для решения задачи классификации сформированный массив данных был структурирован и разделен на три диагностические категории, что позволяет обучить модель дифференцировать здоровые и патологически измененные образцы.

Первая группа изображений представляет собой выборку, характеризующуюся наличием признаков поражения ржавчиной. Этиология данного инфекционного процесса связана с воздействием патогенного гриба Uromyces appendiculatus (bean_rust).

На снимках, отнесенных к данному классу, отчетливо прослеживаются специфические визуальные маркеры микоза: характерные пустулы и изменения пигментации ткани листа. Использование таких данных необходимо для настройки чувствительности нейросети к текстурным и цветовым аномалиям, свойственным грибковым инфекциям.

Вторая группа сформирована из изображений листьев винограда с симптоматикой угловой пятнистости. Возбудителем данной патологии выступает гриб Mycosphaerella angulata (angular_leaf_spot).

Включение этого класса в обучающую выборку позволяет модели научиться идентифицировать специфические некротические паттерны, отличающиеся по своей геометрии и локализации от проявлений ржавчины, что повышает обобщающую способность алгоритма при работе с различными типами фитопатогенов.

Третья группа является контрольной и содержит снимки листьев, не имеющих внешних проявлений инфекционных или грибковых заболеваний (healthy).

Наличие «здорового» класса критически важно для верификации работы модели: это позволяет минимизировать уровень ложноположительных срабатываний и научить нейронную сеть корректно классифицировать норму, отличая ее от патологических состояний.

Методологическая стратегия работы базируется на применении архитектуры глубоких нейронных сетей с использованием двухступенчатого протокола обучения. В качестве подхода для формирования признакового пространства выбран метод SimCLR (Simple Framework for Contrastive Learning of Visual Representations), реализующий парадигму контрастивного обучения [5, 6, 7].

Процесс построения классификатора разделен на два последовательных этапа: на данном этапе модель обучается в режиме самообучения (self-supervised learning), не используя информацию о метках классов. Алгоритм SimCLR оптимизирует параметры сети, минимизируя расстояние в векторном пространстве между различными аугментированными версиями одного и того же изображения и максимизируя его для отличающихся объектов. Это позволяет модели сформировать устойчивые и информативные визуальные представления (эмбеддинги), выделяя ключевые структурные особенности листьев независимо от их патологического статуса.

На втором этапе производится точная настройка весов предварительно обученной сети с использованием целевого аннотированного набора данных (обучение с учителем). На этой стадии к модели добавляется классификационный слой, и происходит адаптация сформированных признаков для решения конкретной задачи дифференциации трех описанных групп: здоровых растений и образцов, пораженных специфическими патогенами [8].

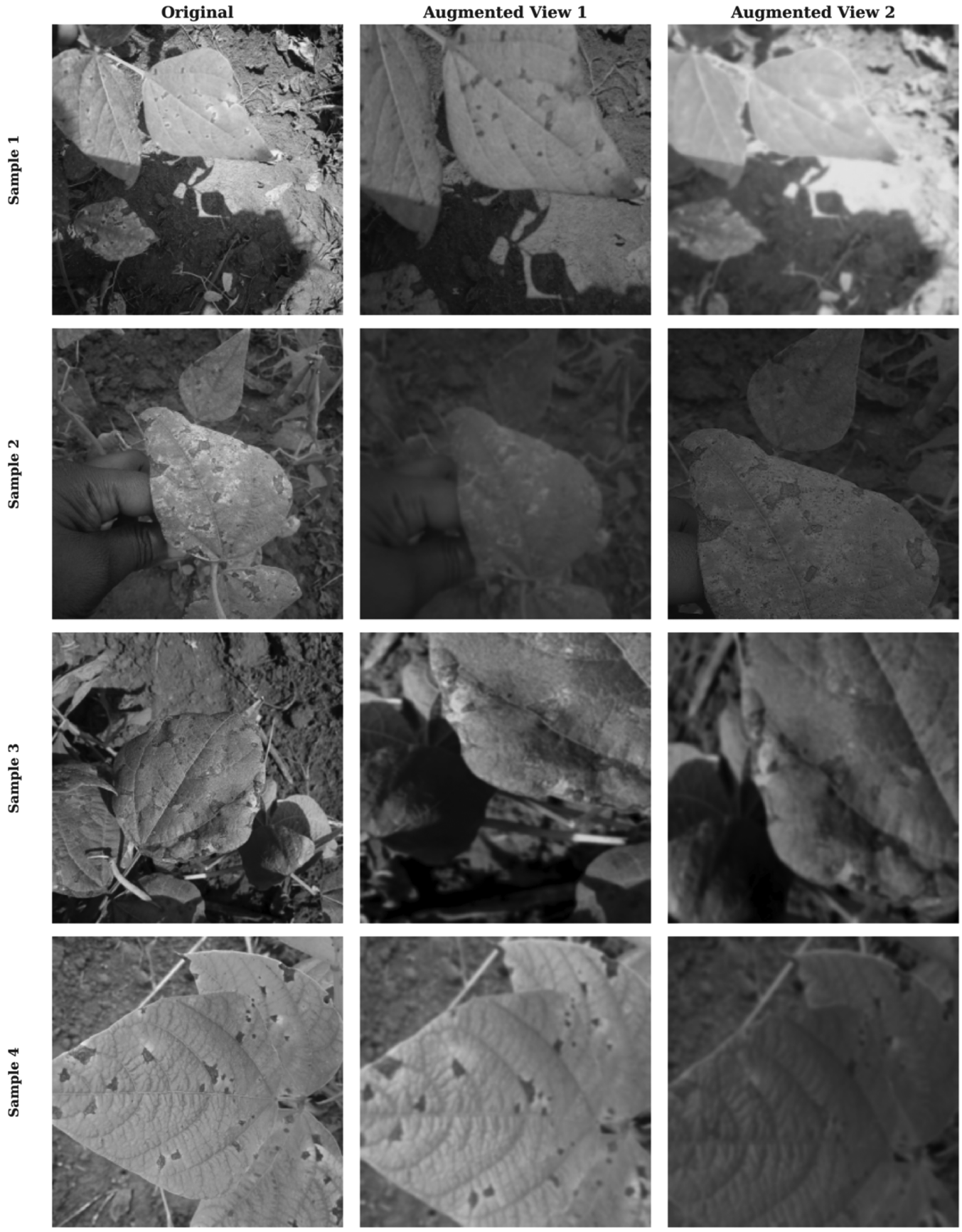


Рис. 1. Аугментированые изображения, используемые контрастным алгоритмом

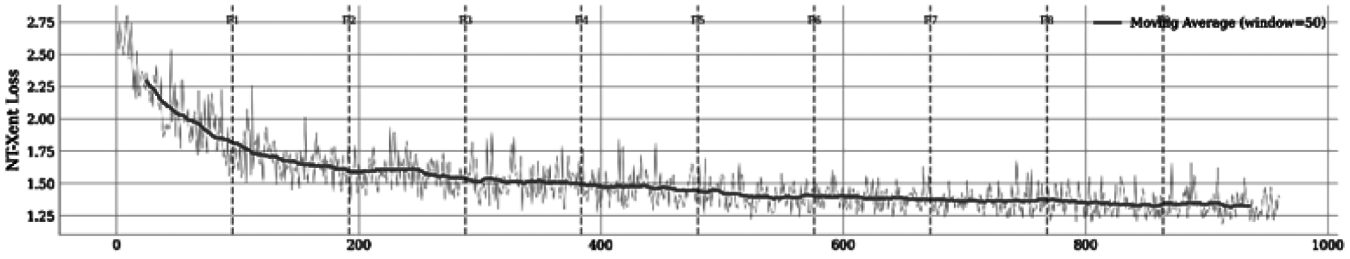


Рис. 2. Кривая обучения по батчам

С целью валидации системы был применён ряд методов. В качестве базового метода контроля модели, как во время стадии тренировки, в том числе и в течение периода предтренеровки, так и во время проверки системы, с нейронной сети были сняты метрики качества её работы.

Такие метрики как F-1, Accuracy, Loss были применены в данном моделировании. Перечисленные показатели качества влияли не только на оценку контролируемого обучения постфактум, но и непосредственно на его ход, контролируя его течения при помощи оптимизации модели вида Grid Search.

Контролируемая модель обучалась до достижения максимальной сходимости, в то время как на SSL этапе система должна была достигнуть максимальной косинусной схожести аугментаций одного и того же образца.

Для всесторонней верификации работы алгоритма, помимо стандартных количественных метрик оценки производительности (точность, полнота, F-мера), был применен метод визуальной интерпретации решений сверточных нейронных сетей — Grad-CAM (Gradient-weighted Class Activation Mapping) [9, 10, 11].

Интеграция данного инструмента позволяет решить проблему «черного ящика», свойственную методам глубокого обучения. Технология Grad-CAM генерирует тепловые карты активации, накладываемые на исходное изображение. Эти карты визуализируют распределение «внимания» модели, выделяя конкретные области листа, которые внесли решающий вклад в присвоение того или иного класса. Такой подход дает возможность качественно оценить адекватность обучения: он подтверждает, что искусственная нейронная сеть идентифицирует заболевание, опираясь именно на специфические признаки патологии (очаги некроза, грибковые образования), а не на посторонние шумы или артефакты фона.

Результаты и обсуждение

В начале обучения описанной ранее системы были выведены как сами анализируемые алгоритмом образцы, так и их аугментации, непосредственно используемые для обучения модели. Данная визуализация продемонстрирована на рисунке 1.

Оценив визуально данное изображение, можно сделать вывод о высоком разнообразии данных, подающихся на вход модели. Данный фактор критически необходим для качественного обучения контрастивной модели.

После завершения первого этапа обучения была выведена кривая обучения по батчам. Рисунок 2 демонстрирует описанную кривую.

Данный график описывает эффект аппроксиматического уменьшения потери и как следствие качественного обучения системы. Стоит отметить относительно небольшую разницу между начальным лоссом и конечным, что может означать применение небольшого количества эпох при обучении системы.

Важным показателем, дополняющим показания кривой, является матрица сходства, представленная на рисунке 3.

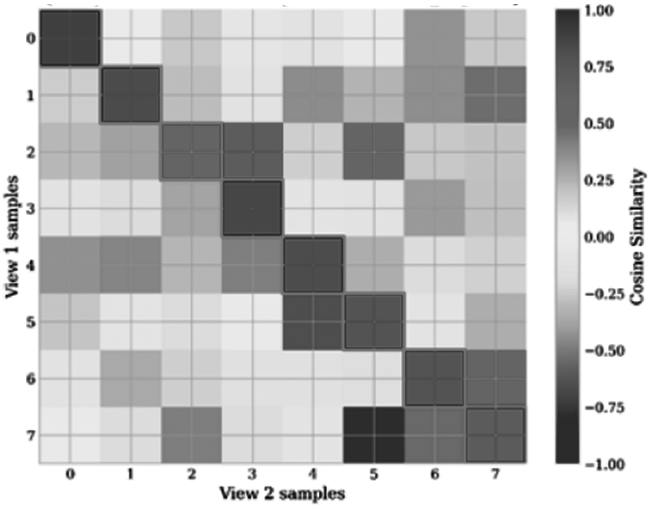


Рис. 3. Косинусное сходство образцов
на заключительной эпохе

Данная матрица демонстрирует максимальное сходство между разными версиями одного и того же изображения и максимальную разницу между различными между собой экземплярами.

Итоговый вид данной визуализации свидетельствует о качественном обучении самоконтролируемого этапа обучения.

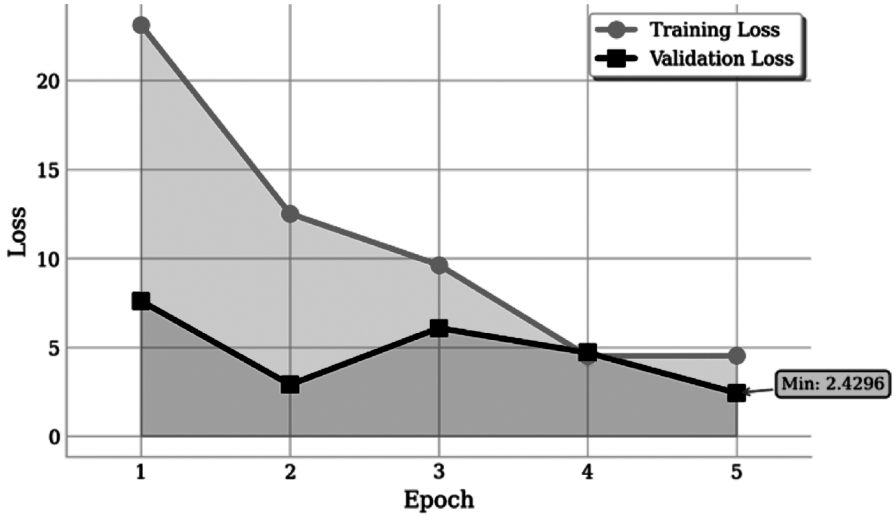


Рис. 4. Кривые обучения контролируемого этапа обучения

После получения контрастного энкодера модель была обучена контролируемо. На этом этапе были получены метрики качества и кривые обучения.

На рисунке 4 показаны кривые потерь валидации и тренировки.

Из данного рисунка следует что модель обучалась вполне стабильно, однако высокая потеря может свидетельствовать в том числе о малом количестве данных, поданных на вход модели. Однако несмотря на повышенный loss, система показала адекватное соотношения правильно и неправильно предсказанных классов, что продемонстрировано на рисунке 5, представляющий собой матрицу ошибок.

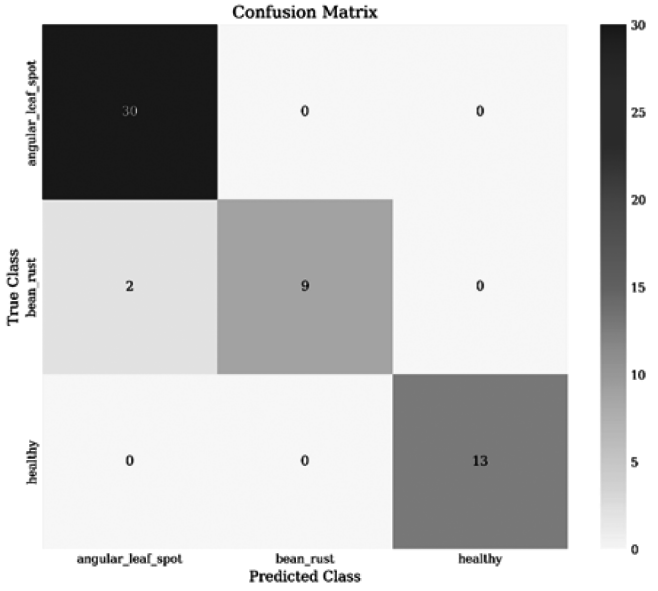


Рис. 5. Матрица путаницы (ошибок) полученная на контролируемом этапе обучения

Исходя из данной матрицы можно сделать вывод о небольшом количестве неправильно предсказанных моделью результатов, это может свидетельствовать о высоком качестве обучения сети.

Метрики, полученные в данном эксперименте, подтверждают работоспособность метода глубокого обучения. Их показатели представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Метрики системы

Metric	Value
Val Accuracy	0.9630
Val F-1 score	0.9610
Min Val Loss	2.4296

Опираясь на данные таблицы, можно прийти к выводу, что система достигла баланса в соотношении правильных и неправильных предсказаний, имея высокую долю верно положительных результатов.

Для подтверждения высокого качества обучения были выведены Grad-CAM визуализации, представленные на рисунке 6.

Из приведённого изображения можно сделать вывод, что модель «концентрирует внимание» на признаконесущих фрагментах, данных на вход.

На основании проведённого исследования можно сделать вывод, что модель контрастного обучения справилась с задачей не только определения наличия поражённости исследуемых листьев патогеном, но и классификации самих патологических состояний.

Выводы

Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность применения методов глубокого

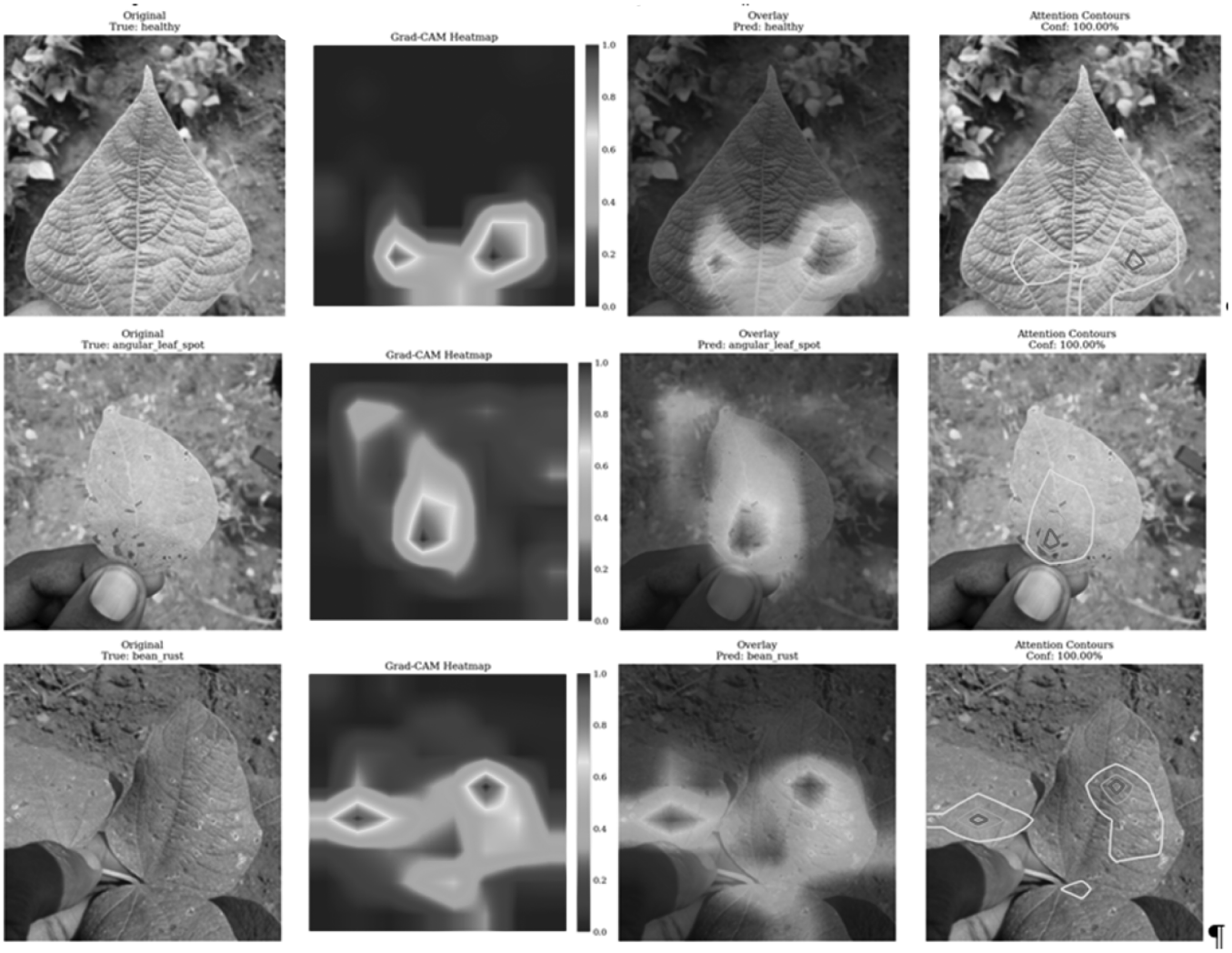


Рис. 6. Grad-CAM итоговой модели

обучения для решения задач автоматизированной диагностики фитопатологий. Предложенная архитектура нейронной сети, использующая стратегию двухэтапного обучения — предварительную подготовку методом SimCLR с последующим контролируемым дообучением, — продемонстрировала устойчивую способность к дифференциации здоровых тканей и образцов, пораженных грибковыми инфекциями (Uromyces appendiculatus и Mycosphaerella angulata).

Использование контрастивного обучения позволило модели сформировать качественные признаковые представления даже в условиях ограниченного объема размеченных данных, что особенно актуально для специфических задач лесопатологии. Важным результатом работы стало подтверждение адекватности принимаемых нейросетью решений: применение алгоритма Grad-CAM показало, что фокус внимания модели при классификации совпадает с реальной локализацией клинических симптомов заболеваний (пустул и некротических пятен), исключая вероятность ложного срабатывания на фоновые объекты.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности внедрения разработанного подхода в практические системы мониторинга. Интеграция подобных алгоритмов в комплексы точного земледелия и лесоохраны позволит существенно повысить оперативность выявления биологических угроз, минимизировать человеческий фактор при осмотре насаждений и, как следствие, снизить экономические и экологические риски. Дальнейшее развитие работы видится в расширении спектра диагностируемых патологий и адаптации модели для работы в условиях реального времени на мобильных платформах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проблемы и мониторинг природных экосистем: сборник статей V Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 29 октября 2018 года / Пензенский государственный аграрный университет, Межотраслевой научно-информационный центр; Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского. — Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2018. — 178 с. — ISBN 978-5-94338-934-4.
2. Ступина А.В. Фитопатологический мониторинг лесных экосистем / А.В. Ступина // Молодая мысль: наука, технологии, инновации: материалы VII (XIII) Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Братск, 16–20 марта 2015 года. — Братск: Братский государственный университет, 2015. — С. 88–90.
3. Ступичев А.К. Распознавание образов и обучение нейронных сетей / А.К. Ступичев, И.П. Парфенов // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: сборник материалов VII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, приуроченной к 110-летию со дня рождения Т.В. Алексеевой, Омск, 20–21 апреля 2023 года. — Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2023. — С. 533–537.
4. Kuznetsov A. Digital image forgery detection using deep learning approach / A. Kuznetsov // Сборник трудов ИТНТ-2019, Самара, 21–24 мая 2019 года. Vol. 2. — Самара: Новая техника, 2019. — P. 373–376. — DOI 10.1088/1742–6596/1368/3/032028.
5. Еленников Г.М. Машинное обучение нейронных сетей «без учителя» / Г.М. Еленников, Л.Д. Гусева, Е.В. Ершов // Современные информационные технологии. Теория и практика: Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции: В 2-х частях, Череповец, 29 ноября 2023 года. — Череповец: Череповецкий государственный университет, 2024. — С. 211–216.
6. Chen T., Kornblith S., Norouzi M., Hinton G. A Simple Framework for Contrastive Learning of Visual Representations // Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning. — Vienna, Austria: PMLR, 2020. — Vol. 119. — arXiv:2002.05709v3 [cs.LG].
7. Jiang D. Speech SimCLR: Combining Contrastive and Reconstruction Objective for Self-supervised Speech Representation Learning / D. Jiang, W. Li, M. Cao, W. Zou, X. Li // arXiv preprint arXiv:2010.13991. — 2021. — 5 July.
8. Rodchenko V.G. Supervised Learning: from the allocation algorithm to the identification of hidden interpretable patterns / V.G. Rodchenko // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. — 2020. — No. 4. — P. 253–256.
9. Чайка К.В. Оценивание качества обучения нейросетевых алгоритмов обработки информации / К.В. Чайка, Р.П. Шестопалов // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. — 2021. — № 2(60). — С. 17–26.
10. Реусова Т.В. Оценка качества шкурок пушных зверей с помощью компьютерного зрения: ключевые параметры / Т.В. Реусова, Н.А. Верезубова, М.В. Новиков // Трансформации современного общества: теоретические и практические аспекты: Материалы VII Международной научно-практической конференции, Москва, 24–25 апреля 2025 года. — Москва: Московский институт экономики, политики и права, 2025. — С. 157–161.
11. Neural Network Analysis of Meat Quality: A Comparative Study of Forward-Forward and Backpropagation Learning Methods / N.A. Verezubova, A. Chekulaev, O. Yakovleva [et al.] // Smart Cities and Sustainable Regional Development (SMARTGREENS 2025), Екатеринбург, 25 сентября 2025 года. — Екатеринбург: Institute of Digital Economics and Law, 2025. — P. 190–196. — DOI 10.63550/ICEIP.2025.99.27.026.

© Верезубова Наталья Афанасьевна (nverez@mail.ru); Яковлева Ольга Анатольевна (yakovleffo@yandex.ru);
Чекулаев Артур Анатольевич
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.08

АНАЛИЗ УДОБОЧИТАЕМОСТИ ДЛЯ РАЗНЫХ ВИДОВ ТЕКСТА

READABILITY ANALYSIS FOR DIFFERENT TYPES OF TEXT

B. Goryachkin
M. Zhamnova

Summary. This article experimentally tested the effectiveness of Oborneva's formula on texts of various genres and determined the limits of its applicability to Russian-language texts.
Based on the study, it was found that Oborneva's formula is effective for fiction, educational, and journalistic texts, confirming its validity for its intended application. Critical limitations were identified for technical documents with extreme syntactic parameters, where the formula exceeds the scale. English-language Flesch formulas are systematically inapplicable to Russian texts; all FRE results are negative or incorrect.

Keywords: text readability, Flesch formula, Oborneva adaptation, Russian language.

Горячкин Борис Сергеевич
кандидат технических наук, доцент,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
bsgor@mail.ru
Жамнова Марина Сергеевна
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
2002_marinka@mail.ru

Аннотация. В данной статье проведена экспериментальная проверка эффективности формулы Оборневой на текстах различных жанров и определены границы её применимости для русскоязычных текстов.
На основании проведенного исследования выявили, что формула Оборневой эффективна для художественных, учебных и публицистических текстов, что подтверждает её валидность для исходной области применения. Выявлены критические ограничения для технических документов с экстремальными синтаксическими параметрами, где формула выходит за пределы шкалы. Англоязычные формулы Flesch системно неприменимы к русским текстам, все результаты FRE отрицательные или некорректные.

Ключевые слова: читабельность текста, формула Flesch, адаптация Оборневой, русский язык.

Введение

Оценка читаемости текстов занимает центральное место в задачах педагогики, прикладной лингвистики и автоматической обработки естественного языка, поскольку позволяет количественно сопоставлять сложность материалов для разных аудиторий и целей обучения. Для английского языка одной из наиболее известных метрик является индекс Flesch Reading Ease и связанный с ним Flesch–Kincaid Grade Level, основанные на средней длине предложений и среднем числе слогов в слове [1].

При прямом переносе этих формул на русский язык возникают систематические искажения, связанные с морфологическими и синтаксическими особенностями русского языка, отличающегося иной структурой слога и характерными длинами слов и предложений. В результате применение исходных коэффициентов Флеша к русскоязычным текстам приводит к некорректным значениям индекса, вплоть до отрицательных значений шкалы читаемости.

Для учета этих различий была предложена адаптация формулы Флеша для русского языка, в которой скорректированы коэффициенты при средней длине предложения и среднем числе слогов в слове. Данная модификация (часто упоминаемая как формула Оборневой [1]) показала адекватные результаты на ряде учебных текстов и школьных материалов, что стимулировало ее дальнейшее использование в образовательной и издательской практике.

Однако область корректного применения этой адаптации остается ограниченной и до конца не описанной, особенно в отношении специализированных текстов различных жанров. При этом именно для таких текстов объективная оценка сложности особенно важна, поскольку она влияет на доступность содержания и эффективность коммуникации с целевой аудиторией.

В настоящей работе рассматривается применимость формул, основанных на модели Флеша и их адаптации к русскому языку, к корпусу русскоязычных текстов разных жанров. В качестве основы используются классические формулы читаемости и коэффициенты, предложенные Оборневой, но основной акцент делается на том, какие результаты дают эти индексы на реальных текстах и где проявляются их методологические ограничения.

Понятие читабельности текста

Читабельность (readability) — это характеристика текста, отражающая легкость его восприятия и понима-

ния читателем. В отличие от чистоты стиля или литературных достоинств, читабельность — это техническая метрика, основанная на объективных параметрах текста. Согласно определению Flesch (1948), читабельность текста определяется следующими факторами: длина предложений, сложность слов, структурированность.

Научные исследования (Kincaid et al., 1975; Gunning, 1952) показали сильную корреляцию между этими параметрами и способностью читателя понять текст. Ребенку 10 лет легче прочитать текст с короткими словами и простыми предложениями, чем взрослому профессионалу — прочитать сложный научный текст.

Формула Flesch: классический подход

Формула Flesch Reading Ease, разработанная Рудольфом Флешем в 1948 году [1], стала классическим инструментом для оценки читабельности английского текста, формула 1:

$$FRE = 206.835 - 1.015 \cdot ASL - 84.6 \cdot ASW, \quad (1)$$

где

— ASL = количество слов / количество предложений
— ASW = количество слогов / количество слов

Интерпретация шкалы FRE приведена в таблице 1.

Таблица 1.

Шкала оценки удобочитаемости

FRE Score	Читабельность
100–90	Очень легко
90–80	Легко
80–70	Довольно легко
70–60	Стандартно
60–50	Довольно сложно
50–30	Сложно
30–0	Очень сложно

Эта шкала отражает субъективное восприятие текста и используется в журналистике, образовательном издательском деле и текстовых редакторах для грубой оценки доступности материалов для массовой аудитории.

На основе тех же параметров текста была предложена модификация формулы Флеша, переводящая удобочитаемость в требуемый уровень образования читателя. Эта формула известна как Flesch–Kincaid Grade Level (FKGL) [2] и оценивает, **какой класс школы необходимо закончить, чтобы понимать текст** (формула 2):

$$FKGL = 0.39 \cdot ASL + 11.8 \cdot ASW - 15.59, \quad (2)$$

Значение FKGL интерпретируется как «количество лет обучения», необходимое для комфортного понимания текста. Для удобства интерпретации часто используют шкалу, представленную в таблице 2.

Таблица 2.

Шкала оценки удобочитаемости по уровню образования

FKGL	Примерный уровень читателя
0–3	Детский сад / Начальная школа
3–6	Начальная школа
6–9	Средняя школа
9–12	Старшая школа / выпускники
12–15	Студенты колледжей и вузов
15–18	Аспирантура

Таким образом, в рамках подхода Флеша фактически существуют **два взаимосвязанных индекса читабельности**: FRE, измеряющий «легкость» текста по шкале от 0 до 100, и FKGL, переводящий те же количественные характеристики (ASL и ASW) в понятный педагогам и издателям формат «класс школы» или «количество лет обучения, необходимое для понимания текста».

Русскоязычная адаптация — формула Оборневой

Прямое применение формулы Flesch к русским текстам дает неправильные результаты. И.В. Оборнева провела масштабное исследование [3] и адаптировала формулы Флеша–Кинкейда для русского языка на материале корпуса параллельных русско-английских художественных текстов объёмом около 6 млн слов.

Оборнева осуществила сравнительный анализ средней длины слова в русском и английском языках. Её основной вывод заключался в том, **что среднее английское слово содержит 2,97 слогов, в то время как среднее русское слово имеет 3,29 слогов**. Это фундаментальное различие между языками потребовало корректировки коэффициентов исходной формулы Флеша для адаптации к русскому языку.

На основе проведённого анализа Оборнева получила адаптированную формулу 3 удобочитаемости для русского языка:

$$FRE = 206.835 - 1.3 \cdot ASL - 60.1 \cdot ASW, \quad (3)$$

Альтернативная версия формулы 2 Флеша-Кинкейда для русского языка, полученная Оборневой (формула 4), имеет вид:

$$FKGL = 0.5 \cdot ASL + 8.4 \cdot ASW - 15.59, \quad (4)$$

По сравнению с исходной формулой Флеша для английского языка, в интерпретации была увеличена роль средней длины предложения и снижена «стоимость» слоговой насыщенности слова. Это отражает то, что русские предложения короче, а слова — длиннее, но суммарная информационная нагрузка предложения остаётся сопоставимой.

Формирование корпуса тестовых текстов

Для валидации методики выбраны 5 текстов разных жанров:

1. Художественная литература (Толстой, «Война и мир»)
2. Учебный материал (Текст об основах математики для 5–6 класса)
3. Публицистика (новостная статья)
4. Техническая документация (Руководство пользователя с терминами)
5. Научная статья (Отрывок из научной публикации)

Результаты сравнительного анализа

Художественный текст представлен фрагментом из романа Л.Н. Толстого «Война и мир» (описание дуба на дороге). Текст содержит 194 слова, 14 предложений и 383 слога. Средняя длина предложения составляет 13,86 слов, среднее число слогов на слово — 1,97. Фрагмент характеризуется развернутыми синтаксическими конструкциями с причастными и деепричастными оборотами, прямой речью и сложноподчиненными предложениями, типичными для русской классической прозы XIX века. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Результаты анализа художественного текста

Формула	Расчет	Результат	Интерпретация
English FRE	206,835 – 1.015×13,857 – 84.6×1,974	25,77	Очень сложно
Russian FRE	206,835 – 1,3×13,857 – 60,1×1,974	70	Стандартно
English FKGL	0,39×13,857 + 11,8×1,974 – 15,59	13,11	Студенты
Russian FKGL	0,5×13,857 + 8,4×1,974 – 15,59	7,92	Средняя школа

Таблица 3 демонстрирует, что использование англоязычных формул (English FRE и FKGL) для оценки русского художественного текста приводит к искаженным результатам: индекс FRE указывает на «очень сложный» текст, а FKGL — на уровень, соответствующий студентам колледжей и вузов, что не отражает реальную читательскую доступность произведения.

В то же время адаптированные русскоязычные формулы по Оборневой дают оценки, согласующиеся с интуитивным восприятием: текст можно отнести к диапазону «стандартной» сложности и уровню средней школы. Это подтверждает необходимость использования специализированных русскоязычных моделей оценивания читаемости для корректного анализа художественных текстов на русском языке.

Учебный текст взят из школьного материала по геометрии и содержит определение квадрата и его свойств. Текст включает 52 слова, 8 предложений и 134 слога. Средняя длина предложения составляет 6,5 слов, среднее число слогов на слово — 2,58. Материал характеризуется короткими простыми предложениями, прямым порядком слов и минимальным использованием сложных синтаксических конструкций, что типично для учебных текстов начальной и средней школы. Результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4.

Результаты анализа учебного текста

Формула	Расчет	Результат	Интерпретация
English FRE	206,835 – 1,015×6,5 – 84,6×2,577	–17,77	Отрицательное значение
Russian FRE	206,835 – 1,3×6,5 – 60,1×2,577	43,51	Сложно
English FKGL	0,39×6,55 – 11,8×2,577 – 15,59	17,37	Ошибка! Аспирантура
Russian FKGL	0,5×6,55 + 8,4×2,577 – 15,59	9,33	Старшая школа

Англоязычные формулы снова дают заведомо некорректные оценки для русскоязычного учебного текста: индекс English FRE принимает отрицательное значение, а English FKGL соответствует уровню «аспирантуры», что очевидно не совпадает с реальной аудиторией школьного курса геометрии. Адаптированные показатели по Оборневой, напротив, отражают ситуацию существенно точнее: формально текст попадает в зону **старших классов**, но по содержанию и форме изложения представляет собой нормальный, методически корректный материал для **средней школы**, где использование терминов «диагональ», «периметр» и «прямой угол» компенсируется простой синтаксической организацией и прозрачными объяснениями.

Публицистический текст представляет собой фрагмент аналитической колонки о политической ситуации в Государственной Думе. Текст содержит 136 слов,

13 предложений и 322 слога. Средняя длина предложения составляет 10,46 слов, среднее число слогов на слово — 2,37. Материал характеризуется риторическими вопросами, разговорными конструкциями («вполне себе политическую», «держать нос по ветру»), авторскими неологизмами и эмоционально окрашенной лексикой, типичной для публицистики. Результаты приведены в таблице 5.

Таблица 5.

Результаты анализа публицистического текста

Формула	Расчет	Результат	Интерпретация
English FRE	206,835 – 1,015×10,46 – 84,6×2,37	–4,28	Ошибка!
Russian FRE	206,835 – 1,3×10,46 – 60,1×2,37	50,8	Довольно сложно
English FKGL	0,39×10,46 – 11,8×2,37 – 15,59	16,45	Аспирантура
Russian FKGL	0,5×10,46 + 8,4×2,37 – 15,59	9,548	Старшая школа

Англоязычные формулы, как и в предыдущих случаях, дают некорректные результаты для русской публицистики: English FRE близок к нулю, а English FKGL соответствует уровню «аспирантуры», что не отражает реальности. Адаптированные по Оборневой показатели точно характеризуют текст как довольно сложный, но доступный для старшей школы — типичный уровень качественной аналитической публицистики, где длинные предложения компенсируются умеренной лексической сложностью.

Технический текст представляет собой фрагмент описания микроконтроллера MK51 из технической документации. Текст содержит 120 слов, 3 предложения и приблизительно 332 слога. Средняя длина предложения составляет 40 слов, среднее число слогов на слово — 2,77. Материал характеризуется предельно длинными сложносочиненными и сложноподчиненными предложениями с множественными однородными членами, обилием технических терминов и аббревиатур (АЛУ, ПЗУ, ОЗУ, БИС), а также номенклатурными обозначениями и точными количественными характеристиками, типичными для спецификаций аппаратных средств и технической документации. Результаты приведены в таблице 6.

В отличие от предыдущих случаев, техническая документация по MK51 выходит за пределы применимости обеих формул: English FRE и Russian FRE дают отрицательные значения, а FKGL значительно превышают шкалу для обоих языков. Экстремальная сложность обусловлена очень длинными предложениями, что выводит текст

Таблица 6.

Результаты анализа технического текста

Формула	Расчет	Результат	Интерпретация
English FRE	206,835 – 1,015×40 – 84,6×2,77	–68,107	Вне шкалы
Russian FRE	206,835 – 1,3×40 – 60,1×2,77	–11,642	Вне шкалы
English FKGL	0,39×40 – 11,8×2,77 – 15,59	32,696	Вне шкалы
Russian FKGL	0,5×40 + 8,4×2,77 – 15,59	27,678	Вне шкалы

за рамки стандартных метрик. Такие значения FRE сигнализируют, что это узкоспециализированный материал.

Научно-популярный текст представляет собой фрагмент из образовательного материала о механизме действия антибиотиков. Текст содержит 97 слов, 9 предложений и приблизительно 313 слогов. Средняя длина предложения составляет 10,77 слов, среднее число слогов на слово — 3,23. Материал характеризуется умеренной длиной предложений при высокой плотности многосложных терминов медико-биологического характера (антибиотик, бактериальный, отравления), метафорическими объяснениями сложных процессов («выстроить оборонительный вал», «бактерия взрывается») и упрощенным изложением научных концепций для неспециализированной аудитории. Результаты приведены в таблице 7.

Таблица 7.

Результаты анализа художественного текста

Формула	Расчет	Результат	Интерпретация
English FRE	206,835 – 1,015×10,77 – 84,6×3,23	–77,35	Ошибка!
Russian FRE	206,835 – 1,3×10,77 – 60,1×3,23	–1,289	Вне шкалы
English FKGL	0,39×10,77 – 11,8×3,23 – 15,59	26,72	Вне шкалы
Russian FKGL	0,5×10,77 + 8,4×2,77 – 15,59	16,927	Аспирантура

Формула Оборневой дает некорректный результат для текста о бактериях, хотя он явно предназначен для школьников 8–9 классов. Основная проблема — формула штрафует за длинные слова, не учитывая, что термины повторяются и становятся знакомыми читателю. Текст написан простым языком с объяснениями, примерами и метафорами, что характерно для научного стиля, а не

академической литературы. Это демонстрирует ограничение формулы Оборневой для научно-популярных текстов с повторяющейся терминологией, требующее обязательной коррекции при практическом применении.

Визуализированная оценка полученных результатов

Для наглядного сравнения результатов были построены шесть столбчатых диаграмм, отражающих значения индексов FRE и FKGL для пяти типов текстов: художественного, учебного, публицистического, технического и научно-популярного.

На рисунке 1 представлены значения индекса FRE, рассчитанные по исходной англоязычной формуле Флеша для пяти типов русскоязычных текстов. Почти во всех случаях индекс принимает отрицательные значения, за исключением художественной литературы, что формально соответствует «чрезвычайно трудному» или вовсе «нечитаемому» тексту. Такой результат явно противоречит фактическому уровню сложности художественного, учебного и публицистического материалов и демонстрирует полную неприменимость оригинальной формулы Флеша к русскому языку.

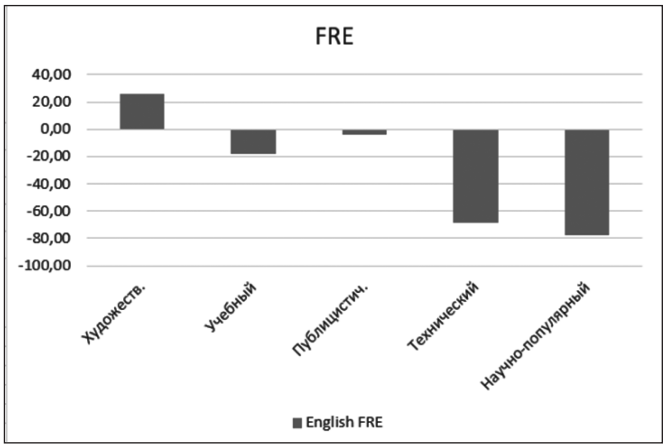


Рис. 1. График для FRE по Флешу

На рисунке 2 представлены значения Russian FRE, полученные по формуле Оборнёвой. Для художественного, учебного и публицистического текстов значения соответствуют ожидаемому росту сложности от художественной прозы к аналитической публицистике. В то же время для технической документации и научно-популярного текста индекс опускается к нулю и уходит в отрицательную область, демонстрируя, что даже адаптированная формула не справляется с оценкой специализированных текстов с высокой терминологической насыщенностью и экстремально длинными синтаксическими конструкциями.

На рисунке 3 показаны пары значений FRE, вычисленных по английской формуле Флеша и по адаптированной формуле Оборнёвой, для каждого из пяти текстов.

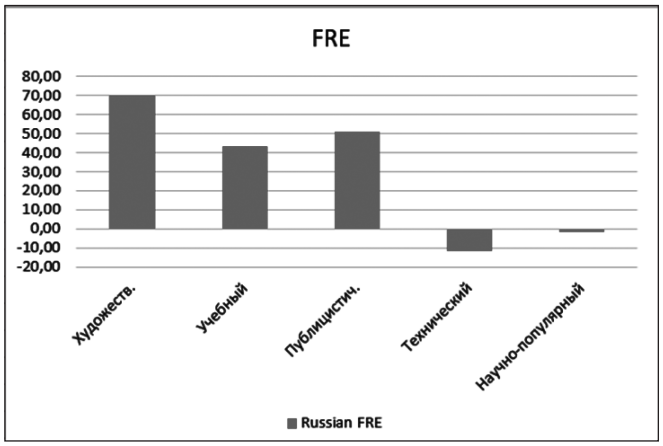


Рис. 2. График для FRE по формуле Оборневой

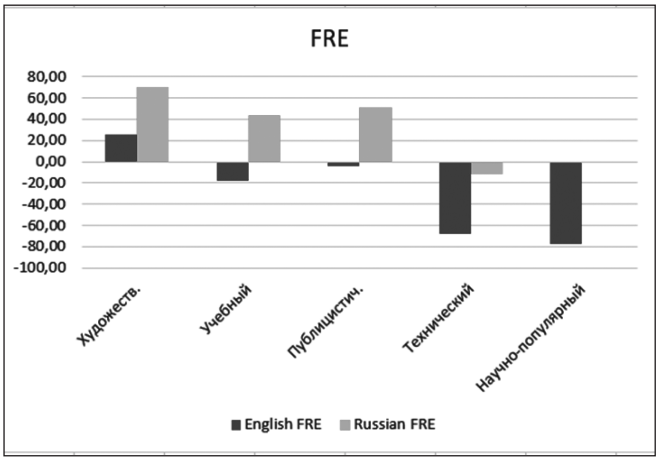


Рис. 3. График сравнения English FRE и Russian FRE

На рисунке 4 показаны значения English FKGL, рассчитанные по оригинальной формуле Флеша–Кинкейда. Видно, что даже для сравнительно простых текстов (школьное объяснение квадрата, научно-популярный текст о бактериях) индекс находится в диапазоне 16–27, что соответствует уровню аспирантуры и существенно завышает реальные требования к читателю. Такой систематический сдвиг свидетельствует о том, что использование англоязычной формулы FKGL без адаптации для русских текстов приводит к грубой переоценке сложности.

На рисунке 5 представлены значения Russian FKGL для пяти типов текстов. Для художественного текста индекс составляет около 11, для учебного и публицистического — порядка 9–10, что соответствует старшим классам школы и согласуется с целевой аудиторией этих материалов. В техническом тексте FKGL возрастает до ~28, а в научнопо-пулярном — до ~17, то есть формально относится к уровню аспирантуры, что явно завышает реальную сложность. Это подтверждает, что формула Оборнёвой корректно работает в своей исходной

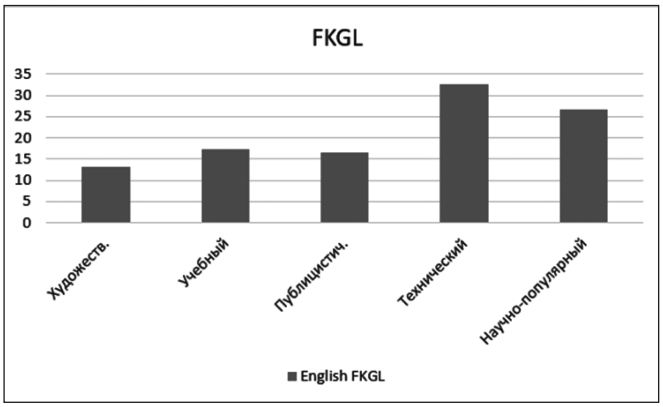


Рис. 4. График для FKGL по Флешу–Кинкейда

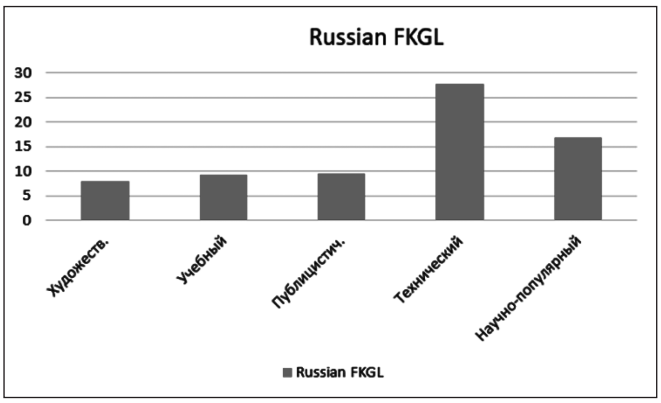


Рис. 5. График для FKGL по формуле Оборневой

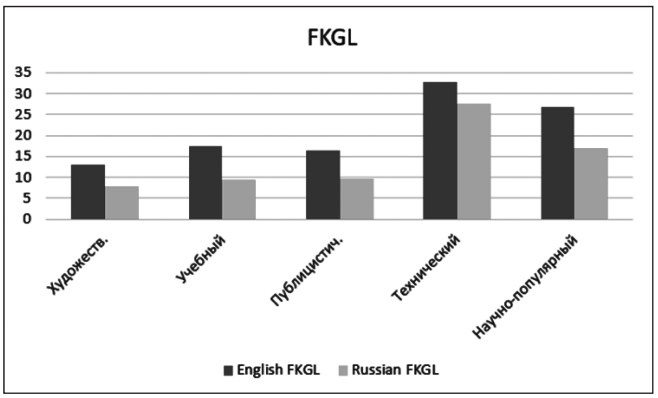


Рис. 6. График сравнения English FKGL и Russian FKGL

области (художественная и учебная проза), но требует доработки для текстов с высокой долей специализированной терминологии и нетипичной синтаксической структурой.

На рисунке 6 сравниваются значения индекса FKGL, вычисленного по англоязычной формуле Флеша–Кинкейда и по модификации Оборнёвой.

Сводный анализ пяти жанров

В таблице 8 представлены сводные результат дл всех 5 видов текстов.

Анализ пяти типов текстов подтверждает ключевые положения исследования. Английская формула Flesch систематически неприменима к русским текстам, что делает её бесполезной. Формула Оборневой эффективно оценивает художественные, учебные и публицистические тексты, подтверждая заявленную точность. Однако для специализированных текстов выявлены принципиальные ограничения: техническая документация с экстремальными ASL полностью выходит за шкалу, а научно-популярные тексты с повторяющейся терминологией недооцениваются.

Заключение

Создание объективных методик оценки читабельности является важной задачей при работе с русскоязычными текстами различных жанров. От корректной оценки сложности текста зависят качество образовательных материалов, доступность публицистики и эффективность коммуникации в научно-технической сфере. Прямое использование англоязычных формул, разработанных для аналитического строя английского языка, приводит к методическим ошибкам и искажению реальной читаемости русских текстов.

В данной работе были рассмотрены ключевые отличия между английским и русским языками с точки зрения длины слова и предложения, проанализированы классические формулы Флеша–Кинкейда и их адапта-

Таблица 8.

Сводные результаты

Тип текста	W	ASL	ASW	English FRE	Russian FRE	English FKGL	Russian FKGL
Художеств.	55	6,88	2,73	25,77	70,00	13,11	7,92
Учебный	52	6,50	2,58	–17,77	43,51	17,37	9,33
Публицистич.	136	10,46	2,37	-4,28	50,80	16,45	9,548
Технический	120	40,00	2,77	–68,11	–11,64	32,696	27,678
Научный	97	10,77	3,23	–77,35	–1,29	26,72	16,927

ция к русскому языку, а также обоснованы измененные коэффициенты в формуле Оборнёвой. На основе этих положений предложена пошаговая методика расчета показателей читабельности для русских текстов, включающая вычисление основных параметров (количество слов, предложений и слогов), применение модифицированных формул и интерпретацию результатов в соответствии с уровнями подготовки читателя. Отдельное внимание уделено сравнению результатов на разных типах текстов (художественных, учебных, публицистических, технических и научно-популярных) и визуализации расхождений между англоязычной и адаптированной формулами.

Было выявлено, что англоязычная формула Флеша даёт некорректные результаты для русских текстов, тогда как адаптированная формула Оборнёвой демонстрирует согласованность с интуитивным и экспертным восприятием сложности художественных и публицистических текстов. При этом для узкоспециализированной технической и научной документации требуется дальнейшая доработка подхода. Полученные результаты могут использоваться в образовательной практике, издательской деятельности, журналистике и системах автоматической обработки текстов для повышения доступности информации и более точного подбора материалов под целевую аудиторию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Flesch R. A new readability yardstick //Journal of applied psychology. — 1948. — Т. 32. — №. 3. — С. 221.
2. Kincaid J.P. et al. Derivation of new readability formulas (automated readability index, fog count and flesch reading ease formula) for navy enlisted personnel. — 1975. — №. RBR875.
3. Оборнева И.В. Автоматизированная оценка сложности учебных текстов на основе статистических параметров. — 2006.

© Горячкин Борис Сергеевич (bsgor@mail.ru); Жамнова Марина Сергеевна (2002_marinka@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.09

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ДЕЗИНФОРМАЦИИ В ЦИФРОВОЙ МЕДИАСРЕДЕ

SYSTEMATIC ANALYSIS OF THE LIFE CYCLE OF DISINFORMATION IN THE DIGITAL MEDIA ENVIRONMENT

B. Goryachkin
D. Samoylov

Summary. The article explores the phenomenon of disinformation in the digital media environment through the lens of its life cycle. It examines the key stages of disinformation from strategic intent and content creation to dissemination, entrenchment, detection, and neutralization. The mechanisms of fake news circulation across social media platforms are analyzed, with emphasis on personalization algorithms, emotional manipulation, and cognitive biases. The architecture of algorithmic disinformation detection is described, including the identification of anomalous patterns, content analysis, falsification identification, alert systems, and execution control. A structured model reflecting the cyclical and iterative nature of the process is presented. The study combines theoretical and applied approaches, integrating methods for analyzing digital content, network dynamics, and machine learning technologies. The findings may serve as a basis for the development of disinformation monitoring systems and the formation of information security strategies. The study examines disinformation as a systemic process with a defined life cycle, including creation, dissemination, entrenchment, detection, and neutralization. The findings show that its effectiveness depends on the interaction between platform algorithms and audience cognitive vulnerabilities. A multi-stage algorithmic model for disinformation detection is proposed, combining anomaly detection, content analysis, and network analysis. The results highlight the importance of integrating automated tools with expert oversight and institutional responses.

Keywords: disinformation, digital environment, life cycle, detection algorithms, fake news, cognitive biases, information campaigns, social media, machine learning, media literacy.

Горячкин Борис Сергеевич
кандидат технических наук, доцент,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
bsgor@mail.ru
Самойлов Дмитрий Евгеньевич
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
WardedShelf12345@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена изучению дезинформации в условиях цифровой медиасреды через призму её жизненного цикла. Рассматриваются этапы функционирования дезинформационного контента от стратегического замысла и производства до распространения, укоренения, выявления и нейтрализации. Выявлены ключевые механизмы циркуляции фейков в социальных сетях, включая роль алгоритмов персонализации, эмоциональной манипуляции и когнитивных искажений. Описана архитектура алгоритмического выявления дезинформации, включающая детекцию аномальных паттернов, анализ содержания, идентификацию фальсификаций, систему оповещения и этап контроля исполнения. Представлена структурированная модель, отражающая цикличность и итеративность процесса. Работа сочетает теоретический и прикладной подход, интегрируя методы анализа цифрового контента, сетевой динамики и технологий машинного обучения. Полученные результаты можно использовать для проектирования систем мониторинга дезинформации и формирования стратегий информационной безопасности.

В работе дезинформация рассмотрена как системный процесс с выраженным жизненным циклом, включающим стадии создания, распространения, укоренения, выявления и нейтрализации. Показано, что её эффективность определяется взаимодействием алгоритмов цифровых платформ и когнитивных особенностей аудитории. Разработана многоэтапная модель алгоритмического выявления дезинформации, основанная на анализе аномальных паттернов, содержания и сетевых связей. Обоснована необходимость сочетания автоматизированных методов с экспертной оценкой и институциональными мерами противодействия.

Ключевые слова: дезинформация, цифровая среда, жизненный цикл, алгоритмы выявления, фейковые новости, когнитивные искажения, информационные кампании, социальные сети, машинное обучение, медиаграмотность.

Введение

В условиях стремительной цифровизации и глобализации медиапространства проблема дезинформации достигла критического уровня. Современные коммуникационные технологии значительно упростили процессы создания и распространения информации, однако одновременно превратились в инструмент целенаправленного воздействия на общественное сознание [1]. В этих условиях дезинформация эволюционировала из побочного эффекта информационной свободы в системный механизм манипуляции, способный оказывать влияние на политические процессы, общественные настроения, уровень доверия к государственным институтам и научному знанию.

Несмотря на развитие цифровых платформ, базовые признаки дезинформации сохраняют преемственность с классическими трактовками, дополняясь алгоритмическими и когнитивными механизмами. В отличие от случайных ошибок, дезинформация носит осознанный характер и направлена на формирование выгодных для инициатора интерпретаций действительности. Она редко проявляется в форме прямой лжи, чаще опираясь на правдоподобные фрагменты информации, вырванные из контекста и усиленные эмоциональной подачей [2].

Цифровая среда радикально усилила масштаб и скорость распространения дезинформации. Социальные сети и мессенджеры обеспечивают мгновенную дистрибуцию контента без предварительной проверки, а алгоритмы персонализации формируют замкнутые информационные пространства, повышающие восприимчивость аудитории к манипулятивным сообщениям. Эмоциональная окрашенность и апелляция к когнитивным искажениям [3] снижают критическое восприятие информации и способствуют её вирусному распространению [4].

В связи с этим возникает необходимость системного анализа дезинформации как процесса с выраженным жизненным циклом, охватывающим этапы от замысла и производства до выявления и опровержения. Цель данной статьи заключается в разработке комплексной модели жизненного цикла дезинформации в цифровом пространстве с анализом ключевых механизмов её функционирования и противодействия.

Исследование современных каналов распространения дезинформации

Эффективность технологий выявления дезинформации во многом определяется особенностями цифровой среды её распространения. Современное информационное пространство характеризуется доминированием онлайн-каналов, которые обеспечивают высокую скорость и масштаб циркуляции контента при отсутствии встроенных механизмов предварительной проверки достоверности. Алгоритмы социальных платформ, ориентированные на удержание внимания, усиливают распространение эмоционально окрашенных и сенсационных сообщений, что создаёт структурные преимущества для дезинформации. Дополнительным фактором выступает формирование персонализированных информационных пространств, ограничивающих доступ к альтернативным точкам зрения и снижающих критическое восприятие информации. В таких условиях ложные сообщения могут устойчиво воспроизводиться и закрепляться в общественном сознании. Наибольшую роль в распространении дезинформации играют цифровые платформы с массовой аудиторией и низкими барьерами публикации, включая социальные сети и мессенджеры. Их архитектура и высокая пользовательская активность создают благоприятные условия для быстрого тиражирования манипулятивного контента. Таким образом, анализ цифровых каналов распространения позволяет рассматривать дезинформацию как процесс с выраженной динамикой и служит основой для моделирования её жизненного цикла. Для наглядного сопо-

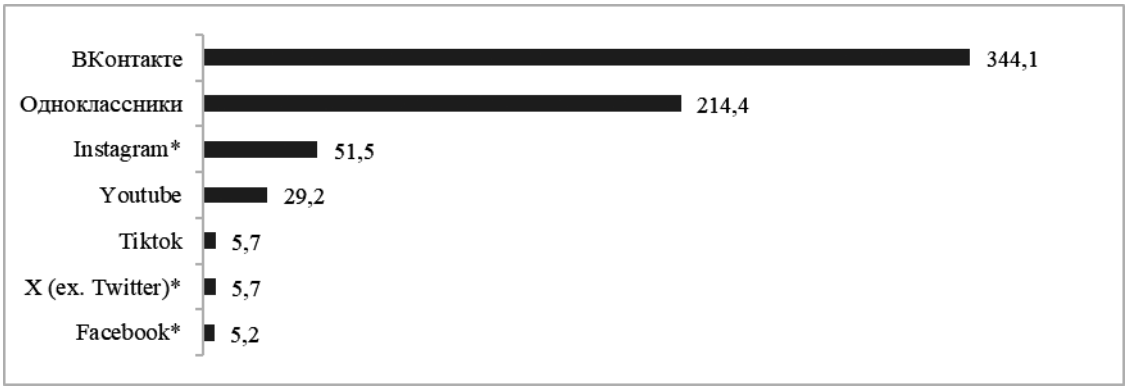


Рис. 1. Сообщений в соцсетях, млн

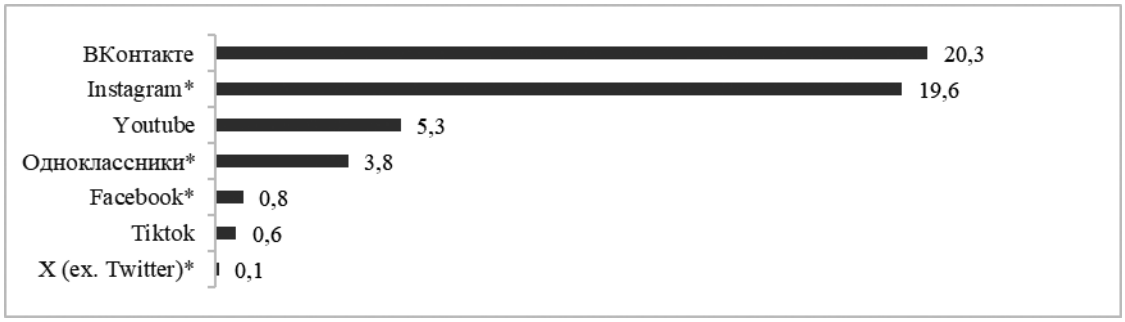


Рис. 2. Авторов соцмедиа в месяц, млн

ставления интенсивности информационных потоков в цифровой среде ниже представлено распределение объёма пользовательских сообщений и количества авторов по основным социальным платформам (рис. 1 и 2).

Данные иллюстрируют концентрацию коммуникационной активности и позволяют выявить каналы с наибольшим потенциалом для масштабного распространения информации, включая дезинформационный контент [5].

Наиболее интенсивным каналом дезинформации в последние годы стал мессенджер Telegram [5]. Его архитектура (открытые и приватные каналы, чаты с неограниченным числом участников) и политика минимальной цензуры создают благоприятные условия для запуска информационных кампаний. В Telegram фактически отсутствует центральная публичная модерация контента, анонимность каналов практически полная — что делает платформу идеальной для распространения дезинформации на широкую аудиторию. Не случайно в 2024 году порядка 33% россиян заявили, что получают новости через Telegram-каналы, то есть напрямую из неформальных источников в мессенджере [6].

Таким образом, цифровые платформы формируют коммуникационную среду, в которой дезинформация становится системным элементом информационного потока. Анализ каналов её распространения позволяет описать жизненный цикл дезинформации от первичного вброса до выявления и опровержения.

Технологии создания и распространения дезинформации

Рассматриваемые цифровые платформы не являются нейтральной средой поскольку они активно используются субъектами дезинформации, которые целенаправленно адаптируют контент под архитектуру конкретных каналов. В современных условиях дезинформация не является результатом спонтанного или случайного производства. С момента создания она подчиняется логике предполагаемого распространения: то, как будет структурирован контент, в каком формате он появится, когда и на какой платформе будет опубликован. Всё это определяется особенностями информационного поведения аудитории и архитектурой цифровой коммуникации.

Инициаторы дезинформационных кампаний рассматривают коммуникационный процесс как управляемую систему, в которой каждый этап связан с заранее просчитанными каналами, алгоритмами платформ, а также эмоциональными и поведенческими шаблонами целевой аудитории. Такой подход позволяет не просто «запустить» сообщение, но и обеспечить его циркуляцию, репликацию, закрепление и эскалацию. Поэтому для анализа жизненного цикла дезинформации крайне важно рассматривать производство и распространение как единую синхронизированную систему, в которой архитектура дистрибуции определяет характеристики самого сообщения.

Эффективность распространения дезинформации зависит от ряда устойчивых факторов, которые следует учитывать уже на стадии создания контента. Во-первых, это эмоциональная валентность: сообщения с выраженным аффективным окрасом (тревога, возмущение, сочувствие, шок) статистически вызывают более высокий уровень вовлечённости и, следовательно, превосходят по охвату нейтральные тексты. Во-вторых, алгоритмическая релевантность: разные платформы поощряют различные форматы (короткие и яркие тексты в лентах, визуально насыщенные ролики на видеохостингах, сжатые «выжимки» и цитаты в мессенджерах). Поэтому изначальная форма сообщения должна соответствовать алгоритмам ранжирования и метрикам удержания конкретной платформы.

В-третьих, пригодность к репликации: дезинформация распространяется быстрее, если её суть легко извлекается из контекста и может быть пересказана без потери основного смысла. Это требует заранее продуманных заголовков, «якорных» формулировок и самостоятельных медиафрагментов — изображений с подписями, коротких видеороликов, цитат. В-четвёртых, важна среда первичного запуска: анонимные или слабо модерируемые точки входа (закрытые каналы, паблики, тематические сообщества) позволяют безопасно инициировать волну распространения и проверить, как реагирует аудитория. Поэтому сценарий первого вброса — это часть стратегии, а не спонтанная акция.

Наконец, адресность: лексика, визуальные метафоры и герои сообщения должны соответствовать культурному коду целевой группы. В противном случае даже алгоритмы персонализации и социальные связи не обеспечат нужную плотность репостов и обсуждений.

Продолжая рассмотрение ключевых аспектов, формирующих процесс создания и распространения дезинформации, можно выделить значимость синхронизированной структуры, в которой каждый этап обладает своими задачами и характеристиками. Анализируя этот процесс через призму BPMN-диаграммы, можно более глубоко понять, как интеграция различных факторов и стадий позволяет выстроить эффективную кампанию по распространению дезинформации (рис. 3).

Процесс начинается с чёткого определения цели. Это даёт возможность инициатору выстроить стратегию в соответствии с характеристиками нужной аудитории. На этом этапе формулируется основная задача, будь то управление общественным мнением, усиление полити-

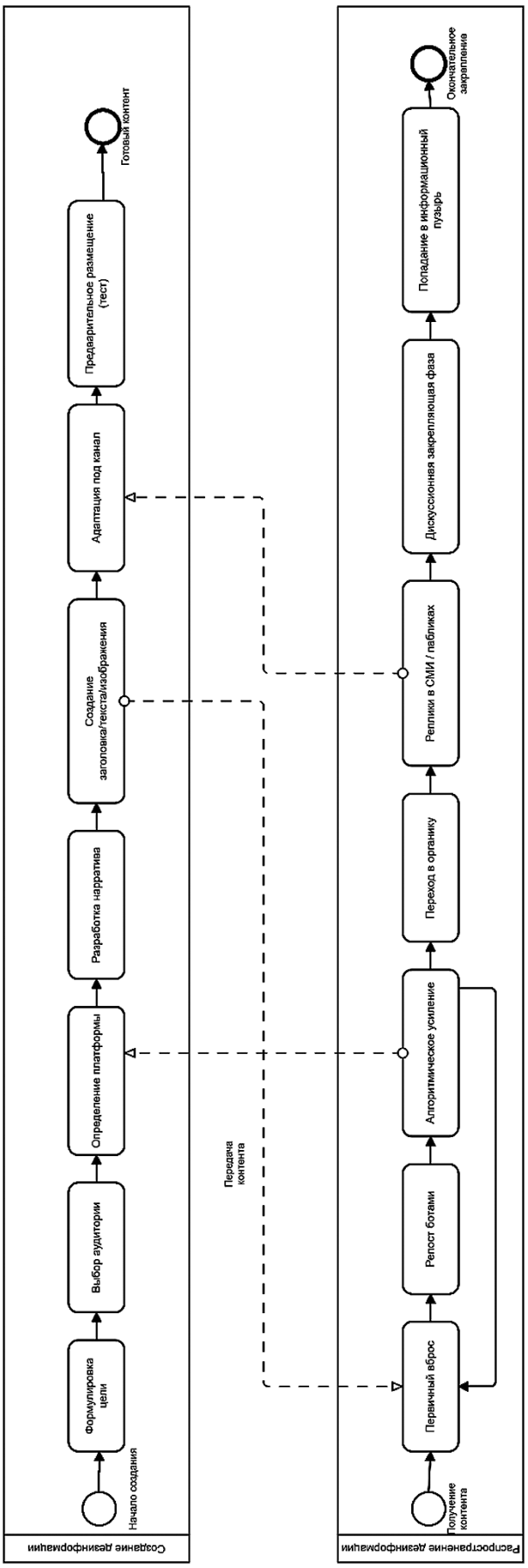


Рис. 3. BPMN диаграмма создания дезинформации

ческой нестабильности или провоцирование массового возмущения. Затем определяется целевая группа. Важно понимать, какие именно социальные слои или группы станут адресатами сообщения. Это требует предварительного анализа их поведения, интересов и модели восприятия информации.

После выбора аудитории переходит к подбору подходящей платформы. Учитываются алгоритмы и метрики вовлечённости, характерные для каждой цифровой среды. Контент адаптируется с учётом форматов, допустимой длины, визуального оформления и особенностей распространения.

На основе собранной информации создаётся основной нарратив, в котором содержится ключевое послание и эмоциональное наполнение. Цель— вызвать у аудитории сильную эмоциональную реакцию (тревогу, гнев или шок). Именно такие состояния способствуют вовлечённости и увеличивают вероятность того, что контент будет активно распространяться. Большое значение имеет формирование заголовка, текста и визуальных элементов. Заголовок должен быть выразительным, лаконичным и легко извлекаемым из контекста. Важно, чтобы такие элементы можно было быстро пересылать и воспринимать как самостоятельную информационную единицу. Это особенно актуально для мемов, коротких видео или цитат. Далее начинается адаптация материалов под формат выбранного канала. Каждый ресурс требует специфической подачи. Социальные сети лучше воспринимают короткие, эмоционально заряженные тексты, видеоплатформы — яркий визуальный контент. Перед основным запуском осуществляется пробная публикация. Это необходимо для проверки реакции аудитории. Если наблюдается положительный отклик, начинается полномасштабное распространение. Первичное размещение, как правило, происходит в закрытых или плохо модерируемых сообществах. Это создаёт безопасные условия для оценки потенциала контента. При необходимости содержание может быть доработано. После этого в распространении начинают участвовать боты и автоматические инструменты, ускоряющие охват. Затем вступают в силу алгоритмы платформ, которые, фиксируя высокий уровень взаимодействия, автоматически усиливают видимость контента в лентах и рекомендациях. После этого начинается органическое распространение. Контент подхватывают реальные пользователи, делятся им, обсуждают, что способствует росту охвата и вовлечённости. Далее он реплицируется в СМИ и популярных пабликах, закрепляется в более широком инфопространстве. Следом наступает стадия активных обсуждений. Контент становится темой публичных дебатов, тем самым усиливая своё влияние. Затем он оказывается в так называемом информационном пузыре (замкнутом медиапространстве, где многократно воспроизводится и подтверждается, создавая иллюзию объективной реальности).

Таким образом, дезинформация представляет собой тщательно спланированную кампанию, в которой каждый этап выполняет свою функцию. BPMN-диаграмма позволяет отразить этот сложный процесс, показывая, как последовательные действия и их координация влияют на успешность распространения.

Жизненный цикл дезинформации: от замысла до опровержения

Если BPMN-диаграмма отражает операционную логику создания и распространения дезинформации, то жизненный цикл позволяет рассмотреть данный процесс в более широком аналитическом контексте, от формирования замысла до этапов выявления и опровержения. Исследовательская группа по технологиям и социальным изменениям (TaSC) в Центре Шоренштейна Гарвардской школы имени Кеннеди использует подход ситуационного исследования для составления карты жизненного цикла кампаний по манипуляции СМИ. Этот методологический подход направлен на анализ порядка, масштаба и сферы охвата кампаний по манипуляции, отслеживая артефакты СМИ в пространстве и времени, объединяя множественные связи для сортировки запутанного беспорядка. В рамках этой работы был разработан обзор жизненного цикла кампании по манипуляции СМИ, который полезен для журналистов, когда они пытаются идентифицировать, отслеживать и разоблачать манипуляции СМИ и дезинформацию (рис. 4).

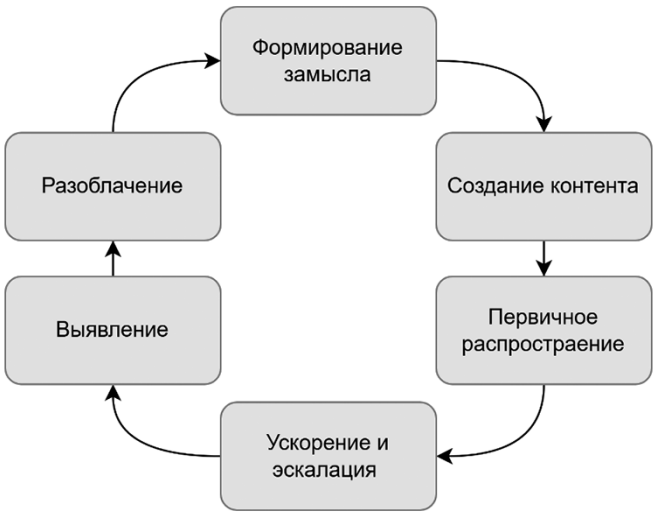


Рис. 4. Жизненный цикл дезинформации

Жизненный цикл дезинформации начинается с этапа формирования замысла, на котором осуществляется концептуализация будущего информационного воздействия. Различные акторы, включая государственные структуры, частные лица, активистские группы и коммерческие организации, формулируют цели дезинформационной кампании. Эти цели могут быть связаны с дискредитацией оппонентов, формированием чувства

страха или недоверия, а также с влиянием на массовое поведение. На данном этапе проводится анализ целевой аудитории с целью выявления её социально-культурных особенностей и когнитивных уязвимостей, которые могут быть использованы для усиления манипулятивного эффекта. Существенную роль играет работа с эмоциональными триггерами, такими как тревога, чувство несправедливости или групповая идентичность. Параллельно формируется содержательная основа дезинформации, определяются ключевые нарративы, месседжи и формы подачи, при этом особое внимание уделяется правдоподобию и эмоциональной вовлечённости. Часто используются гибридные тактики, сочетающие достоверные элементы с искажёнными или ложными интерпретациями.

На следующем этапе замысел материализуется в виде конкретного контента. Дезинформация приобретает форму текстовых публикаций, фальшивых новостей, манипулятивных визуальных материалов, мемов, поддельных документов или видеозаписей. В современных условиях всё чаще применяются технологии искусственного интеллекта и глубоких подделок, позволяющие создавать высокореалистичный контент, способный имитировать высказывания публичных фигур или визуальные доказательства. Одновременно осуществляется выбор каналов распространения, ориентированных на максимальный охват целевой аудитории. Приоритет отдается платформам с высокой вовлечённостью пользователей, включая социальные сети, мессенджеры и специализированные онлайн-ресурсы. После создания контента начинается стадия первичного распространения, направленная на запуск дезинформации в цифровом пространстве. Для этого используются как автоматизированные средства, включая ботов и сетевые аккаунты, так и реальные пользователи, вовлечённые в кампанию сознательно или неосознанно. Цель данного этапа заключается в достижении вирусного эффекта, при котором информация начинает распространяться органически за счёт пользовательских репостов, комментариев и реакций. Дополнительным инструментом становится искусственное создание видимости общественной поддержки через накрутку показателей вовлечённости, что усиливает доверие аудитории к распространяемому сообщению. По мере наращивания охвата дезинформация переходит в стадию укоренения и эскалации. Ложные или искажённые сведения начинают восприниматься как достоверные и воспроизводятся пользователями в рамках повседневного информационного обмена. Это сопровождается ростом эмоциональных реакций, усилением поляризации и формированием устойчивых интерпретаций событий. Важной особенностью данного этапа является то, что попытки опровержения нередко способствуют дальнейшему распространению дезинформации, поскольку любое упоминание усиливает её присутствие в медиапространстве. Манипуляторы могут адаптировать стратегию, дополняя первоначальный нарратив новыми деталями, псевдодоказательствами или ссылками на фиктивных экспертов, что усложняет процесс проверки и подрывает доверие к официальным источникам. Со временем дезинформация становится объектом внимания со стороны журналистов, исследователей и организаций, занимающихся проверкой фактов. Этап выявления включает систематический анализ контента, установление первоисточников и реконструкцию путей распространения. Особое значение приобретает использование технических и аналитических методов, позволяющих обнаруживать автоматизированную активность, выявлять сетевые аномалии и фиксировать признаки технологических подделок. На стадии разоблачения предпринимаются целенаправленные меры по публичному опровержению дезинформации. Это включает публикацию аналитических материалов, проведение журналистских расследований и запуск информационных кампаний, объясняющих ложность распространяемых утверждений. Эффективность данного этапа зависит от способности донести проверенную информацию в доступной форме и обеспечить сопоставимый с дезинформацией уровень охвата. Завершающим этапом жизненного цикла становится опровержение и восстановление доверия. Он направлен на минимизацию долгосрочных последствий дезинформационного воздействия и включает выпуск разъяснительных материалов, реализацию программ по повышению медиаграмотности и внедрение платформенных механизмов фильтрации контента. Эти меры способствуют формированию критического восприятия информации и снижению уязвимости аудитории к последующим манипулятивным воздействиям.

Заключительным этапом жизненного цикла дезинформации выступает её выявление и нейтрализация, в рамках которого особое значение приобретают алгоритмические методы анализа. В условиях экспоненциального роста объёмов цифрового контента, а также ограниченных ресурсов для экспертной верификации, именно автоматизированные системы на основе методов машинного обучения становятся ключевым инструментом борьбы с ложной информацией. Применение таких алгоритмов позволяет оперативно выявлять и блокировать дезинформационные сообщения ещё до их массового распространения, существенно снижая риски информационных искажений в обществе.

Современные алгоритмические системы выявления дезинформации представляют собой многоуровневые интеллектуальные комплексы, способные функционировать в условиях непрерывного и стремительно возрастающего информационного потока. В цифровом медиапространстве, где объем пользовательского контента исчисляется миллионами единиц в сутки, своевременное обнаружение и пресечение фальсифицирован-

ных сообщений невозможно без автоматизированных технологий. В данном контексте алгоритм выявления дезинформации выступает как структурированный цикл, включающий последовательность этапов от мониторинга потоков данных до оценки эффективности принятых мер, с возможностью итеративного возврата к предыдущим фазам [7] (рис. 5).

Выявление аномальных паттернов

Алгоритм запускается с мониторинга информационных потоков в цифровой среде. На этом этапе производится автоматизированный сбор данных с платформ социальных сетей, мессенджеров, новостных ресурсов и других источников. Система фиксирует статистические отклонения, которые могут сигнализировать о запуске дезинформационной кампании. К таким аномалиям относятся резкие всплески активности, синхронные публикации идентичного содержания, повторяющиеся шаблонные фразы, характерные для автоматизированных ботов, а также координированные действия подозрительных групп. Детектирование подобных паттернов осуществляется с применением методов кластеризации, графового анализа и временной сегментации, позволяющих выявить отклонения от фона в масштабе всей платформы.

Анализ содержания

После изоляции подозрительных фрагментов информации система переходит к этапу углублённого анализа содержания сообщений. Этот процесс включает в себя оценку лингвистических и стилистических характеристик, идентификацию эмоциональной окраски, выявление признаков манипуляции и отклонений от журналистских стандартов. Применяются технологии обработки естественного языка (NLP), позволяющие проводить семантический, синтаксический и прагматический анализ текста. Особое внимание уделяется структуре изложения, фактурности информации, использованию риторических приёмов и степени односторонности подачи. Сопоставление с базами проверенных источников и фактологических данных обеспечивает контекстуальную верификацию утверждений.

Идентификация фальсификаций

На основании результатов анализа содержания производится третий этап — идентификация фальсификаций. Это критическая фаза, в рамках которой система классифицирует сообщения на достоверные, спорные или однозначно ложные. Процесс осуществляется с помощью обученных моделей машинного обучения, в том числе нейросетевых архитектур, способных выявлять шаблоны, типичные для дезинформации. Примеры таких моделей — FakeDetector и аналогичные ему инструменты, оценивающие сообщения по множеству признаков: тема, лексика, автор, источник, характер распространения. Каждому информационному фрагменту присваивается достоверный балл. Установлено, что фейковые материалы часто содержат повторяющиеся топики, используются специфические лексемы, а источники имеют низкую медиарепутацию. На основе этих признаков и формируется решение о наличии дезинформации.

Система оповещения

После подтверждения ложного характера контента алгоритм инициирует механизмы оповещения. Информация о выявленной дезинформации автоматически направляется в модераторские службы соответствующей платформы. Параллельно запускаются инструменты визуального оповещения пользователей: сообщения помечаются как потенциально недостоверные, снабжаются предупреждающими баннерами или метками. При необходимости информация передаётся в верификационные организации или публикуются публичные уведомления о текущей волне дезинформации. Цель данного этапа — оперативное реагирование, информирование заинтересованных сторон и минимизация вирусного распространения ложного контента.

Проверка выполнения и итеративная корректировка

Финальной фазой цикла выступает проверка выполнения предпринятых мер. Система отслеживает, были ли реализованы действия, рекомендованные на предыдущем этапе: удаление контента, блокировка источника, установка меток. Анализируются поведенческие метрики пользователей (просмотры, репосты, вовлеченность), чтобы оценить эффективность вмешательства. В случае отсутствия необходимой реакции или сохранения высокой активности фальсифицированного контента, алгоритм может повторно инициировать цикл анализа, скорректировав критерии фильтрации и классификации. Таким образом, реализуется итеративность процесса, обеспечивающая адаптацию системы к меняющимся стратегиям распространения дезинформации.

Именно многоаспектность подхода — использование комбинации признаков, а не опора на единичный критерий — обеспечивает высокую точность детекции дезинформации. Практика показывает, что наилучшие результаты достигаются при интеграции алгоритмического анализа с экспертной проверкой: такое человеко-машинное взаимодействие позволяет значительно повысить достоверность результатов, минимизируя как ложноположительные, так и ложноотрицательные срабатывания [8].

Следует подчеркнуть, что процесс выявления дезинформации носит не линейный, а циклический характер.

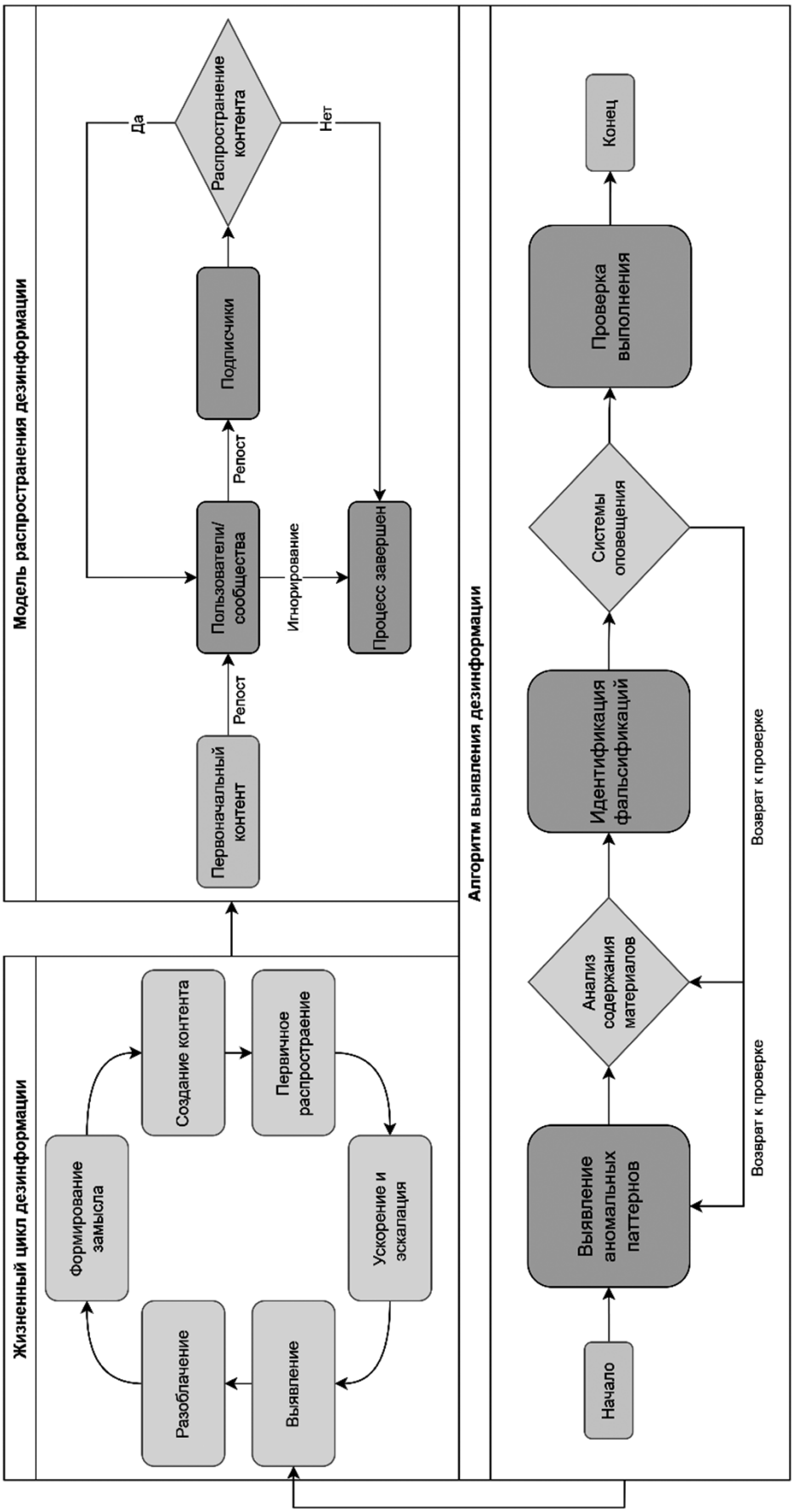


Рис. 5. Комплексная модель жизненного цикла дезинформации

Возврат к предыдущим этапам осуществляется при необходимости переоценки выявленных паттернов, уточнения классификации или доработки мер реагирования. Такая архитектура обеспечивает гибкость алгоритма и его устойчивость к быстро эволюционирующим формам дезинформации, а также к адаптации злоумышленников к противодействующим механизмам.

Заключение

Статья посвящена системному анализу дезинформации как повторяющегося процесса с чётко выраженным жизненным циклом, включающим стадии замысла, создания, распространения, укоренения, выявления и нейтрализации. Исследование охватывает как поведенческие, так и технические аспекты функционирования фейков в цифровой среде. Особое внимание уделяется роли алгоритмов социальных платформ, эффектам информационных пузырей и когнитивным искажениям, усиливающим восприимчивость аудитории к манипулятивному контенту.

В работе представлена многоступенчатая модель алгоритмического выявления дезинформации, включающая обнаружение аномальных паттернов, анализ содержания, идентификацию фальсификаций, систему оповещений и контроль эффективности. Используются технологии машинного обучения, обработки естественного языка и графового анализа для классификации информации в реальном времени.

Подчёркивается, что эффективное противодействие дезинформации требует сочетания автоматизированных решений с институциональными мерами и развитием медиаграмотности. Предложенная модель может быть использована при разработке систем мониторинга в социальных медиа и формировании стратегий информационной безопасности. Результаты исследования вносят вклад в теоретическое осмысление цифровых угроз и прикладные практики их нейтрализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коновалов В.Н. Политология: словарь. М.: РГУ, 2010.
2. Самошкин Е.А. Институты борьбы с дезинформацией и мисинформацией в СМИ // Вестник Московского университета. Серия 10: Журналистика. 2017. № 6.
3. Ермолаева Ю.В. Типология когнитивных искажений и их влияние на проэкологическое поведение // Вестник Томского государственного университета. Философия. Социология. Политология. 2024. № 82. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tipologiya-kognitivnyh-iskazheniy-i-ih-vliyanie-na-proekologicheskoe-povedenie (дата обращения: 16.12.2025).
4. Sathianathan S., Mhd Ali A., Chong W.W. How the General Public Navigates Health Misinformation on Social Media: Qualitative Study of Identification and Response Approaches // JMIR Infodemiology. 2025. Vol. 5. e67464. DOI: 10.2196/67464.
5. Brand Analytics. Социальные сети в России: цифры и тренды. Весна 2025.
6. DataReportal. Digital 2024: Global News Report. URL: https://datareportal.com/reports/digital-2024-global-news-report (дата обращения: 16.12.2025).
7. Ayyasamy R.K., Ponnusamy C., Bhargavi K.N., et al. A hybrid deep learning framework for fake news detection using LSTM-CGPNN and metaheuristic optimization // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Article 41522. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-025-25311-x.
8. Boko A. Disinformation Detection: Developing a Categorical Framework Through Thematic Analysis // Journal Media. 2024. Vol. 5. P. 1914–1924. DOI: https://doi.org/10.3390/journalmedia5040116.
9. Del Vicario M., Bessi A., Zollo F., Petroni F., Scala A., Caldarelli G., Stanley H.E., Quattrociocchi W. The spreading of misinformation online // Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. 2016. Vol. 113. No. 3. P. 554–559.
10. Garimella K., De Francisci Morales G., Gionis A., Mathioudakis M. Political discourse on social media // In: Proceedings of the 2018 World Wide Web Conference (WWW '18). New York: ACM Press, 2018. Vol. 2. P. 913–922.
11. Robertson A. Was Reddit always about free speech? Yes, and no // The Verge. June 15, 2015. URL: https://www.theverge.com (дата обращения: 16.12.2025).

© Горячкин Борис Сергеевич (bsgor@mail.ru); Самойлов Дмитрий Евгеньевич (WardedShelf12345@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.10

РАСПОЗНАВАНИЕ ЭМОЦИЙ ПО ПАРАМЕТРАМ МИМИКИ В ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

EMOTION RECOGNITION FROM FACIAL EXPRESSION PARAMETERS IN VIRTUAL REALITY

A. Dolgikh
E. Radostev

Summary. This paper presents a method for automatic recognition of a user's emotional state from facial-expression parameters (blendshape coefficients) captured by the built-in sensors of a VR headset. Emotions are represented in two ways: as one of seven basic categories and as a point in the continuous three-dimensional Valence–Arousal–Dominance (VAD) space. The proposed approach evaluates both linear models (multivariate regression and SVM) followed by mapping to the nearest emotion in the VAD space, and direct classifiers (logistic regression and a neural network) trained on discrete emotion classes. Experimental data were collected in VR and include 52 facial-expression features. Logistic regression achieved an accuracy of approximately 60 %, while the neural network reached 56 % (both demonstrating a high correlation between the predicted and ground-truth VAD coordinates), whereas linear methods yielded only 30–45 %. An ensemble classifier did not improve accuracy. In addition, we developed a neural network that generates a corresponding facial blendshape configuration for virtual avatar control given target (V, A, D) coordinates. The results are consistent with current trends (state-of-the-art systems for partially occluded faces typically report around 70 % accuracy) and support the practical feasibility of emotion recognition in VR. Typical challenges (notably confusions between closely related emotions) are discussed, and directions for integrating VR-based emotion recognition into virtual agent systems are outlined.

Keywords: emotion recognition, virtual reality, virtual environment, virtual avatars, machine learning, facial expressions.

Долгих Анатолий Андреевич
Аспирант, Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ», г. Москва
tolick.dolgih2013@yandex.ru
Радостев Эдуард Андреевич
Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ», г. Москва
radosteveduard@gmail.com

Аннотация. В статье представлен метод автоматического распознавания эмоционального состояния пользователя по параметрам мимики лица (коэффициентам blendshape), считываемым встроенными датчиками VR-шлема. Эмоция описывается двумя способами: как одна из семи базовых категорий и как точка в непрерывном трёхмерном пространстве Валентность–Возбужденность–Доминантность (Valence–Arousal–Dominance, VAD). Для распознавания применены как линейные алгоритмы (многомерная регрессия, SVM) с последующим определением ближайшей эмоции в пространстве VAD, так и прямые классификаторы (логистическая регрессия, нейронная сеть) на классы эмоций. Экспериментальные данные собраны в VR и включают 52 показателя мимики лица. Логистическая регрессия достигла точности около 60 %, нейросеть 56 % (обе показали высокую корреляцию прогнозируемых координат VAD с истинными), тогда как линейные методы дали лишь 30–45 %. Ансамблевый классификатор не повысил точность. Также разработана нейросеть, которая по заданным координатам (V, A, D) генерирует соответствующую конфигурацию facial blendshape для управления виртуальным аватаром. Результаты соответствуют современным тенденциям (в современных системах для частично скрытого лица точность порядка 70 %) и подтверждают принципиальную реализуемость распознавания эмоций в VR. Отмечены типичные сложности (перекрёстные ошибки между близкими эмоциями) и обозначены перспективы интеграции VR-распознавания эмоций в системы виртуальных агентов.

Ключевые слова: распознавание эмоций, виртуальная реальность, виртуальное окружение, виртуальные аватары, машинное обучение, мимика.

Введение

Виртуальная реальность (VR) широко применяется в исследованиях эмоций, поскольку позволяет моделировать реалистичные ситуации и получать выраженный эмоциональный отклик. В частности, показано, что VR может выступать эффективным инструментом эмоциональной индукции и обеспечивать более сильное эмоциональное возбуждение по сравнению с менее иммерсивными визуальными форматами [9]. Как иммерсивная технология взаимодействия, VR в прикладных (в том числе развлекательных) сценариях нацелена на создание интенсивного пользовательского опыта и «эффекта присутствия», что связывают с необходимостью глубокого погружения в виртуальную среду [2]. Одновременно VR-платформы требуют надёжного автоматического распознавания эмоционального состояния пользователя по данным, собираемым в процессе взаимодействия, причём современная литература подчёркивает важность сочетания иммерсивных сценариев с неинвазивными измерениями и контролем стимулов [8]. Автоматическое определение эмоций по таким сигналам важно для реалистичных социальных взаимодействий в VR, где требуется правдоподобная передача выражений эмоций у виртуальных представлений пользователей [2].

Распознавание эмоций по выражению лица является ключевым компонентом систем человеко-компьютерного взаимодействия. Однако в условиях VR эта задача осложнена: шлем виртуальной реальности закрывает значительную часть лица пользователя, затрудняя регистрацию мимики стандартными методами компьютерного зрения [5]. Для социального VR это критично, поэтому используются способы повысить выразительность и точность передачи эмоций через аватар, включая решения с трекингом лица и взгляда [5][6]. Один из подходов опирается на встроенные в гарнитуру камеры слежения за глазами: анализ изображений области глаз позволяет классифицировать часть выражений без внешней камеры [5]. Альтернативный подход — использование дополнительных сенсоров, регистрирующих физиологические реакции, и применение этих данных для распознавания эмоций в VR [8]. Появление подобных технологий открывает возможность интеграции модуля распознавания эмоций непосредственно в VR.

Для представления эмоций в статье используется трёхмерная модель «валентность–возбужденность–доминантность» (Valence–Arousal–Dominance, VAD). Для сопоставления дискретных классов и непрерывных координат были использованы фиксированные численные значения VAD для шести базовых эмоций и нейтрального состояния.

Таким образом, цель настоящего исследования — разработать и экспериментально оценить подход к распознаванию эмоций пользователя в VR-среде по параметрам мимики лица, а также изучить возможности применения такого решения в системах виртуальной реальности.

Литературный обзор

Влияние VR-технологий на эмоциональные состояния активно изучается в последнее десятилетие. Показано, что виртуальная среда способна усиливать эмоциональные реакции пользователя по сравнению с неиммерсивными методами предъявления стимулов [7, 9]. Благодаря эффекту присутствия применение VR в исследованиях и прикладных задачах позволяет вызывать более сильные эмоции и тем самым усиливать эмоциональное воздействие [8]. Вместе с тем эмоционально-насыщенные VR-сценарии требуют надёжного мониторинга состояния пользователя. Возникает необходимость автоматического распознавания эмоций по данным, собираемым в VR (мимике лица, поведению, физиологическим показателям и т.д.), что критично для реализации реалистичных социальных взаимодействий в виртуальной среде. При этом в современных работах всё чаще используется не только дискретное распознавание «названий» эмоций, но и их представление в непрерывном двух- или трёхмерном пространстве, поскольку оно лучше подходит для описания сложных и смешанных аффективных состояний. В частности, модель valence–arousal–dominance (VAD) рассматривается как удобный 3D-каркас для представления эмоций и последующего распознавания по измеряемым сигналам [10].

Классические системы распознавания эмоций по выражению лица активно развиваются и в современных работах, как правило, опираются на методы глубокого обучения [5, 7]. Однако в VR значительная часть лица скрыта гарнитурой (HMD), что затрудняет анализ мимики стандартными методами компьютерного зрения [5, 7]. Для компенсации этого предложено несколько подходов. Один из них — анализ доступной области лица изнутри шлема. Например, инфракрасная камера (камера трекинга взгляда), встроенная в VR-гарнитуру, способна фиксировать движения вокруг глаз, достаточные для распознавания по крайней мере пяти выражений лица со средней точностью около 74 %, не ниже человеческой (в эксперименте — выше оценок наблюдателей) [5]. Другой подход — оснащение шлемов специальными модулями отслеживания мимики. Современные устройства (Meta Quest Pro и др.) имеют встроенные сенсоры/внутренние камеры, позволяющие получать параметры выражений лица и оперативно переносить их на модель аватара [11]. Недавнее исследование на шлеме Quest Pro с использованием облегчённой нейросети (MobileNet V2) показало высокую точность распознавания некоторых эмоций (например, радость, грусть, удивление), тогда как «гнев» и «страх» часто путались с нейтральным состоянием — эти ошибки авторы связывают с ограничениями текущих моделей и технологии распознавания [11]. Другая работа представила специализированный датасет изображений лиц в VR (с частично скрытым лицом) и обучила свёрточный классификатор EfficientNet, который достиг около 70 % точности по семи классам эмоций [7]. Это заметно ниже показателей для открытого лица, но подтверждает принципиальную реализуемость классификации выражений в VR при некотором снижении качества. В целом в условиях естественного перекрытия лица гарнитурой (шлемом) в экспериментальных работах демонстрируется порядка 70 % точности по семи классам эмоций, что уступает классическим условиям, но свидетельствует о преодолении ключевых технических барьеров [7].

Ещё одно перспективное направление — одновременное использование нескольких источников данных. Так, в работе Bastida и соавт. (2024) одновременно анализировались мимические и физиологические сигналы пользователя в VR; для объединения результатов классификаторов применена схема позднего объединения (late fusion) с учётом того, что распознавание по лицу затрудняется VR-оборудованием [3]. В другом исследовании эмоции пользователей вызывались VR-сценариями и распознавались по физиологическим сигналам: достиг-

нуто порядка 70 % точности для 4-классовой классификации эмоций и до 80–85 % при бинарной классификации высокой/низкой валентности или активации [8]. Эти результаты подтверждают, что VR-технологии, несмотря на создаваемые неудобства с гарнитурой, предоставляют новые возможности — они легко сочетаются с носимыми сенсорами, позволяя собирать богатый материал для анализа эмоций [3][8]. Современные исследования показывают, что объединение нескольких источников сигналов может повышать надёжность распознавания эмоций по сравнению с опорой на одну модальность [3].

Одно из ключевых направлений практического применения распознавания эмоций — создание эмоциональных виртуальных собеседников и помощников. В научных исследованиях описаны прототипы голосовых ассистентов, которые с помощью нейросетевых моделей определяют эмоциональную окраску речи пользователя и адаптируют стиль ответа для более эмпатичного диалога [12]. Другая важная сфера — виртуальные персонажи и аватары в VR/AR-системах и играх. Распознавание эмоций пользователя может использоваться для адаптации VR-контента/параметров среды под текущее эмоциональное состояние, повышая персонализацию опыта [6]. Текущие VR-технологии (в частности, facial blendshape) уже позволяют транслировать мимику пользователя на модель лица аватара. Если же требуется определять именно название эмоции, а не сырые параметры выражения, связка из модуля распознавания и последующей генерации соответствующей анимации лица оказывается востребованной. Концептуально близкая идея обсуждается в работе Зиннатова и Кугураковой (2020): авторы рассматривают объединение управляемой лицевой анимации с модулями учета эмоционального состояния и микромимики. В их реализации по аудиопотоку (в т.ч. записанной или синтезированной речи) автоматически строится анимация 3D-персонажа, а учет эмоций предлагается расширять за счёт дополнительного анализа текста/аудио и других источников, что ориентировано на сценарии, где текст и речь заранее неизвестны [1]. Интеграция модулей распознавания и генерации эмоций в целом повышает реалистичность и выразительность виртуальных агентов, приближая их к человеческим стандартам общения.

Материалы и методы

Датасет и разметка

Для обучения и оценки моделей был собран собственный набор данных эмоциональных состояний пользователей в виртуальной реальности. В эксперименте участвовали 15 добровольцев (совершеннолетние мужчины и женщины), каждый взаимодействовал с несколькими VR-сценариями, вызывающими разные эмоции.

В качестве визуальных стимулов использовались изображения из набора Karolinska Directed Emotional Faces (KDEF), представляющего стандартизированные выражения для базовых эмоций. Для эксперимента был сформирован поднабор из 56 изображений: по 4 мужских и 4 женских лиц для каждой из семи эмоций (включая нейтральное выражение). Такой отбор обеспечивает баланс по полу и по классам эмоций при предъявлении стимулов.

Сбор данных проводился в VR-сцене, включающей (1) режим демонстрации слайдов со стимулами и (2) режим «зеркала» для самоконтроля выражения. На первом этапе испытуемому предъявлялись изображения лицевых выражений из KDEF, и предлагалось воспроизвести выражение; при этом выполнялась запись эпизода и автоматически фиксировалась метка эмоции, соответствующая предъявленному стимулу. На втором этапе визуальный стимул отсутствовал: испытуемому называлась эмоция, которую он воспроизводил, ориентируясь на отражение своего аватара, а запись выполнялась тем же способом. Для предъявления использовался набор из 56 изображений-стимулов из KDEF.

Испытуемый, видя стимул, переживал или изображал соответствующую эмоцию в VR. Пользователь носил шлем HTC Vive Pro Eye с модулем Vive Facial Tracker (инфракрасная камера для регистрации мимики нижней части лица). Аппаратно в реальном времени регистрировались:

- Параметры мимики лица. Трекинг-модуль фиксировал мимику ключевых областей лица пользователя, представляя её в виде набора из 52 коэффициентов facial blendshape. Каждый коэффициент отражает степень выраженности определённого элементарного движения лица (поднятие брови, улыбка, прищуривание и т.д.).
- Прочие сигналы. Дополнительно собирались данные движения глаз (направление взгляда, частота моргания).

Сырые данные мимики сохранялись в формате CSV. Таблица содержала временные метки, после чего следовали значения 52 blendshape. Такой формат упрощает синхронизацию с внешними сигналами и последующую обработку.

В ходе сбора данных использовался режим фиксации, при котором запись начинается по нажатию управляющей кнопки и завершается вторым нажатием; итоговые значения признаков рассчитываются усреднением по всем кадрам, накопленным за время эпизода. Такой подход снижает влияние моментных артефактов трекинга и позволяет представлять каждое наблюдение единым вектором из 52 коэффициентов (параметры нижней и верхней частей лица), соответствующим устойчиво

удерживаемому выражению. Помимо данного режима, предусмотрены режим «снимка» и режим усреднения по фиксированному числу кадров, однако в настоящей работе при сборе датасета применялся именно режим записи «по двум нажатиям» с усреднением по всем кадрам эпизода.

Каждый записанный эпизод снабжался категориальной меткой одной из семи эмоций (гнев, радость, удивление, отвращение, испуг, грусть, нейтральность). Метка определялась процедурой предъявления: на этапе со слайдами-стимулами она задавалась подписью к стимулу, а на этапе без визуального стимула — называлась экспериментатором и воспроизводилась испытуемым. Таким образом, для каждого эпизода известен класс эмоции, использованный далее, как целевая переменная для прямых классификаторов. Для моделей, работающих в непрерывном пространстве VAD, категориальная метка дополнительно преобразовывалась в координаты (V,A,D) по табличному соответствию базовых эмоций (таблица 1), после чего решалась задача регрессии по каждому измерению VAD с последующей проекцией предсказанной точки на ближайший эмоциональный класс. Нейтральное состояние в работе задавалось как (0,0,0) (центр шкалы).

Таблица 1.

Значения 6-основных эмоций в терминах VAD [4]

	Валентность	Возбуждённость	Доминантность
Гнев	–0,43	0,67	0,34
Радость	0,76	0,48	0,35
Удивление	0,4	0,67	–0,13
Отвращение	–0,6	0,35	0,11
Испуг	–0,64	0,6	–0,43
Грусть	–0,63	0,27	–0,33

В рамках первичного сбора данных было получено 497 записей от 15 участников; все записи собирались в единый CSV и использовались для обучения сравниваемых моделей. Данные случайным образом разделялись на обучающую и валидационную выборки.

Модели распознавания

Для автоматической классификации эмоций по данным мимики были реализованы несколько алгоритмов машинного обучения. Линейные модели — многомерная линейная регрессия и метод опорных векторов (SVM) — обучались предсказывать непрерывные координаты эмоционального состояния в пространстве VAD; затем полученная точка (V, A, D) проецировалась на ближайший класс эмоций (выбиралась минимальная дистанция до эталонных координат 7 базовых эмоций). Помимо этого, использовались прямые методы классификации на 7 категорий: логистическая регрессия и полносвязная нейронная сеть. Архитектура нейросети включала три скрытых слоя по 64 нейрона (с функцией Leaky ReLU) и выходной слой из 7 нейронов с softmax-активацией. Обучение проводилось на собранном наборе данных, используя категориальные метки эмоций.

Проверялась также эффективность ансамблей моделей. Были реализованы группы из трёх логистических регрессий и из трёх нейронных сетей; решением ансамбля считался эмоциональный класс, предсказанный большинством моделей.

Отдельно была обучена и обратная модель на нейросетевой основе, выполняющая задачу генерации выражения лица по заданным эмоциональным координатам. Эта модель принимала на вход желаемое значение валентности, активации и доминантности (V, A, D) и выдавала 52 коэффициента facial blendshape, которые можно применить к аватару. Таким образом, реализована возможность синтезировать мимику виртуального персонажа под заданную эмоцию.

Метрики оценки

Качество моделей оценивалось по доле правильных классификаций (accuracy) на отложенной выборке. Дополнительно для подходов, использующих пространство VAD, вычислялись корреляции между предсказанными и эталонными значениями валентности, активации и доминантности. Для классификаторов значения VAD восстанавливались через сопоставление каждому классу его координат (V, A, D) по таблице 1. Аналогично формировались «эталонные» значения VAD из истинных категориальных меток. При запуске обучающих скриптов все эпизоды случайным образом разделялись на обучающую и валидационную выборки; в отдельных экспериментах при необходимости дополнительно формировалась тестовая выборка, однако основная оценка качества в работе приводится по валидационному набору.

Поскольку датасет содержит множественные эпизоды от каждого участника, случайное разбиение по эпизодам потенциально допускает попадание записей одного и того же человека в обе выборки, что может завышать оценку обобщающей способности на новых пользователей. В дальнейшем планируется оценка по протоколу разбиения по участникам, чтобы измерять переносимость модели на ранее не встречавшихся людей.

Результаты

В таблице 2 продемонстрированы результаты работы модели линейной регрессии и метода опорных век-

торов, с использованием евклидова и манхэттенского расстояний. Также в таблице указана общая точность данных моделей.

Несмотря на то, что обе модели линейные, метод опорных векторов показывает заметно лучший результат на обеих метриках расстояния. Тем не менее, результат можно трактовать как предсказание нейтральности и отвращения, а иногда радости и удивления. Злость, грусть и страх предсказывается во всех четырех вариантах достаточно плохо.

Таблица 2.

Результаты работы линейных моделей

Модель	Линейная регрессия		Метод опорных векторов	
Расстояние	Эвклид	Манхэттен	Эвклид	Манхэттен
Удивление	22 %	36.5 %	51.1 %	51.1 %
Радость	51 %	51 %	58.4 %	58.4 %
Грусть	14.6 %	14.6 %	29.2 %	21.9 %
Страх	0	0	29.2 %	29.2 %
Злость	0	0	0	0
Отвращение	43.8 %	43.8 %	58.4 %	73 %
Нейтральность	73 %	73 %	80.3 %	80.3 %
Общая точность	29.2 %	31.25 %	43.75 %	44.8 %

Модель логистической регрессии продемонстрировала общую точность порядка 60 %. В таблице 3 приведены коэффициенты корреляции между предсказанными и эталонными значениями VAD, вычисленными на основе выходных эмоциональных оценок модели. Анализируя результат работы логистической модели, можно увидеть заметную корреляцию получаемых значений VAD, а также достаточно высокую общую точность, в сравнении с линейными моделями. Матрица ошибок для логистической регрессии приведена на рисунке 1-а.

Таблица 3.

Корреляция значений VAD предсказанных и истинных эмоций для логистической модели

Общая точность: 60 %		Предсказанные значения		
		Valence	Arousal	Dominance
Истинные значения	Valence	0.63814	–	–
	Arousal	–	0.67871	–
	Dominance	–	–	0.674081

Далее, в таблице 4 приведены коэффициенты корреляции для значений Valence, Arousal и Dominance, восстановленных на основе эмоций, предсказанных нейросетевой моделью.

Таблица 4.

Корреляция значений VAD предсказанных и истинных эмоций для нейросетевой модели

Общая точность: 56.25 %		Предсказанные значения		
		Valence	Arousal	Dominance
Истинные значения	Valence	0.516776	–	–
	Arousal	–	0.43347	–
	Dominance	–	–	0.671306

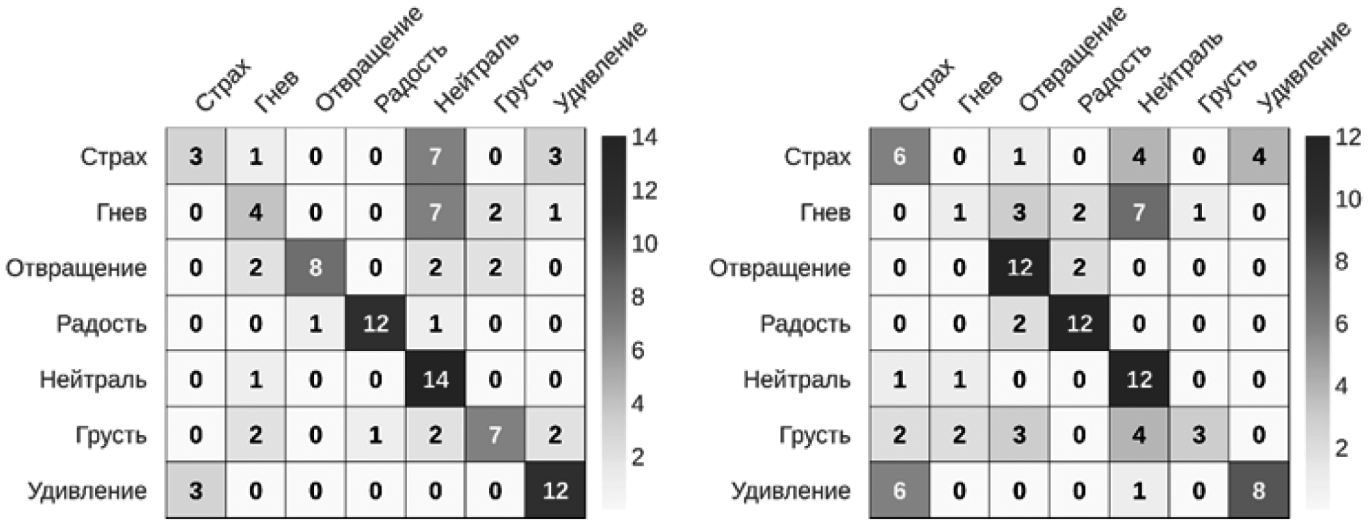
Приведенные в таблице 4 значения работы нейросетевой модели демонстрируют заметную корреляцию получаемых значений валентности–возбужденности–доминантности (VAD), а также достаточную высокую общую точность определения эмоций в сравнении с линейными моделями (таблица 2). Матрица ошибок для данного подхода приведена на рисунке 1-б.

Результаты работы ансамбля из 3 моделей логистической регрессии на валидационном наборе данных оказались несколько хуже обычной логистической регрессии. Общая точность при использовании ансамбля составила 47 %. Матрица ошибок приведена ниже на рисунке 2-а.

На рисунке 1-б приведена матрица ошибок, полученная в результате работы ансамбля из 3 нейросетевых моделей на валидационном наборе данных. Общая точность при использовании данного метода составила 54 %, при том, что точность каждой из входящих моделей на несколько процентов выше.

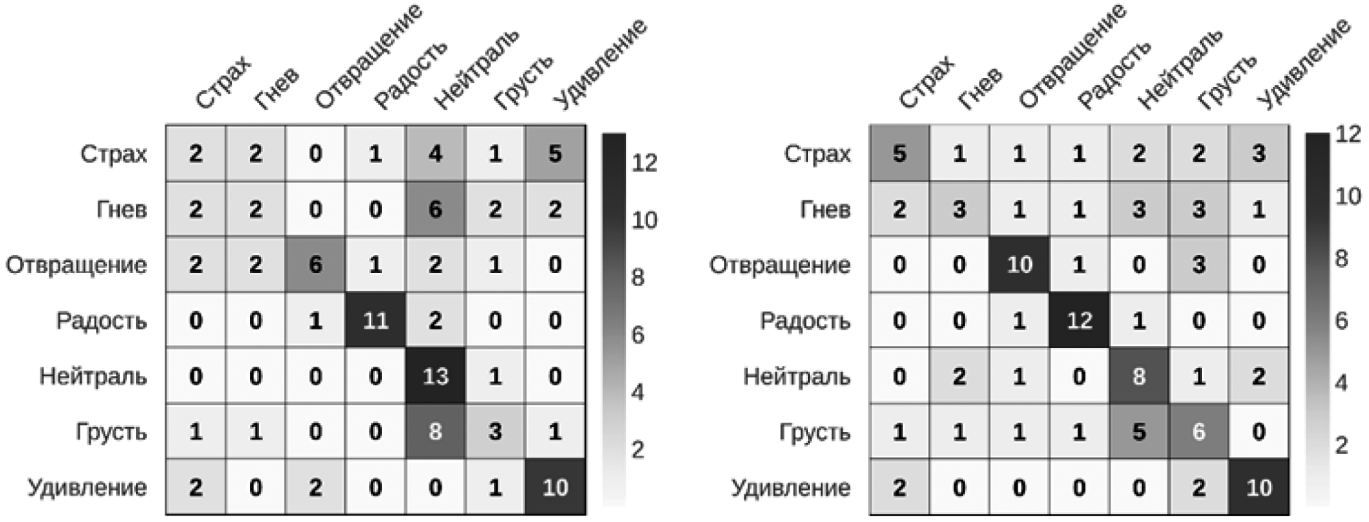
По приведенным выше матрицам ошибок можно проследить, что одни эмоции распознаются значительно лучше, чем другие. Можно заметить, что модели часто путают испуг и удивление. Также обращает на себя внимание то факт, что столбец с нейтральной эмоцией ярче остальных для всех матриц ошибок. Доминирование нейтрального класса в матрицах ошибок согласуется с наблюдением о слабой экспрессии части испытуемых: при недостаточно выраженной мимике модели склонны «усреднять» предсказание и относить эпизод к нейтральному состоянию. Это также указывает на необходимость расширения выборки и усиления вариативности выражений, поскольку текущий объём данных может быть недостаточен для устойчивого обучения, особенно в постановке «классификация эмоций», тогда как для задач в терминах VAD более естественной является регрессионная постановка.

Применение ансамблевых моделей не принесло значительного прироста качества. Ансамбль из трёх логистических регрессий показал 47 % точности (хуже, чем одна модель), а ансамбль трёх нейросетей — 54 % (на уровне одиночной сети). Причиной этого стало, вероятно, сильное пересечение ошибок между моделя-



а б

Рис. 1. Матрицы ошибок (Confusion Matrix)
а) матрица ошибок для логистической регрессии; б) матрица ошибок нейросетевой модели



а б

Рис. 2. Матрицы ошибок (Confusion Matrix) для ансамблевых моделей
а) матрица ошибок ансамбля моделей логистической регрессии; б) матрица ошибок ансамбля нейросетевых моделей

ми: одинаковые по архитектуре классификаторы, обученные на одном и том же наборе, склонны ошибаться на одних и тех же примерах, поэтому усреднение не помогает. Кроме того, правило большинства могло приводить к проигрышу в ситуациях, когда одна из моделей была права, а две — одинаково ошибались. Таким образом, одиночная логистическая регрессия оказалась не только самой простой, но и одной из самых результативных моделей на наших данных. Её преимущество может объясняться меньшей склонностью к переобучению по сравнению с более сложной нейронной сетью при ограниченном размере выборки.

Обсуждение

Полученные результаты отражают как общие тенденции автоматического анализа эмоций, так и специфические нюансы VR-контекста. Во-первых, как и в традиционных системах распознавания по лицу, одни эмоции распознаются значительно легче, чем другие. Нейтральное выражение определяется моделью с наибольшей надёжностью, тогда как некоторые эмоциональные состояния (особенно «гнев» и «страх») оказываются трудными для автоматического различения. Проведенные эксперименты демонстрируют аналогичные сложности: негативные эмоции классифицировались существенно хуже, чем позитивные, и часто путались между собой или с нейтральным состоянием. Подобные проблемы отмечаются и в других исследованиях: например, даже продвинутые нейросетевые классификаторы иногда испытывают сложности с разграничением схожих эмоций. Причины ошибок в нашем случае связаны как с неполнотой входных данных (VR-шлем скрывает часть лица, ли-

шая алгоритм важных признаков), так и с ограниченным объёмом обучающей выборки. Для преодоления этих ограничений необходим либо учёт дополнительных модальностей (речь, физиология и др.), либо использование более сложных архитектур, способных улавливать тонкие различия выражений.

Если сопоставить достигнутую точность с результатами других разработок, можно сказать, что она лежит в том же порядке величины: порядка 60–70 % для распознавания эмоций по лицу в VR. Например, алгоритм Eyemotion на основе трекинга глаз достигал 74 % (для ограниченного набора выражений), а свёрточная модель на частично скрытых лицах — около 70 % на 7 эмоциях. Это свидетельствует о том, что качество автоматического определения 6–7 эмоций в VR в настоящее время находится на среднем уровне и существенно уступает традиционному анализу лица без помех. Тем не менее наши эксперименты подтверждают принципиальную осуществимость распознавания эмоций даже при наличии гарнитуры, а предложенный подход отличается низкой вычислительной сложностью и непосредственной работой с сигналами VR-шлема. Последнее особенно важно для внедрения в интерактивные приложения: логистическая модель выполняется за доли миллисекунды на CPU, что позволяет запускать её в реальном времени даже на мобильных VR-устройствах.

Заключение

В работе разработан и экспериментально оценён подход к автоматическому распознаванию эмоционального состояния пользователя в виртуальной реальности по данным трекинга мимики (52 коэффициента facial blendshape), регистрируемым VR-гарнитурой. Рассмотрены два представления эмоций: дискретная классификация по 7 базовым классам и непрерывное описание в пространстве Valence–Arousal–Dominance (VAD), используемое как для анализа результатов, так и для последующего управления выражением лица аватара.

Сравнение моделей показало, что наилучшее качество на собранных данных обеспечивает логистическая регрессия (accuracy около 60 %), тогда как полносвязная нейросеть с тремя скрытыми слоями демонстрирует сопоставимый результат (около 56 %). Линейные подходы, предсказывающие координаты VAD с последующей проекцией на ближайший класс, уступают по точности (порядка 30–45 %), что указывает на преимущественно нелинейную зависимость между параметрами мимики и воспринимаемой эмоцией. Ансамбли однородных моделей не дали прироста качества, что объясняется схожестью их ошибок. Представление VAD подтвердило свою практическую полезность: корреляции предсказанных и эталонных компонент достигали примерно 0,6–0,7 и позволяли интерпретировать близость эмоций и характер ошибок. Дополнительно реализована обратная модель, генерирующая конфигурацию blendshape по заданным координатам (V, A, D), что формирует основу связки «распознавание + генерация» для управления мимикой виртуального персонажа в реальном времени.

Наибольшие затруднения связаны с различением визуально близких эмоций (в частности, перекрёстные ошибки между испугом и удивлением, а также преобладание нейтрального класса при низкой уверенности), что обусловлено частичной окклюзией лица гарнитурой и ограниченным объёмом выборки. В дальнейших исследованиях целесообразно расширить и разнообразить данные, перейти к протоколам оценки с разбиением по участникам, а также развивать мультимодальные решения (мимика + речь + физиологические сигналы) и методы переноса обучения, компенсирующие неполную наблюдаемость лица в VR.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зиннатов А.А., Кугуракова В.В. Механизмы реалистичной мимики для антропоморфных социальных агентов // Электронные библиотеки. — 2020. — Т. 23, № 5. — С. 1011–1025. DOI: 10.26907/1562-5419-2020-23-5-1011-1025
2. Кармадонов В.Ю. Совмещение технологий отслеживания взгляда, распознавания эмоций и VR // Academy. — 2018. — № 7 (34). — С. 41–43.
3. Bastida L., Sillaurren S., Loizaga E., Tomé E., and Moya A. Exploring Human Emotions: A Virtual Reality-Based Experimental Approach Integrating Physiological and Facial Analysis // Multimodal Technologies and Interaction. — 2024. — Т. 8. — No. 6. — С. 47. DOI: 10.3390/mti8060047
4. Buechel S., Hahn U. Emotion Analysis as a Regression Problem — Dimensional Models and Their Implications on Emotion Representation and Metrical Evaluation // 22nd European Conference on Artificial Intelligence — IOS Press, 2016. — Vol. 285, P. 1114–1122. DOI: 10.3233/978-1-61499-672-9-1114
5. Hickson S., Dufour N., Sud A., Kwatra V., Essa I. Eyemotion: Classifying facial expressions in VR using eye-tracking cameras // 2019 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). — IEEE, 2019. — P. 1626–1635. DOI: 10.1109/WACV.2019.00178
6. Linares-Vargas B.G.P., Cieza-Mostacero S.E. Interactive virtual reality environments and emotions: A systematic review // Virtual Reality. — 2024. — Т. 29. — No. 1. — С. 3. DOI: 10.1007/s10055-024-01049-1
7. Ortmann T., Wang Q., Putzar L. EmojiHeroVR: A study on facial expression recognition under partial occlusion from head-mounted displays // 2024 12th International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII). — IEEE, 2024. — С. 80–88. DOI: 10.1109/ACII63134.2024.00014.
8. Polo E.M., Iacomi F., Rey A.V., Ferraris D., Paglialonga A., Barbieri R. Advancing emotion recognition with Virtual Reality: A multimodal approach using physiological signals and machine learning // Computers in Biology and Medicine. — 2025. — Т. 193. — С. 110310. DOI: 10.1016/j.compbiomed.2025.110310
9. Tian F., Hua M., Zhang W., Li Y., Yang X. Emotional arousal in 2D versus 3D virtual reality environments // PLOS ONE. — 2021. — Т. 16. — No. 9. — С. e0256211. DOI: 10.1371/journal.pone.0256211

10. Verma G.K., Tiwary U.S. Affect representation and recognition in 3D continuous valence–arousal–dominance space // Multimedia Tools and Applications. — 2017. — T. 76. — No. 2. — C. 2159–2183. DOI: 10.1007/s11042-015-3119-y
11. Zhang Z., Fort J.M., Giménez Mateu L. Facial expression recognition in virtual reality environments: challenges and opportunities // Frontiers in Psychology. — 2023. — T. 14. — C. 1280136. DOI: 10.3389/fpsyg.2023.1280136
12. Ma Y., Zhang Y., Bachinski M., Fjeld M. Emotion-aware voice assistants: Design, implementation, and preliminary insights // Proceedings of the Eleventh International Symposium of Chinese CHI. — 2023. — C. 527–532. DOI: 10.1145/3629606.3629665

© Долгих Анатолий Андреевич (tolick.dolgih2013@yandex.ru); Радостев Эдуард Андреевич (radosteveduard@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.12

УНИВЕРСАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ КОРПОРАТИВНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ООВО

REFERENCE ENTERPRISE ARCHITECTURE MODEL FOR HIGHER EDUCATION INSITUTIONS

A. Kantalinskiy-Rodin

Summary. The paper addresses the absence of a reference enterprise architecture model for higher education institutions in the Russian Federation under conditions of active digital transformation. The study substantiates the need to shift from fragmented digital initiatives to architecture-based governance of universities as holistic systems. The research aims to develop a universal enterprise architecture model for HEIs based on a comparative analysis and conceptual synthesis of international reference architectures for higher education. It is demonstrated that Higher Education Reference Model (HERM) has evolved into a de facto international reference due to its maturity and reproducibility, which justified its adaptation as the methodological basis for the universal enterprise architecture model in the Russian context. A five-domain architecture is proposed, including artificial intelligence architecture as a standalone domain.

Keywords: digital transformation, higher education, digital maturity, strategic management, enterprise architecture, corporate architecture, reference architecture, artificial intelligence.

Канталинский-Родин Артем Евгеньевич
Директор, ФГБОУ ВО Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, г. Москва
kantalinskiy@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается проблематика отсутствия эталонной (референтной) архитектуры образовательных организаций высшего образования (ООВО) в РФ в условиях активной цифровой трансформации. Обоснована необходимость перехода от фрагментарных цифровых инициатив к архитектурному управлению университетом как целостной системой. Цель исследования — разработка универсальной модели корпоративной архитектуры ООВО, ориентированной на управление цифровой трансформацией. Методологическую основу составили сравнительный архитектурный анализ и концептуальный синтез на базе международных референтных моделей архитектуры высшего образования. Показано, что именно Higher Education Reference Model (HERM) в результате эволюционного развития достигла наибольшей полноты и практической воспроизводимости и стала де-факто международным эталоном, что обусловило её выбор в качестве методологической основы адаптации под российский контекст и формирования универсальной модели корпоративной архитектуры вуза. Предложена пятидоменная архитектурная модель ООВО, включающая архитектуру искусственного интеллекта как самостоятельный домен.

Ключевые слова: цифровая зрелость, цифровая трансформация, высшее образование, архитектура предприятия, корпоративная архитектура, референтная архитектура, искусственный интеллект.

Введение

Цифровая трансформация является одной из ключевых задач развития социально-экономических систем, затрагивая не только технологии, но и организационные структуры, управленческие практики и модели деятельности [1]. В сфере высшего образования цифровые изменения проявляются в расширении цифровых образовательных сред, внедрении информационных систем управления обучением и исследованиями, развитии платформенных решений, а также в активном использовании данных и аналитики при принятии управленческих решений [2]. В этих условиях университеты всё чаще выступают как сложные цифровые организации, требующие системного подхода к управлению изменениями.

В международной практике таким системным инструментом выступает архитектура предприятия (корпоративная архитектура), рассматриваемая не только как способ описания ИТ-ландшафта, но прежде всего как механизм согласования стратегии, процессов, данных, приложений и технологий [3]. Архитектурное управление позволяет формировать целостное представление об организации, снижать фрагментацию цифровых решений и обеспечивать управляемость трансформационных процессов. Для отраслей с высокой степенью цифровой зрелости архитектурные подходы давно опираются на эталонные (референтные) модели, задающие общую структуру и язык описания объектов управления [4, 5].

В российской практике управления цифровой трансформацией ООВО подобные эталонные архитектурные модели в настоящее время отсутствуют. Цифровые инициативы вузов, как правило, реализуются в виде отдельных проектов или программ, не объединённых единой архитектурной методологией. Это приводит к разнородности архитектурных решений, затрудняет сопоставление подходов между университетами и снижает воспроизводимость управленческих практик. Отсутствие референтной архитектуры ООВО следует рассматривать

как самостоятельную научную и практическую проблему, ограничивающую развитие архитектурного управления в высшем образовании.

Ранее в исследованиях было показано, что без архитектурного эталона невозможно выстроить объективную и сопоставимую систему оценки цифровой зрелости образовательных организаций [6]. Однако задача оценки является производной по отношению к более фундаментальной задаче — формированию управляемой архитектуры университета в условиях цифровой трансформации. Настоящая статья развивает данный тезис, смещая фокус с измерительных аспектов цифровой зрелости вуза на архитектурные основы управления цифровыми изменениями в ООВО.

Международный опыт управления архитектурой в высшем образовании демонстрирует наличие специализированных референтных моделей, ориентированных на университетский контекст [7, 8, 9]. Вместе с тем прямой перенос зарубежных моделей в российскую практику затруднён из-за различий в нормативно-правовой среде, организационных структурах и управленческих традициях [10].

Отдельного внимания требует влияние технологий искусственного интеллекта, которые в последние годы приобретают системообразующий характер. Использование ИИ в образовании затрагивает не только технологическую инфраструктуру, но и методы обучения, оценки, научных исследований и управления вузом [11]. Это приводит к появлению новых архитектурных объектов и контуров управления, не укладывающихся в рамки классической четырёхдоменной модели корпоративной архитектуры [12].

Целью настоящего исследования является обоснование необходимости и разработка концептуальной структуры универсальной модели корпоративной архитектуры для ООВО, ориентированной на управление цифровой трансформацией. Гипотеза исследования заключается в том, что наличие универсальной референтной архитектуры создаёт основу для системного управления цифровыми изменениями в университетах и формирует предпосылки для последующего развития инструментов оценки цифровой зрелости.

Обзор литературы и международной практики управления архитектурой в высшем образовании

В теории и практике управления сложными организационными системами архитектура предприятия рассматривается как средство формализации и согласования стратегических целей, бизнес-процессов, информационных ресурсов и технологической инфраструктуры [3, 13]. В отличие от отдельных методик или инструментов автоматизации, архитектурный подход ориентирован на целостное представление организации как системы взаимосвязанных элементов.

Особое место в архитектурном управлении занимают референтные (эталонные) архитектуры и модели. Под референтной архитектурой понимается обобщённое описание типовой структуры объектов и связей, характерных для определённого класса организаций или отрасли, предназначенное для повторного использования и адаптации в конкретных условиях [4, 5]. Такие архитектуры задают рамочную модель и общий язык проектирования и управления архитектурными решениями.

В технологически более прогрессивных отраслях экономики (телекоммуникации, банки и др.) референтные архитектуры (Business Process Framework (eTOM), Banking Industry Architecture Network (BIAN) и др.) используются как инструмент стандартизации и сопоставимости, позволяющий снижать вариативность решений и обеспечивать управляемость изменений. При этом референтные архитектуры отличаются от архитектурных фреймворков (например, The Open Group Architecture Framework): фреймворки задают методологию проектирования, тогда как референтные архитектуры определяют содержательный состав архитектурных объектов и их взаимосвязей.

В ООВО архитектурное управление формировалось существенно позднее, чем в корпоративном секторе. Исторически информационные системы университетов развивались как автономные решения, обслуживающие отдельные функции, что приводило к фрагментации цифрового ландшафта и росту интеграционных затрат [14]. С увеличением сложности ИТ-ландшафта университеты начали заимствовать подходы из корпоративного сектора, включая использование универсальных подходов корпоративной архитектуры [15, 16, 19].

Специфика высшего образования — множественность миссий (образование, наука, общественное развитие), высокая автономность подразделений, разнообразие целевых групп, особая нормативная среда и ограниченность ресурсов — существенно снижает применимость универсальных подходов без специализированной адаптации. Поэтому в международной практике получили развитие специализированные референтные архитектуры университетов [17, 18].

В литературе выделяются различные типы архитектурных артефактов для вузов, различающиеся по охвату и уровню абстракции: процессные и бизнес-ориентированные референтные модели, референтные модели информационных систем, а также корпоративные референтные архитектуры университетов. Анализ показывает, что частные процессные и прикладные модели

обладают ограниченной управленческой применимостью в условиях цифровой трансформации, поскольку не обеспечивают целостного архитектурного представления.

Систематический анализ специализированных референтных архитектур для высшего образования представлен в работах Феликса Санчез-Пучола (Felix Sanchez-Puchol) и соавторов [7, 8, 9]. В данных исследованиях выделяются архитектуры HORA, HOSA, ITANA, CAUDIT, TIER, и HERM, различающиеся по степени универсальности и детализации. Сравнительный анализ показывает, что часть моделей обладает высокой степенью проработки, но жёстко привязана к национальному контексту и используемой нотации, что ограничивает переносимость; другие ориентированы на более абстрактный уровень, упрощая адаптацию, но снижая практическую ценность для архитектурного управления.

В российской научной и управленческой практике отсутствуют эталонные (референтные) архитектуры ООВО, сопоставимые по уровню формализации с международными моделями. Архитектурные решения в вузах принимаются преимущественно в рамках отдельных ИТ-проектов, без опоры на общепринятую архитектурную модель, что затрудняет стратегическое управление цифровой трансформацией [6].

Материалы и методы исследования

Настоящее исследование носит концептуально-аналитический характер и направлено на разработку универсальной модели корпоративной архитектуры ООВО как инструмента управления цифровой трансформацией. Методологическую основу составляют подходы архитектуры предприятия и референтных архитектур, предполагающие синтез эталонных моделей для разных классов организаций.

Эмпирическую базу исследования составили научные публикации, систематические обзоры и аналитические исследования, посвящённые архитектуре предприятия и управлению архитектурой в ВО, включая работы, в которых проведена систематизация и сравнительный анализ референтных моделей архитектуры вузов. Также учитывались нормативно-правовые акты Российской Федерации, задающие рамочные условия деятельности ООВО и цифровой трансформации экономики в целом [20, 21, 22].

Метод синтеза универсальной модели включал три последовательных этапа. На первом этапе выполнена идентификация типовых доменов корпоративной архитектуры (бизнес, данные, приложения, технологии) как минимально необходимого набора для описания сложных организаций [3, 13]. На втором этапе экспертно проведён сравнительный архитектурный анализ международных моделей для вузов по единому набору критериев:

- контекст и институциональная база (национальный, отраслевой, корпоративный уровень);
- годы создания и эволюция версий;
- распространенность и страны, использующие модель;
- текущий статус (активное развитие либо завершённая инициатива);
- архитектурные домены и глубина детализации;
- наличие архитектурного репозитория и типизации элементов;
- переносимость и адаптируемость к различным институциональным и нормативным условиям;
- степень архитектурной зрелости и воспроизводимости.

На третьем этапе выполнен концептуальный синтез эталонной модели ООВО и её адаптация к российскому контексту, включая нормативные ограничения и типовые организационные практики.

В качестве объектов анализа были отобраны наиболее распространённые и концептуально оформленные модели, используемые в международной практике:

- HORA (Higher Education Reference Architecture) [23],
- HOSA (Higher Education Sector Architecture) [24],
- TIER (Trust and Identity in Education and Research) [25],
- APQC Process Classification Framework for Education [26],
- HERM (Higher Education Reference Model) [27].

Выбор данных моделей обусловлен тем, что они представляют различные типы архитектурных артефактов — от процессных классификаторов и инфраструктурных архитектур до полноформатных корпоративных/отраслевых референтных моделей, что позволяет провести сопоставительный анализ в широком методологическом диапазоне.

HORA (Higher Education Reference Architecture)

HORA была разработана в начале 2010-х годов в рамках национальных и межуниверситетских инициатив в странах Европейского союза, прежде всего в Нидерландах. Целевой контекст модели связан с задачами архитектурной стандартизации и унификации ИТ-ландшафта университетов, а институциональная база формировалась при участии государственных структур и профессиональных сообществ в сфере архитектуры предприятия высшего образования.

Практика применения HORA зафиксирована в университетах Нидерландов, а также в отдельных вузах

Германии и Бельгии, участвовавших в совместных архитектурных инициативах. В настоящее время модель не развивается как самостоятельный международный стандарт и используется преимущественно в рамках исходного институционального контекста.

Архитектурно HORA охватывает бизнес-архитектуру, архитектуру приложений и архитектуру данных. Модель сопровождается репозиториями и типизацией элементов, однако они ориентированы на национальный контекст. Управленческая применимость HORA ограничена задачами архитектурной гармонизации, переносимость и воспроизводимость за пределами исходной среды — низкие при высокой архитектурной зрелости.

HOSA (Higher Education Sector Architecture)

Higher Education Sector Architecture (HOSA) представляет собой отраслевую архитектурную модель для высшего образования, разработанную в Нидерландах под координацией организации SURF, объединяющей университеты, научные организации и государственные структуры в сфере цифрового развития образования и науки. Целевой контекст HOSA связан с формированием отраслевой архитектурной модели, предназначенной для согласования цифровых решений университетов на национальном уровне.

Разработка HOSA началась в конце 2010-х годов как ответ на рост сложности цифрового ландшафта высшего образования и необходимость согласованного развития архитектурных решений в масштабе всего сектора образования. В отличие от корпоративных архитектур отдельных университетов, HOSA изначально проектировалась как надорганизационная (sector-level) архитектура, ориентированная на координацию, совместимость и повторное использование решений.

HOSA используется университетами и образовательными организациями Нидерландов в качестве методологической основы при проектировании и согласовании архитектурных решений, а также при взаимодействии с национальными цифровыми платформами и сервисами. Модель активно применяется в национальном контексте и продолжает развиваться в рамках инициатив SURF, что позволяет охарактеризовать её текущий статус как активно поддерживаемый и эволюционирующий.

С точки зрения архитектурных доменов HOSA охватывает архитектуру данных (с фокусом на научные исследования), бизнес-архитектуру, архитектуру приложений. Ключевой особенностью модели является фокус на межорганизационных взаимодействиях, потоках данных и совместных цифровых сервисах. Глубина детализации модели является средней: HOSA намеренно избегает чрезмерной детализации, сохраняя уровень абстракции, достаточный для согласования архитектурных решений между различными организациями сектора.

Переносимость и адаптируемость HOSA за пределы национального контекста Нидерландов оцениваются как ограниченные, поскольку модель тесно связана с институциональной структурой и механизмами управления сектором высшего образования данной страны. Вместе с тем концептуальные принципы HOSA и её ориентация на межорганизационную совместимость представляют интерес для других национальных систем высшего образования.

TIER (Trust and Identity in Education and Research)

Модель TIER была сформирована как архитектурная инициатива в области управления идентификацией и доступом (Identity and Access Management, IAM) в образовательных и исследовательских организациях. TIER представляла собой архитектуру, направленную на обеспечение согласованных механизмов аутентификации, авторизации и управления доступом между различными участниками образовательной среды. Архитектурный контекст TIER охватывал описание ключевых компонентов IAM, включая идентификаторы, службы аутентификации и интеграционные слои для передачи атрибутов и правил доступа между системами.

Инициатива TIER функционировала в рамках международного сообщества университетов и исследовательских организаций, формировавшегося вокруг Internet2 и InCommon Federation в США. Программа TIER была реализована как трёхлетний проект (2016–2018 гг.) с участием многочисленных образовательных организаций и направлена на создание устойчивых архитектурных паттернов IAM, способствующих упрощению внутренних процессов и межинституционального взаимодействия.

После завершения проекта TIER в 2018 году его результаты и архитектурные принципы были агрегированы в виде InCommon Trusted Access Platform (ITAP) — архитектуры управления доступом и идентификацией, интегрированной с инфраструктурой InCommon Federation.

Архитектурно TIER и InCommon Trusted Access Platform фокусируются на технологическом уровне корпоративной архитектуры, описывая инфраструктурные сервисы, компоненты и архитектурные зависимости, необходимые для организации доверенного доступа к ресурсам как внутри одного вуза, так и между различными учреждениями.

Таким образом, InCommon Trusted Access Platform представляет собой архитектурное развитие и практическую реализацию идей TIER, сохраняя архитектурную преемственность, интегрируемость и устойчивость

на уровне инфраструктурных сервисов. Это развитие представляет собой пример того, как архитектурные инициативы, начатые как временные проекты, могут быть переведены в готовые платформы для поддержки управленческих и технологических функций университетов в долгосрочной перспективе.

APQC Process Classification Framework for Education

APQC (American Productivity & Quality Center) PCF for Education разработана американской некоммерческой организацией APQC как референтная модель классификации процессов образовательных организаций. Первая версия для образования была опубликована в 2006 г., актуализированная версия — в 2008 г. Целевой контекст модели — процессное управление, сравнительный анализ (бенчмаркинг) и повышение операционной эффективности.

Модель использовалась университетами США, Канады, Великобритании и ряда других стран. В настоящее время APQC PCF for Education активно применяется как стандарт процессной классификации.

APQC охватывает исключительно бизнес-архитектуру на процессном уровне и отличается крайне высокой глубиной детализации (более 1 500 процессов). Модель располагает устойчивой типизацией/классификацией процессов, обладает высокой управленческой применимостью в задачах оптимизации, высокой переносимостью и воспроизводимостью, но не предназначена для описания корпоративной архитектуры в целом.

Higher Education Reference Model (HERM)

Higher Education Reference Model (HERM) представляет собой международную референтную модель архитектуры ООВО, ориентированную на формирование единого архитектурного языка и воспроизводимого представления университетов как сложных социотехнических систем.

Разработка HERM началась в 2016 г. с выпуска версии 1.0, инициированной и курируемой CAUDIT. Первоначально модель была ориентирована на стандартизацию бизнес-архитектуры и архитектуры данных университетов и стала одним из первых практико-ориентированных архитектурных эталонов для сектора высшего образования. В дальнейшем HERM последовательно развивалась: версия 2.0 (2019 г.) закрепила архитектурную структуру модели; версия 2.5.0 (2020 г.) существенно обновила бизнес- и дата-модели; версия 2.6.0 (2021 г.) включила шаблон бизнес-модели (Business Model Canvas) как стратегический архитектурный артефакт; версия 2.6.1 (2022 г.) носила уточняющий характер. Актуальным этапом развития является выпуск версии 3.1.0 в 2025 г., ориентированной на поддержку стратегического ИТ-планирования и цифровой трансформации университетов, а также включение в объем модели технической архитектуры.

Ключевой особенностью HERM является её институциональная эволюция в формате постоянного международного сотрудничества. В работах [7; 8; 9] показано, что HERM развивалась от описательных представлений информационных систем и функций университета к полноформатной референтной архитектуре, включающей согласованные домены и типизацию элементов.

В настоящее время модель разрабатывается и поддерживается совместно профессиональными сообществами CAUDIT, EDUCAUSE, EUNIS и UCISA, что обеспечивает её интернационализацию и устойчивое развитие. HERM используется в университетах Австралии, Великобритании, стран Европы, Северной Америки и других регионов.

HERM охватывает классические домены корпоративной архитектуры (бизнес-архитектуру, архитектуру данных, архитектуру приложений и технологическую архитектуру), а также отличается сбалансированной глубиной детализации, достаточной для формирования архитектурных репозиториев и типизации элементов. Управленческая применимость HERM проявляется в задачах архитектурного управления, стратегического планирования и согласования цифровой трансформации. Высокая переносимость и адаптируемость модели обусловлены отсутствием жёсткой привязки к национальному нормативному контексту. С точки зрения автора, степень архитектурной зрелости и воспроизводимости HERM позволяет рассматривать её как де-факто международный стандарт референтной архитектуры для ООВО.

Результаты

С учетом результатов сравнительного анализа выбор HERM в качестве методологической основы для формирования универсальной модели корпоративной архитектуры ООВО и её адаптации с учётом требований законодательства и управленческой практики РФ является обоснованным. В международных методических рекомендациях отмечается системное влияние генеративного ИИ на процессы образования и исследований [9], а в междисциплинарных исследованиях подчёркивается, что ИИ-подходы требуют особых контуров управления качеством, жизненным циклом моделей и доверия к результатам [10]. В рамках настоящего исследования это реализовано в виде выделенного домена ИИ, согласованного с остальными доменами корпоративной архитектуры.

В результате проведённого анализа и концептуального синтеза разработана универсальная модель корпоративной архитектуры ООВО, предназначенная для использования в качестве эталонной основы управления цифровой трансформацией отечественных вузов. Модель формирует единый архитектурный язык и обеспечивает сопоставимость архитектурных решений и воспроизводимость управленческих практик в условиях высокой сложности цифровых изменений.

Универсальная модель представлена в виде иерархии архитектурных элементов, унифицированной для всех доменов. Иерархия включает: (1) домен архитектуры, (2) предметную область, (3) функциональный или логический элемент, (4) конкретный архитектурный объект (бизнес-процесс, данные, система, компонент, сервис). Все элементы эталонной архитектуры сформированы с учётом специфики законодательства и нормативных требований Российской Федерации, определяющих рамки деятельности ООВО и цифровой трансформации.

В составе модели выделены пять доменов:

1. Бизнес-архитектура (Business Reference Model — BRM),
2. Архитектура данных (Data Reference Model — DRM),
3. Архитектура приложений (Application Reference Model — ARM),
4. Технологическая архитектура (Technology Reference Model — TRM),
5. Архитектура искусственного интеллекта (Artificial Intelligence Reference Model — AIRM).

Количественный состав разработанной автором эталонной архитектуры отечественных ООВО составляет 725 элементов: BRM — 203, DRM — 102, ARM — 156, TRM — 156, AIRM — 108.

Бизнес-архитектура (BRM)

Бизнес-архитектура отражает функциональную структуру деятельности университета и служит исходным уровнем архитектурного управления. Иерархия элементов BRM включает направления деятельности, бизнес-области и укрупнённые функции, бизнес-процессы и виды деятельности, а также конкретные функции и сервисы. Примерами элементов BRM являются: реализация образовательных программ и управление учебным процессом; управление контингентом обучающихся; организация научных исследований; управление персоналом и финансами; управление качеством образования; оказание цифровых сервисов обучающимся и преподавателям.

Архитектура данных (DRM)

Архитектура данных описывает логическую структуру данных, используемых и формируемых в университете, и включает домены данных, предметные области, наборы данных и ключевые сущности. Примеры: данные об обучающихся и абитуриентах; учебные планы и результаты обучения; данные о научных проектах, грантах и публикациях; кадровые и финансово-экономические данные; управленческая аналитика и цифровые следы обучающихся. Формирование домена выполнено с учётом нормативных требований РФ, в том числе в части образовательной деятельности и обработки персональных данных.

Архитектура приложений (ARM)

Архитектура приложений отражает ландшафт информационных систем и цифровых сервисов и включает классы систем, прикладные подсистемы, функциональные модули и сервисы. Примеры: системы управления обучением (LMS), управления контингентом (SIS), электронный документооборот, системы управления исследованиями, кадровые и финансовые системы, аналитические и интеграционные платформы.

Технологическая архитектура (TRM)

Технологическая архитектура задаёт инфраструктурную и платформенную основу функционирования приложений и данных. Иерархия TRM включает технологические домены, классы технологий, компоненты и сервисы эксплуатации. Примеры: вычислительная и сетевая инфраструктура, платформы хранения и обработки данных, облачные и гибридные решения, средства информационной безопасности, мониторинг и управление эксплуатацией.

Архитектура искусственного интеллекта (AIRM)

Архитектура ИИ выделена как самостоятельный домен корпоративной архитектуры ООВО в силу фундаментального влияния ИИ на образовательные, научные и управленческие процессы. Иерархия AIRM включает классы ИИ-решений, функциональные контуры, модели и алгоритмы, а также сервисы и механизмы управления жизненным циклом ИИ-решений. Примеры: интеллектуальные ассистенты обучающихся и преподавателей; ИИ-системы анализа образовательных данных; генеративные модели для создания учебных материалов; системы поддержки управленческих решений; механизмы контроля качества, доверия и этических ограничений. Методологическое обоснование выделения домена согласуется с международными рекомендациями по генеративному ИИ в образовании [9] и исследованиями по управлению ИИ как социотехнической системе [10].

Обсуждение

Разработанная универсальная модель корпоративной архитектуры ООВО соотносится с международны-

ми подходами к архитектурному управлению в высшем образовании, систематизированными в работах [7, 8, 9]. При сохранении доменного принципа и ориентации на воспроизводимость, предложенная модель отличается универсальностью и адаптацией к нормативному и организационному контексту Российской Федерации.

Научная новизна исследования заключается в системной постановке и решении задачи формирования эталонной референтной архитектуры ООВО для российского контекста, а также в обосновании архитектуры искусственного интеллекта как самостоятельного домена корпоративной архитектуры университета. Это расширяет классическую четырёхдоменную парадигму и обеспечивает управляемость ИИ-инициатив как части цифровой трансформации.

Практическая значимость модели проявляется в возможности использования эталонной архитектуры как основы архитектурного управления: согласования цифровых проектов со стратегическими целями, контроля ИТ-ландшафта, обеспечения сопоставимости решений между университетами и повторного использования архитектурных шаблонов (паттернов).

Ограничения и направления дальнейших исследований

Предложенная универсальная модель корпоративной архитектуры носит эталонный характер и требует адаптации к масштабу, профилю и стратегии развития конкретного вуза.

В качестве приоритетных направлений дальнейших исследований целесообразно выделить:

— анализ доступных программных решений на рынке для апробации модели либо разработку решения, наиболее полно удовлетворяющего функциональным требованиям;
— апробацию универсальной модели корпоративной архитектуры в РАНХиГС;
— разработку методических рекомендаций по внедрению архитектурного управления в вузах;
— формирование архитектурно-обоснованных инструментов оценки цифровой зрелости как производного эффекта архитектурного управления;

Заключение

Проведённое исследование подтвердило актуальность формирования архитектурного подхода к управлению цифровой трансформацией образовательных организаций высшего образования и выявило методологический разрыв в российской практике, связанный с отсутствием эталонной референтной архитектуры ООВО. В рамках исследования разработана универсальная модель корпоративной архитектуры ООВО, адаптированная к требованиям законодательства Российской Федерации.

Ключевым результатом является пятидоменная структура корпоративной архитектуры, включающая бизнес-архитектуру, архитектуру данных, архитектуру приложений, технологическую архитектуру и архитектуру искусственного интеллекта как самостоятельный домен. Состав разработанной эталонной архитектуры обеспечивает баланс универсальности и достаточной детализации для практического применения.

Предложенная модель может служить основой для внедрения архитектурного управления в российских университетах, развития методических подходов и инструментальной поддержки, а также формирования архитектурно-обоснованных механизмов оценки цифровой зрелости как следствия управляемой трансформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. OECD. The OECD Digital Government Policy Framework [Электронный ресурс]. — URL: https://www.oecd.org/governance/digital-government/digital-government-policy-framework/ (дата обращения: 04.01.2026).
2. UNESCO. Digital Transformation of Education [Электронный ресурс]. — URL: https://www.unesco.org/en/digital-education (дата обращения: 04.01.2026).
3. The Open Group. TOGAF® Standard, Version 9.2 [Электронный ресурс]. — URL: https://www.opengroup.org/togaf (дата обращения: 18.10.2025).
4. Angelov S.A., Grefen P.W. P.J., Greefhorst D.A framework for analysis and design of software reference architectures // Information and Software Technology. — 2012. — Vol. 54. — No. 4. — P. 417–431.
5. Nakagawa E.Y., Antonino P.O. Overview of Reference Architectures // IEEE Software. — 2022. — Vol. 39. — No. 4. — P. 18–27.
6. Канталинский-Родин А.Е. Оценка цифровой зрелости ООВО // «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические» — 2025. — № 12
7. Sanchez-Puchol F., Pastor-Collado J.A., Borrell B. Towards an Unified Information Systems Reference Model for Higher Education Institutions // Procedia Computer Science. — 2017. — Vol. 121. — P. 542–553.
8. Sanchez-Puchol F., Pastor-Collado J.A., Borrell B. An Architecture Framework for Higher Education Institutions // Journal of Enterprise Architecture. — 2021. — Vol. 17. — No. 4. — P. 45–58.
9. Sanchez-Puchol F., Borrell B., Pastor-Collado J.A. First in-depth analysis of enterprise architectures and models for higher education institutions // IADIS International Journal on Computer Science and Information Systems Vol. 13, No. 2, pp. 30–46

10. Yanosky R., McCredie J. Enterprise Architecture in Higher Education // EDUCAUSE Review. — 2008. — Vol. 43. — No. 4. — P. 12–23.
11. UNESCO. Guidance on Generative AI in Education and Research [Электронный ресурс]. — URL: https://www.unesco.org/en/articles/guidance-generative-ai-education-and-research (дата обращения: 04.01.2026).
12. Dwivedi Y.K., Hughes L., Ismagilova E. et al. Artificial Intelligence (AI): Multidisciplinary perspectives on emerging challenges // International Journal of Information Management. — 2021. — Vol. 57. — Article 101994.
13. Ross J.W., Weill P., Robertson D.C. Enterprise Architecture as Strategy: Creating a Foundation for Business Execution. — Boston: Harvard Business School Press, 2006. — 256 p.
14. Seman E.A.A., Amboala T., Bahar I.A.A., Hamid N.A.A., Al-Qdah M. S. A Systematic Literature Review on Enterprise Architecture in Higher Education Institutions // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. — 2022. — Vol. 100. — No. 6. — P. 1581–1596.
15. Alshareef N., Elakeil S.M., Maatuk A.M. Framework of Information Systems Reference Model for Higher Education Institutions // Education and Information Technologies. — 2023. — Vol. 28. — No. 6. — P. 7891–7912.
16. Byungura J.C., Hansson H. Enterprise Architecture Principles for Higher Education // International Journal of Applied Research in Social Sciences — 2024. — Vol. 6. — Issue 12.
17. Zulkefli N.A., Rahman A.A., Ismail N. Model Enterprise Architecture for Information Technology Services in Universities // Computers & Education. — 2022. — Vol. 184. — Article 104516.
18. Alamri S., Abdullah M., Albar A. Enterprise Architecture Framework in Higher Education Institutions // International Journal of Information Management. — 2022. — Vol. 64. — Article 102456.
19. Tjong Y., Adi S., Kosala R., Prabowo H. A systematic mapping study on enterprise architecture framework for HEI // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). — 2018. — Vol. 9. — Issue 13. — P. 403–411.
20. Федеральный закон Российской Федерации от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» [Электронный ресурс]. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174/ (дата обращения: 04.01.2026).
21. Распоряжение Правительства РФ от 05.07.2025 № 1805-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации отрасли науки и высшего образования до 2030 года» [Электронный ресурс]. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_509357/ (дата обращения: 04.01.2026).
22. Указ Президента РФ от 10.10.2019 № 490 (ред. от 15.02.2024) «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» [Электронный ресурс]. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_335184/ (дата обращения: 26.10.2025).
23. SURF. HORA: Higher Education Reference Architecture [Электронный ресурс]. — Нидерланды, 2014–2022. — URL: https://hora.surf.nl/index.php/Hoofdpagina (дата обращения: 04.01.2026).
24. HOSA — Higher Education Sector Architecture. — 2024. [Электронный ресурс]. — URL: https://www.surf.nl/en/themes/architecture-standards/higher-education-sector-architecture-hosa (дата обращения: 04.01.2026).
25. InCommon Trusted Access Platform Library. — 2024. [Электронный ресурс]. — URL: https://spaces.at.internet2.edu (дата обращения: 04.01.2026).
26. APQC. Process Classification Framework for Education. — 2008. [Электронный ресурс]. — URL: https://www.apqc.org (дата обращения: 04.01.2026).
27. HERM — Higher Education Reference Models. — 2025. [Электронный ресурс]. — URL: https://library.educause.edu/resources/2021/9/the-higher-education-reference-models (дата обращения: 04.01.2026).

© Канталинский-Родин Артем Евгеньевич (kantalinskiy@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.13

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКЕ В КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ СИСТЕМАХ ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ

OPTIMIZATION OF MOVEMENT PATHS DURING AUTOMATIC FOCUSING IN COMPLEMENTARY LASER MICROMACHINING SYSTEMS

D. Katasonov
V. Moskaleva

Summary. The paper considers the formation of extended structures (tens of millimeters) using laser micromachining methods. These structures are characterized by microtopology (tens of microns), which imposes stringent requirements on the focused laser beam positioning system. The use of complementary laser beam scanning systems allows achieving the required positioning accuracy. The use of short-focus flat-field objectives allows for the required diameter of the focused laser beam. However, such objectives are characterized by small working field sizes (about 5x5 mm) and a small beam waist (about 10–15 μm). This, in turn, requires dividing the object into separate recording zones, for each of which it is necessary to ensure the positioning of the lens relative to the substrate. This requirement can be met by measuring the distance to the center of each recording zone, which in turn leads to many substrate movements before the formation of the object. This paper discusses an approach to the implementation of an automatic focusing system that allows for reducing the number of such movements.

Keywords: laser micromachining, CAD model, automatic focusing, transportation problem, traveling salesman problem, complementary system.

Катасонов Денис Николаевич
кандидат технических наук, научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской Академии Наук; доцент, Новосибирский государственный технический университет
katasonov@iae.nsk.su
Москалева Виолетта Михайловна
Новосибирский государственный технический университет (НГТУ) г. Новосибирск

Аннотация. Рассматривается формирование при помощи методов лазерной микрообработки протяженных структур (десятки миллиметров), которые характеризуются микротопологией (десятки микрон), что накладывает ужесточает требования к системе позиционирования сфокусированного лазерного пучка. Применение комплементарных систем сканирования лазерного пучка позволяют достичь требуемой точности позиционирования. Использование короткофокусных объективов плоского поля позволяет обеспечить необходимый диаметр сфокусированного лазерного пучка. Однако, такие объективы характеризуются небольшими размерами рабочего поля (порядка 5х5 мм) и небольшой величиной перетяжки пучка (порядка 10–15 мкм). Это в свою очередь требует дробления объекта на отдельные зоны записи, для каждой из которых необходимо обеспечить позиционирования объектива относительно подложки. Такое требование можно соблюсти за счет измерения расстояния до центра каждой зоны записи, что в свою очередь приводит к большому числу перемещений подложки перед осуществлением формирования объекта. В настоящей работе рассматривается подход к реализации системы автоматической фокусировки позволяющий уменьшить число таких перемещений.

Ключевые слова: лазерная микрообработка, CAD-модель, автоматическая фокусировка, транспортная задача, задача коммивояжера, комплементарная система.

Введение

Существует ряд задач лазерной микрообработки, которые требует формирования самонесущих плоских изделий из тонкой металлической фольги. При этом, такие объекты состоят из большого количества отдельных элементов, размер перемычек между которыми сопоставим с толщиной фольги. Примером таких объектов являются литографические маски, рентген шаблоны, элементы террагерцовой оптики [1, 2]. Данные объекты характеризуются общими размерами в пределах 70х70 мм, при этом типичные размеры отдельного элемента находится в пределах 50–500 мкм, а толщина фольги находится в диапазоне 50–70 мкм.

Развитие лазерных методов микрообработки, которые позволяют осуществлять субмикронное позиционирование лазерного пучка, дает возможность использовать лазерную резку для формирования таких объектов. Данная технология позволяет применить промышленно

выпускаемую фольгу, при этом формирование объекта сводится к фиксации фольги и последующему перемещению лазерного пучка согласно подготовленной модели.

Выполненные ранее совместные исследования ИАиЭ СОРАН и ИФП СО РАН показали принципиальную возможность изготовления рассмотренных объектов с требуемыми параметрами. Результаты исследования продемонстрированы при помощи изображений, сформированных сканирующим электронным микроскопом [3, 4]

Существующие методы позиционирования и фокусировки лазерного пучка дают возможность формирования лазерного пучка диаметром порядка 5 мкм на поле до 5х5 мм. Фокусирующие объективы, позволяющие достичь таких параметров, обладают глубиной фокусировки в пределах 20 мкм, что в свою очередь накладывает жесткие требования на систему фокусировки пучка. Одним из способов поддержания необходимого расстояния между фокусирующим объективом и обрабатываемой подложкой является применение бесконтактного датчика расстояния, который закреплен в едином блоке с фокусирующим объективом. По данным датчика расстояния возможно осуществить автоматическую коррекцию взаимного положения объектива и подложки. При этом латеральные размеры формируемых объектов могут существенно превышать размеры поля обработки объектива, что приводит к необходимости деления объекта на отдельные зоны, и его формирование будет производиться поэтапно. При этом топология заготовки может характеризоваться разностью высот между зонами записи, что без дополнительной коррекции положения объектива относительно подложки приведет к появлению дефектов. Таким образом, для каждой зоны записи необходимо определить величину коррекции положения объектива. Это в свою очередь, требует перемещения обрабатываемой подложки для обеспечения лазерной обработки и измерения расстояния. Координаты положения зон записи в общем случае неизвестны, и зависят от количества формируемых объектов и их положения на столе.

В настоящей работе рассматривается модификация алгоритма автоматической фокусировки, который позволяет сократить число перемещений между зонами записи, что в свою очередь ускорит процесс обработки.

Описание системы лазерной микрообработки

Требуемый диаметр лазерного пучка достигается за счет применения короткофокусного объектива, параметры которого согласованы с типом лазерного источника. При выполнении проведенных ранее исследований, о которых было сказано ранее, была использована комплементарная система сканирования (позиционирования) лазерного луча. Схематичное изображение комплементарной системы приведено на рисунке 1.

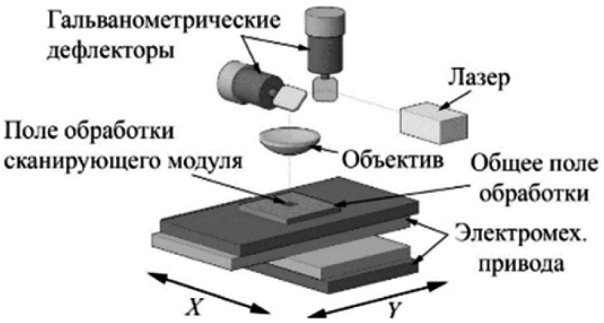


Рис. 1. Комплементарная система сканирования

Показанная на рисунке 1 система состоит из двух дополняющих друг друга систем позиционирования — гальванометрических дефлекторов (сканеров) и электромеханических приводов [5]. Лазерный пучок попадает в так называемый «низкоинерционный» сканер, который состоит из гальванометрических дефлекторов и фокусирующего объектива, и расположен непосредственно над зоной обработки. Сканер осуществляет позиционирование лазерного пучка в зоне, которая является фрагментом общего поля обработки. При этом, обрабатываемая подложка располагается на электромеханическом столе («высокоинерционном» сканере), который перемещает обрабатываемую подложку относительно центра фокусирующего объектива. Таким образом, формирование объекта, размеры которого превышают размеры рабочего поля фокусирующего объектива, осуществляется по фрагментам. Поддержание расстояния между фокусирующим объективом и обрабатываемой подложкой обеспечивается за счет перемещения сборки из объектива и гальванометрических дефлекторов при помощи дополнительного вертикального привода.

Формируемый объект задается в виде CAD модели, которая представлена в форматах STL и DXF.

Особенности системы фокусировки лазерного пучка

Как было сказано ранее, комплементарный способ сканирования пучка требует дробления формируемого объекта на зоны обработки. Размер зон обработки ограничен параметрами фокусирующего объектива и дополнительно ограничен таким образом, что перепад высоты подложки в пределах зоны обработки не превышает глубину фокусировки лазерного пучка. Таким образом, автоматическую фокусировку можно обеспечить, осуществляя измерение расстояния до обрабатываемой подложки в пределах очередной зоны обработки. Это позволит учесть, как топологию подложки, так и неточность в определении общей толщины подложки и системы ее крепления. Как было отмечено ранее, это выполняется при помощи бесконтактного датчика расстояния

(датчика фокуса), который расположен в одном блоке с объективом и гальванометрическими сканерами. Схематичное изображение взаимного расположение фокусирующего объектива и датчика фокуса приведено на рисунке 2.

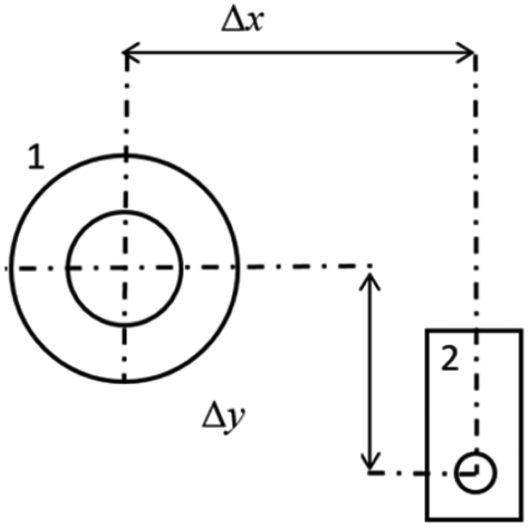


Рис. 2. Взаимное расположение объектива и датчика фокуса. 1 — фокусирующий объектив, 2— датчик фокусировки, Δx, Δy — соответствующие смещения

Как видно из рисунка 2 датчик фокуса и объектив латерально разнесены между собой, таким образом, чтобы обеспечить измерение расстояния до центра очередной зоны обработки, необходимо сформировать траекторию перемещения подложки таким образом, чтобы учесть величины Δx и Δy. На рисунке 3 показана типичная CAD модель самонесущего объекта, на примере модели рентгеншаблона.

Типичный объект, модель которого показана на рисунке 3 состоит из набора гексагональных элементов, типичный размер которых находится в пределах 50–800 мкм, а ширина перемычек между объектами в пределах 50-100 мкм, при этом сам объект имеет размеры в пределах 50 мм. Таким образом, при размере зоны обработки в пределах 5–6 мм, формируемый объект потребует выполнения порядка ста измерений (по количеству зон обработки), и как следствие потребуется такое же количество перемещений электромеханического стола для согласования положения зоны обработки и датчика фокуса. На рисунке 4 показан фрагмент рассмотренной ранее модели, разделенной на зоны обработки.

Деление модели на зоны обработки осуществляется по вертикали и горизонтали, начиная от левого нижнего угла модели. Также следует отменить, что одновременно на предметном столе, размеры которого составляют 200x200 мм, может быть расположено несколько формируемых объектов. Это в свою очередь увеличивает требуемое количество перемещений электромеханического стола, и время затрачиваемое на его работу может быть сравнимо со временем формирования изделия.

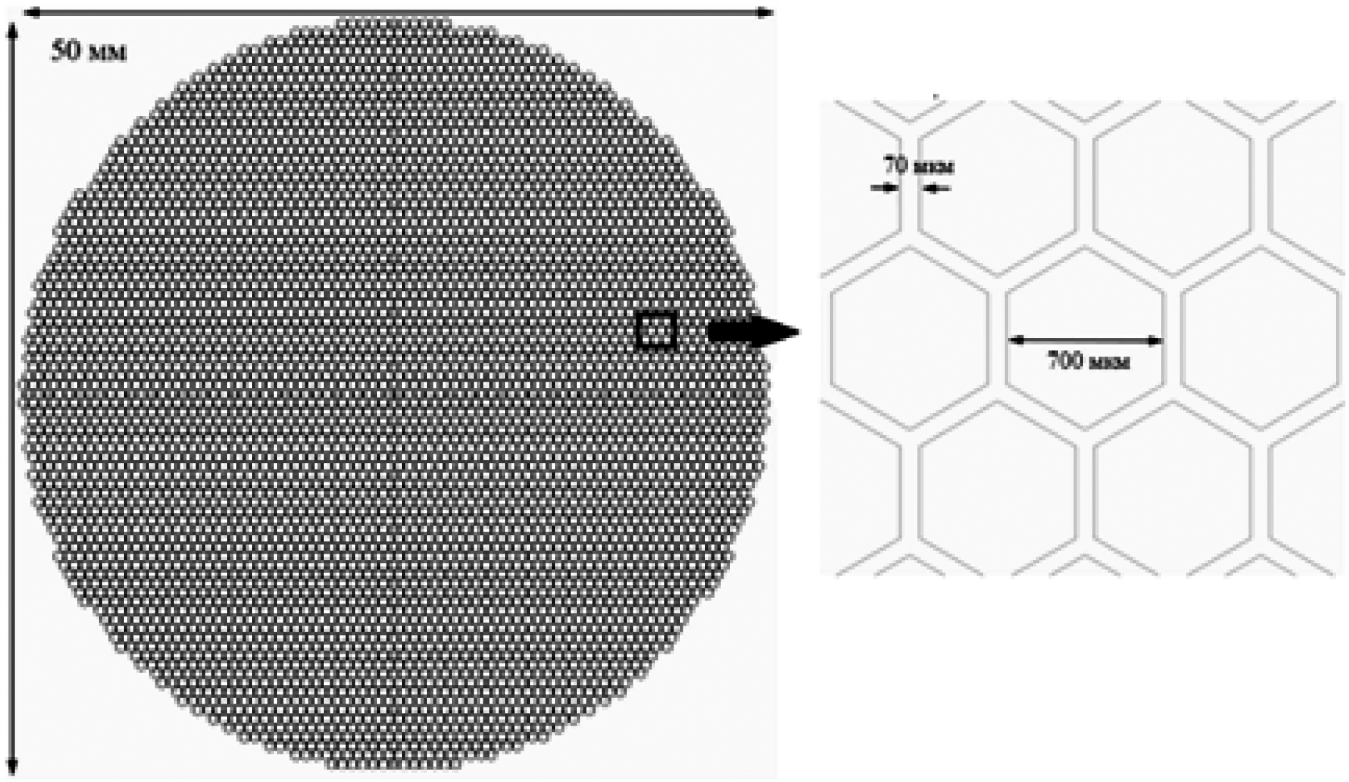


Рис. 3. Типичный вид самонесущего объекта

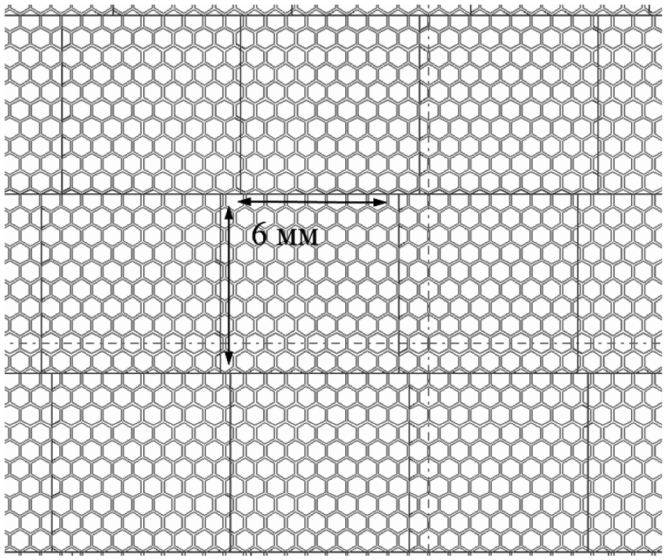


Рис. 4. Деление на зоны обработки

При этом калибровки сканирующих систем таковы, что порядок обработки объектов и зон в пределах каждого объекта не имеет значения, и не влияет на качество изделия. Ранее были проведены исследования, которые показали возможность использования такого подхода при формировании протяженных объектов [6].

Таким образом, для ускорения процесса обработки требуется оптимизация траекторий перемещения стола.

Траектории перемещения электромеханического стола

Рассмотрим формирование двух рентгеношаблонов, заданных рассмотренной ранее моделью. На рисунке 5 приведен скриншот рабочей области программного обеспечения системы лазерной записи, на котором показаны модели объектов разделенные на зоны записи.

На рисунке 5 А показан фрагмент рабочего поля программного обеспечения системы лазерной записи, на рабочем поле показаны загруженные CAD-модели формируемых объектов, а квадратами показаны рассчитанные зоны записи. В центрах зон будет осуществлено измерение. На рисунке 5 В показана визуализация траектории перемещения стола в соответствие с приведенными зонами. Общий путь перемещения электромеханических приводов, обеспечивающий измерение всех зон для рассмотренных объектов составит 1680 мм. Также аналогичный путь перемещения будет повторен при лазерном формировании объектов (с учетом поправки на взаимное положение объектива и датчика расстояния).

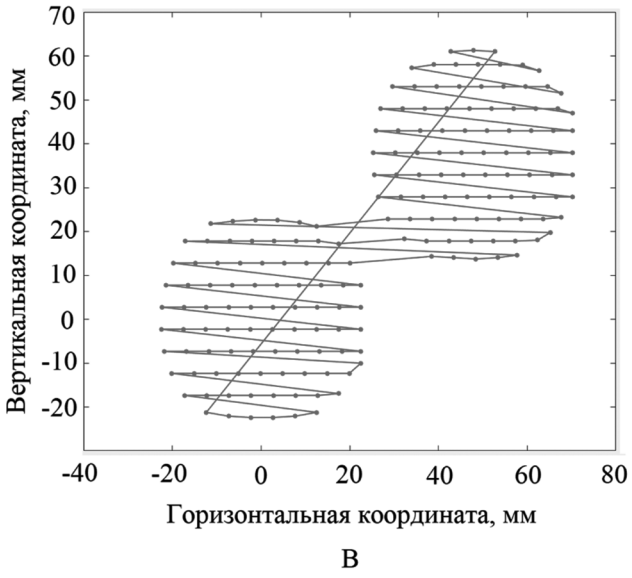
Задачу обхода центров зон можно рассмотреть, как задачу коммивояжера. Для решения такой транспортной задачи был использован метод имитации отжига [7]. В результате был сформирован путь перемещения, показанный на рисунке 6.

Общее расстояние при обходе зон записи по пути, показанному на рисунке 6 равен 874 мм, что практически в два раза меньше исходного пути. На рисунке 7 показан результат формирования рассмотренного ранее объекта, при наличии и отсутствии автоматической фокусировки.

Объекты, изображенные на рисунке 7 изготовлены из медной фольги толщиной 50 мкм, на выносках показаны укрупненные изображения их фрагментов. На ри-



А



В

Рис. 5. Разделенные на зоны записи модели объектов

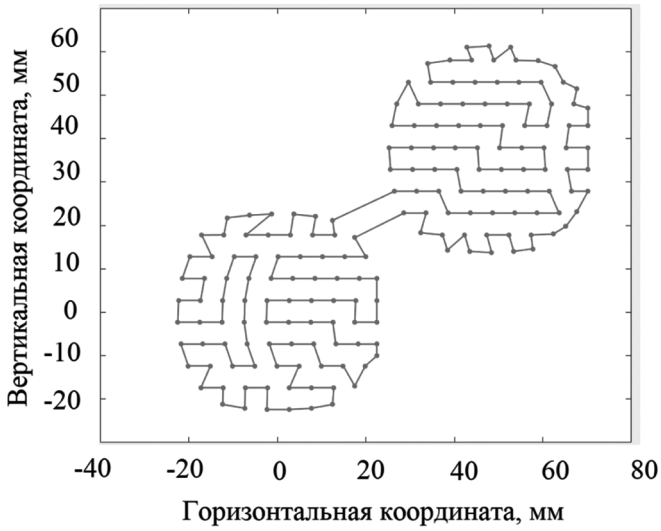


Рис. 6. Оптимизированный путь перемещения

сунке 7 В показан объект, который был сформирован без автоматической коррекции положения объектива относительно подложки в каждой зоне записи. Как видно из укрупненного изображения фрагмента, показанного на рисунке 7 В, объект содержит дефекты вызванные неполным отделение фольги в пределах элементов топологии. На рисунке 7 А показан объект, сформированный со включенной автоматической коррекцией и указанных дефектов не содержит.

Заключение

Применение методов лазерной микрообработки позволяет формировать микротопологий различного применения. При этом общие размеры формируемых изделий, при микронных размерах отдельных элементов топологии могут достигать десятков миллиметров. Примерами таких топологий могут являться оптические шкалы и сетки, например, штриховая мера длины IIБ, длина которой равна 200 мм, при цене 10 мкм. Другим примером являются рассмотренные в данной работе самонесущие плоские элементы. При этом форма обрабатываемых подложек зачастую характеризуется разностью толщины, как в микро, так и в макромасштабе, что накладывает ограничения на качество фокусировки лазерного луча. Комплементарные системы сканирования лазерного луча позволяют формировать такие объекты с приемлемым быстродействием (за счет минимизации веса подвижных элементов), однако применяемые фокусирующие объективы плоского поля накладывают существенные ограничения на размеры зоны обработки и качество фокусировки.

Рассмотренный в настоящей работе подход к автоматической фокусировке подразумевает предварительное измерение расстояния до каждой зоны записи, что требует большого числа перемещений электромеханических приводов. Однако, используя алгоритмы оптимизации можно сократить общую длину перемещений.

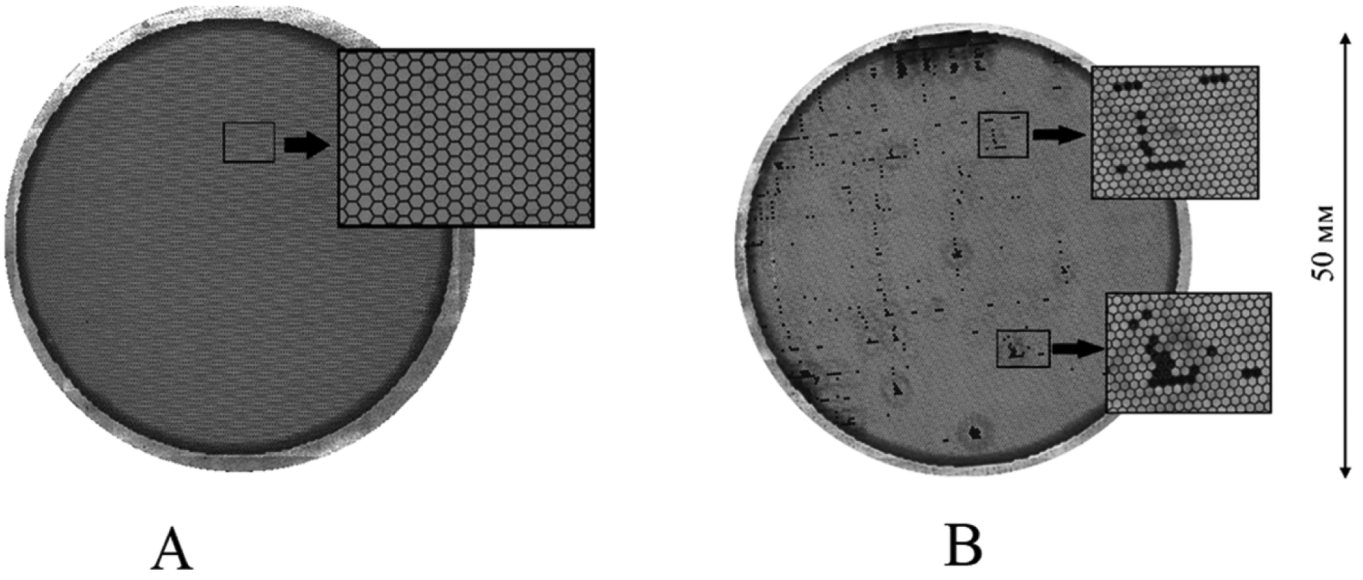


Рис. 7. Пример сформированных объектов. А — с использованием автоматической фокусировки, В — без использования автоматической фокусировки

ЛИТЕРАТУРА

1. Генцелев А.Н. и др. Создание квазиоптических селективных элементов терагерцового диапазона в виде псевдометаллических структур посредством глубокой рентгеновской литографии //Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2017. — №. 7. — С. 32–42.
2. Кузнецов С.А. и др. Разработка медных сеточных структур для частотной и пространственной селекции ТГц-излучения новосибирского лазера на свободных электронах // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 9. С. 38–49.
3. Генцелев А.Н., Баев С Г. Изготовление планарных элементов терагерцовой оптики посредством глубокой трафаретной рентгенолитографии //Автометрия. — 2022. — №. 2. — С. 104.
4. Генцелев А.Н., Баев С.Г. и др. Реализация фильтров высоких частот субтерагерцового диапазона с использованием высокоаспектных полимерных структур //Автометрия. — 2017. — №. 1. — С. 107–116.
5. Голошевский Н.В. Методы и программно-аппаратные средства управления устройствами лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования: дис. канд. тех. наук. Новосибирск: Институт Автоматики и Электрометрии СО РАН, 2021. 138 с.
6. Баев С.Г., Катасонов Д.Н. Применение алгоритмов автоматической фокусировки в процессе лазерной субмикронной микрообработки // Системы анализа и обработки данных. — 2025. — № 4(100). С. 147–158.
7. Товстик Т.М., Жукова Е В. Алгоритм приближенного решения задачи коммивояжера //Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. — 2013. — №. 1. — С. 101–109.

© Катасонов Денис Николаевич (katasonov@iae.nsk.su); Москалева Виолетта Михайловна
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.14

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В КОМПЬЮТЕРНЫХ АТАКАХ И ПРОТИВОДЕЙСТВИИ ТАКОВЫМ: КОМПЛЕКСНЫЙ ФИШИНГ, DEEPFAKE-МЕНЕДЖЕРЫ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ OSINT

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN COMPUTER ATTACKS AND THEIR COUNTERACTION: ADVANCED PHISHING, DEEPFAKE MANAGERS, AND AUTOMATED OSINT

A. Kim
I. Krepak

Summary. This scientific article is devoted to the analysis of the transformation of information security threats and information protection mechanisms under the influence of modern artificial intelligence technologies. The paper examines key areas of artificial intelligence application in offensive scenarios—from complex phishing with personalized social engineering attacks to deepfake managers capable of impersonating individuals in real time, as well as automated OSINT that accelerates the collection and correlation of target-related data. Defensive applications of artificial intelligence are also considered, including intelligent anomaly detection, countering deepfake content, behavioral authentication, and automated incident response. Special attention is paid to the asymmetry between attackers and victims, ethical and legal risks, and practical recommendations for actively countering AI-enhanced attacks.

Keywords: artificial intelligence, deepfake technologies, social engineering, automated OSINT, generative model, cyberattack, anomaly detection.

Ким Артур Сергеевич
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва
archikim1441@gmail.com
Крепак Иван Павлович
руководитель группы информационной безопасности, ООО Клиника Будь Здоров;
аспирант, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва
krepak.2311@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена анализу трансформации угроз информационной безопасности и средств защиты информации под влиянием современных технологий искусственного интеллекта. Рассматриваются ключевые направления использования искусственного интеллекта в наступательных сценариях — от комплексного фишинга с персонализированными социально-инженерными атаками до deepfake-менеджеров, способных имитировать физических лиц в режиме реального времени, а также автоматизированного OSINT, ускоряющего сбор и корреляцию данных о целях. Рассматриваются защитные применения искусственного интеллекта: интеллектуальное выявление аномалий, противодействие deepfake-содержимому, поведенческая аутентификация и автоматизация реагирования на инциденты. Особое внимание уделяется асимметрии между злоумышленником и жертвой, этическим и правовым рискам, а также практическим рекомендациям по активному противодействию ИИ-усиленным атакам.

Ключевые слова: искусственный интеллект, deepfake-технологии, социальная инженерия, автоматизированный OSINT, генеративная модель, кибератака, обнаружение аномалий.

Введение

Искусственный интеллект сейчас становится одним из ключевых факторов эволюции угроз информационной безопасности и средств защиты информации. Генеративные модели, машинное обучение и автоматизированный анализ данных позволяют злоумышленникам производить высокоточные компьютерные атаки, в рамках которых применяются комплексный фишинг, deepfake-менеджеры и авто-OSINT, значительно повышая их эффективность и латентность. Одновременно, искусственный интеллект (ИИ) активно внедряется в защитные механизмы — от поведенческого анализа и выявления аномалий до автоматизированного реагирования на инциденты информационной безопасности. В условиях нарастающей асимметрии между злоумышленниками и жертвами, особое значение приобретает понимание принципов работы ИИ-усиленных компьютерных атак и методов противодействия таковым, что и определяет цель данной статьи.

Эволюция киберугроз в эпоху искусственного интеллекта

Искусственный интеллект существенно изменил характер современных угроз информационной безопасности, сместив фокус от массовых атак к точечным и адаптивным сценариям. Генеративные модели и ал-

горитмы машинного обучения позволяют автоматизировать подготовку компьютерных атак, анализировать поведение целей и создавать правдоподобные социально-инженерные сценарии [5].

Доступность ИИ-инструментов привела к росту количества целевых компьютерных атак, в которых фишинг сообщения и коммуникации формируются с учётом контекста, роли и цифрового профиля жертвы. Это снижает эффективность традиционных защитных механизмов, основанных на сигнатурах и шаблонах.

Отдельную роль играет автоматизированный OSINT, ускоряющий сбор и корреляцию данных из открытых источников. Использование ИИ позволяет масштабировать этап разведки без потери качества, что напрямую повышает успешность кибератак. В результате формируется асимметричная среда, где злоумышленники быстрее адаптируются к изменениям, а защитные системы вынуждены переходить к интеллектуальным и поведенческим методам анализа.

Комплексный фишинг и deepfake-менеджеры как ключевые инструменты злоумышленника

Сегодня комплексный фишинг, который так же имеет название «Фишинг 2.0», представляет собой результат эволюции социально-инженерных компьютерных атак, усиленных возможностями искусственного интеллекта. Генеративные модели позволяют создавать персонализированные сообщения, адаптированные под роль, контекст и стиль коммуникации конкретной жертвы, что сильно повышает эффективность компьютерных атак по сравнению с традиционным фишингом [1].

Особое место занимают deepfake-менеджеры. Это атаки, основанные на синтезе голоса и видео доверенных лиц (коллеги, руководители, родственники и друзья). Такие сценарии часто реализуются через мессенджеры и средства видеосвязи. Сопровождаются элементами срочности и давления, характерными для компьютерной атаки «CEO fraud». Жертва при этом взаимодействует с ИИ-системой, способной в реальном времени имитировать поведение реального человека. Ход такой атаки обозначен в соответствующей блок-схеме, обозначенной на Рисунке 1.

Автоматизированный OSINT и роль искусственного интеллекта в подготовке компьютерных атак

Автоматизированный OSINT является важным элементом подготовки современных целевых компьютерных атак. Использование искусственного интеллекта позволяет быстро собирать и анализировать данные из открытых источников, выявляя связи и характеристики целей, недоступные при ручной разведке [4].

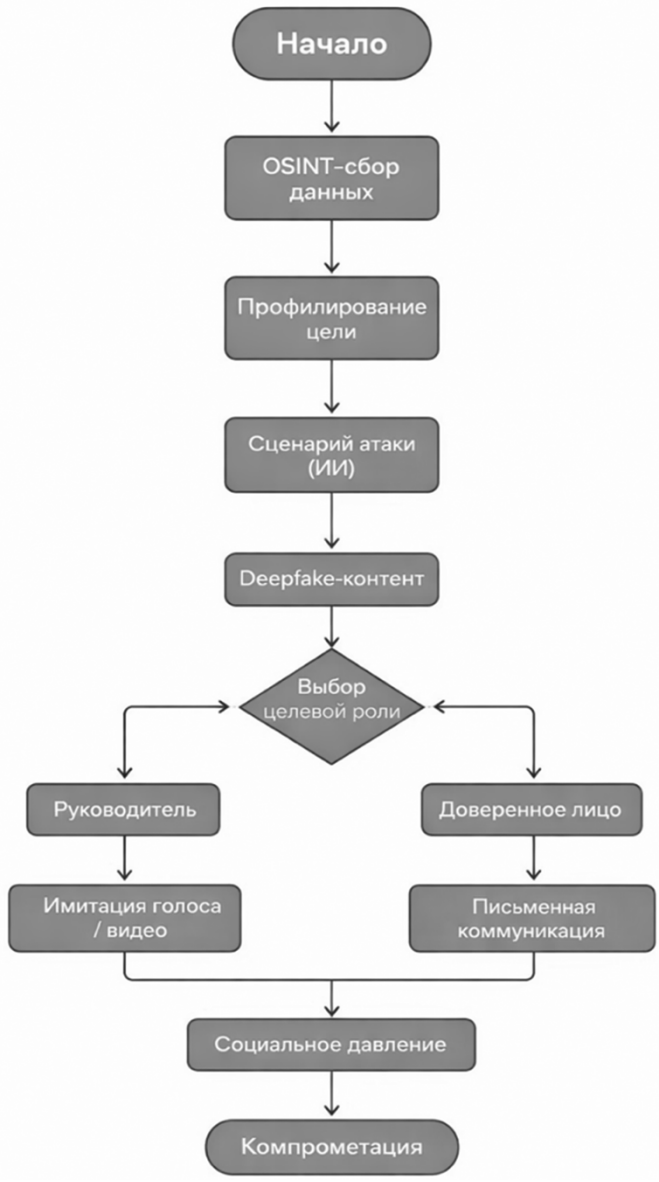


Рис. 1. Блок-схема реализации комплексного фишинга через deepfake-менеджера

Технически авто-OSINT реализуется в виде многоэтапной кибератаки, включающей агрегацию, фильтрацию и корреляцию данных. Алгоритмы машинного обучения формируют профиль цели, повышая точность и эффективность социальной инженерии [4]. ИИ также применяется для приоритизации целей и выбора необходимого сценария компьютерной атаки, включая канал и форму коммуникации. Это позволяет масштабировать целевые кибератаки при минимальных финансовых затратах и снижении частоты ошибок.

Искусственный интеллект в средствах защиты информации

Искусственный интеллект активно применяется для противодействия ИИ-усиленным компьютерным атакам,

таким как комплексный фишинг и deepfake-социальная инженерия. В отличие от традиционных сигнатурных средств защиты, ИИ-ориентированные решения используют преимущественно поведенческий анализ, выявление аномалий и контекстную оценку риска, что позволяет обнаруживать ранее неизвестные и модифицированные правонарушения [3].

Ключевым элементом защиты является многоэтапный анализ входящих коммуникаций: сообщений, звонков и видеосессий. На данном этапе проверяется источник, стиль коммуникации, частотные и лингвистические признаки, а также поведенческие отклонения от нормы. Общая логика такого процесса представлена на Рисунке 2, где показан конвейер обнаружения и реагирования на ИИ-усиленные атаки.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма применения искусственного интеллекта в средствах защиты информации

Программное обоснование

На практике защитные механизмы часто строятся по принципу каскадной оценки риска. Сначала извлекаются простые признаки (наличие срочности, упоминание переводов денежных средств, запросы учетных данных), затем, вычисляется итоговый скоринг, на основе которого принимается решение о блокировке или эскалации инцидента в SOC. Даже без сложных нейросетевых моделей такой подход позволяет отсеивать значительную часть фишинговых атак на раннем этапе.

Ниже (Листинг 1) приведен пример Python-скрипта, реализующего базовый детектор фишинг сообщений. Он решает задачу первичной оценки риска и может использоваться как вспомогательный модуль в почтовом и мессенджер фильтре.

```
def phishing_risk_score(message: str) -> int:
keywords = [«срочно», «немедленно», «перевести», «подтвердить», «пароль», «доступ», «финансы», «платеж»]
score = 0
message_lower = message.lower()
for word in keywords:
if word in message_lower:
score += 1
if «@» in message_lower or «http» in message_lower:
score += 1
return score
msg = «Срочно переведите средства и подтверди доступ к аккаунту»
risk = phishing_risk_score(msg)
if risk >= 3:
print («Высокий риск фишинга»)
else:
print («Низкий риск»)
```

Листинг 1. Пример оценки риска фишингового сообщения

Данный код анализирует текст сообщения, определяет количество подозрительных признаков и формирует итоговую оценку риска. Несмотря на простоту, подобный механизм эффективно выявляет сообщения с элементами давления и срочности, характерные для комплексного и компьютерных атак класса «CEO fraud» [1] [5]. В сочетании с более сложными моделями машинного обучения, анти-deepfake проверками и автоматизированным реагированием такие решения формируют многоуровневую систему защиты информации, способную адаптироваться к современным ИИ-усиленным угрозам.

Сравнительный анализ и практические рекомендации

Развитие ИИ приводит к одновременному усилению наступательных и защитных возможностей. Для главных действий злоумышленника приоритетом являются автоматизация, персонализация и масштабируемость, тогда как защитные решения ориентированы на раннее выявление аномалий и снижение влияния человеческого фактора. Сравнение ключевых подходов представлено в Таблице 1.

Таблица 1.
Сравнение ИИ-усиленных компьютерных атак и средств защиты информации

Аспект	Наступательные действия (комплексный фишинг, deepfake и OSINT автоматизация)	Защита (ИИ в информационной безопасности)
Цель	Компрометация данных и несанкционированный доступ к финансовым активам.	Предотвращение и минимизация количества инцидентов информационной безопасности
Основные технологии	Генеративные модели, OSINT автоматизация и deepfake	ML-анализ аномалий и анти-deepfake
Уровень автоматизации	Высокий	Высокий
Масштабируемость	Массовая персонализация	Централизованная защита
Участие человека	Минимальная на этапе атаки	Ключевая на этапе реагирования
Основные признаки	Срочность, давление, имитация авторитета	Поведенческие отклонения и аномалии
Время реакции	Минимальное	Зависит от зрелости SOC

На основе проведенного анализа можно сформулировать ряд практических рекомендаций. Организациям следует внедрять многоуровневые системы защиты, сочетающие ИИ-инструменты с процессами подтверждения действий через независимые каналы связи. Особое внимание необходимо уделять обучению сотрудников распознаванию признаков комплексного фишинга и компьютерных атак с использованием deepfake. Кроме того, важно интегрировать автоматизированные средства анализа и реагирования в процессы SOC, обеспечивая быструю эскалацию инцидентов и снижение потенциального ущерба.

Заключение

Искусственный интеллект существенно трансформирует как методы компьютерных атак, так и средства киберзащиты. Фишинг 2.0, deepfake-менеджеры и автоматизированный OSINT демонстрируют переход к более точным, адаптивным и латентным компьютерным атакам. В то же время ИИ становится ключевым инструментом защиты информационных систем, обеспечивая постоянный поведенческий анализ, выявление аномалий и автоматизацию реагирования на инциденты.

Искусственный интеллект радикально меняет ландшафт кибератак и методов защиты, создавая новую реальность информационной безопасности. Современные угрозы информационной безопасности становятся всё более сложными и скрытыми. Однако, ИИ также играет ключевую роль в защите корпоративных сетей и персональных устройств, предлагая инструменты для непрерывного мониторинга поведения пользователей, выявления подозрительных действий и автоматического устранения угроз. Для эффективного противостояния таким рискам необходима целостная стратегия, включающая современные технические средства, строгие внутренние регламенты и постоянное обучение сотрудников принципам цифровой гигиены.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фишинг 2.0: как мессенджеры и дипфейки стали оружием кибермошенников // Anti-Malware [Электронный ресурс]. — 2025. — URL: https://www.anti-malware.ru/analytics/Threats_Analysis/Phishing20-messengers-deepfakes (дата обращения: 18.12.2025).
2. Искусственный интеллект в кибербезопасности: баланс угроз и защитных технологий // Хабр [Электронный ресурс]. — 2025. — URL: https://habr.com/ru/companies/solarsecurity/articles/954744/ (дата обращения: 18.12.2025).
3. Искусственный интеллект в киберзащите // Positive Technologies [Электронный ресурс]. — 2025. — URL: https://ptsecurity.com/research/analytics/iskusstvennyi-intellekt-v-kiberzaschite/ (дата обращения: 19.12.2025).
4. OSINT 2025: Полное Руководство по Инструментам, AI и Автоматизации Разведки // Codeby.net [Электронный ресурс]. — 2025. — URL: https://codeby.net/threads/osint-2025-polnoye-rukovodstvo-po-instrumentam-ai-i-avtomatizatsii-razvedki.88590/ (дата обращения: 19.12.2025).
5. ИИ в информационной безопасности: от генерации фишинга до анализа уязвимостей // Хабр [Электронный ресурс]. — 2025. — URL: https://habr.com/ru/companies/ru_mts/articles/966440/ (дата обращения: 20.12.2025).

© Ким Артур Сергеевич (archikim1441@gmail.com); Крепак Иван Павлович (krepak.2311@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.15

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К АВТОМАТИЗАЦИИ НАПОЛНЕНИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО СЛОВАРЯ ДЛЯ ЦЕРКОВНОСЛАВЯНСКОГО ЯЗЫКА

COMPUTATIONAL APPROACHES TO AUTOMATING THE FILLING OF A MORPHOLOGICAL DICTIONARY FOR THE CHURCH SLAVONIC LANGUAGE

M. Klychkov

Summary. This article examines computational approaches to the automated compilation of a morphological dictionary for the Church Slavonic language. The relevance of this topic is due to the insufficient representation of Old Church Slavonic texts (11th–17th centuries) in existing linguistic corpora and the lack of access to full texts, which hinders comprehensive linguistic research. The creation of a specialized corpus of manuscript heritage is proposed, which will allow for the systematization and digitization of Church Slavonic manuscripts and facilitate rapid search and analysis of the morphological and syntactic features of the Old Russian language. The research focus is on the technology of constructing a corpus of handwritten texts, and the development of models and algorithms for the automated generation of a morphological dictionary. The presented methods contribute to the expansion of the capabilities of digital linguistic resources and the development of corpus linguistics in the field of historical Slavic languages.

Keywords: corpus linguistics, Church Slavonic, morphological dictionary, computational methods, linguistic corpus, natural language processing.

Клычков Матвей Дмитриевич
инженер, аспирант, Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ
utherluminous@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются вычислительные подходы к автоматизированному наполнению морфологического словаря для церковнославянского языка. Актуальность темы обусловлена недостаточной представленностью старославянских текстов (XI–XVII вв.) в существующих лингвистических корпусах и отсутствием доступа к полным текстам, что затрудняет проведение комплексных языковых исследований. Предлагается создание специализированного корпуса рукописного наследия, что позволит систематизировать и оцифровать церковнославянские рукописи, обеспечить быстрый поиск и анализ морфологических и синтаксических особенностей древнерусского языка. В качестве объекта исследования выбрана технология построения корпуса рукописных текстов, а предметом — разработка моделей и алгоритмов для автоматизированного формирования морфологического словаря. Представленные методы способствуют расширению возможностей цифровых лингвистических ресурсов и развитию корпусной лингвистики в области исторических славянских языков.

Ключевые слова: корпусная лингвистика, церковнославянский язык, морфологический словарь, вычислительные методы, лингвистический корпус, обработка естественного языка.

Введение

Распознавание древних текстов представляет собой сложную задачу, включающую два ключевых этапа: сегментацию (выделение отдельных символов из изображения текста) и классификацию (определение соответствия каждого символа определённой букве алфавита). Для улучшения качества работы классификации существует необходимость проводить статистическую коррекцию ее результатов. Данный подход может позволить существенно улучшить качество распознавания посредством динамического обучения классификатора.

Создание эффективного морфологического словаря представляет собой основу для качественной статистической коррекции результатов классификации в системах распознавания древних текстов. Современные подходы к построению таких словарей можно разделить на несколько основных направлений, каждое из которых имеет свои преимущества и области применения.

Одним из наиболее распространённых методов является автоматическое извлечение морфологической информации из текстовых корпусов. Этот подход основан на анализе больших массивов текстов для выявления морфологических закономерностей и создания словарных структур [1, 2]. Исследования показывают, что создание частотных словарей на основе литературных произведений позволяет эффективно анализировать структурные и семантические аспекты языка [1]. Лексикографический метод обеспечивает детальное изучение объектов лексикографирования и их функционирования в языке [3,4]. Методы корпусной лингвистики используют специализированные системы для анализа композиционной структуры текстов и извлечения многокомпонентных терминов [5], что особенно важно для древних текстов с их специфической лексикой.

Второе направление включает статистические и машинно-обучаемые подходы к генерации морфологических словарей. Методы неконтролируемого обучения морфологии позволяют автоматически создавать словари и базы морфологических правил из текстовых корпусов без предварительной разметки [6,7]. Статистический подход с использованием парадигм эксплуатирует понятие морфологических парадигм — наборы морфологических категорий, которые могут применяться к однородным множествам слов [7]. Современные исследования демонстрируют эффективность гибридных подходов, сочетающих глубокое обучение с высокоточными морфологическими словарями на этапе вывода [8,9]. Такие методы обеспечивают 50 % снижение ошибок в лематизации и 58 % снижение ошибок в морфологическом теггинге по сравнению с традиционными подходами [8].

Третий подход базируется на ручном создании и экспертных системах. Лексикографические методы предполагают моделирование структуры словарной статьи и создание программных лексикографических продуктов с использованием специализированных языков программирования [5,10]. Исследования в области древнерусских текстов показывают важность создания фреймовых структур словников, содержащих слова в виде ссылок на фреймы букв из соответствующих частей базы знаний [11]. Принципы лексикографического описания включают определение основных принципов при опосредованном переводе и применение методов эквивалентного перевода в процессе обработки словарных статей [12]. Подобные подходы требуют значительных экспертных знаний, но обеспечивают высокую точность для специализированных доменов [13, 10].

Четвёртое направление представлено современными нейросетевыми подходами. Рекурсивные нейронные сети способны создавать представления морфологически сложных слов из их морфем, эффективно обрабатывая редкие и сложные слова [14]. Трансформерные модели демонстрируют высокую эффективность в морфологическом анализе, особенно при использовании контекстуальных эмбеддингов [8,9]. Исследования показывают, что модели на основе векторного квантования (VQ-VAE) с множественными кодовыми книгами обеспечивают интерпретируемое неконтролируемое морфологическое обучение, сравнимое по производительности с контролируемыми моделями [15]. Статистическое машинное обучение для генерации морфологии позволяет создавать модели, способные предсказывать словоформы с точностью до 98,9 % при наличии полных морфологических признаков [16,17]. Графовые полуконтролируемые методы обучения используют морфологические, синтаксические и семантические отношения между словами для автоматического построения широкопокрывающих лексиконов из небольших начальных наборов [18].

Пятое направление включает интегрированные методологии, объединяющие преимущества различных подходов. Гибридные системы сочетают правиловые методы с машинным обучением для достижения высокой точности при сохранении интерпретируемости результатов [19, 20]. Многоуровневые архитектуры используют комбинацию морфологических HMM с контекстно-чувствительными правилами переписывания для индукции базовой морфологии [19]. Современные исследования показывают эффективность систем с множественными кодовыми книгами, где каждая кодовая книга специализируется на различных морфологических признаках, что способствует интерпретируемости модели [15]. Методы автоматического извлечения терминологии с использованием глубокого обучения и статистического анализа обеспечивают создание специализированных словарей для конкретных предметных областей [21, 22, 23]. Подобные подходы особенно перспективны для древних текстов, где требуется сочетание лингвистической экспертизы с вычислительными методами.

Материалы и методы исследования

Выполненные работы включали в себя исследовательскую и инженерную части.

В исследовательскую часть входила задача определить современные методы по обогащению словарей новыми словоформами. Для этого были проанализированы современные подходы, описанные ранее. Учитывая имеющийся набор данных в виде небольшого количества размеченных текстов и словаря расширяемого и обогащаемого филологами, было выдвинуто решение сконцентрироваться на гибридном dictionary-based подходе.

В качестве основного инструмента морфологического анализа был выбран pymorphy2. Данный выбор, во-первых, обусловлен тем, что pymorphy2 использует словари OpenCorpora, что обеспечивает возможность к приведению словаря slavcorpora к этому формату. Во-вторых, библиотека предоставляет эвристические алгоритмы для анализа неизвестных слов, что критически важно при работе с постоянно пополняемым словарем. В-третьих, pymorphy2 обладает возможностями генерации полных парадигм склонения, что позволяет автоматически получать все словоформы для новых лексем, добавляемых филологами. Открытый исходный код библиотеки обеспечивает возможность модификации и адаптации под старославянский язык.

Учитывая факт того, что количество установленных образцов словоизменения (парадигм) для старославянского языка может быть недостаточным для качественной работы pymorphy2, представляется целесообразным использование современных много-

язычных инструментов для автоматического анализа дополнительных текстов и последующего обогащения словаря. В контексте pymorphy2 парадигма представляет собой полный набор словоформ одной лексемы — например, все падежные формы существительного или все временные формы глагола, объединенные общей основой и грамматическими характеристиками [24].

Stanza как решение для предварительного анализа представляет особый интерес благодаря своей языковоагностической архитектуре [25]. Инструмент показывает конкурентоспособную производительность и использует полностью нейронный пайплайн, который включает лемматизацию, морфологический анализ частей речи и универсальных морфологических признаков. Ключевой особенностью является способность системы обрабатывать сырой текст без предварительной токенизации, что очень важно при работе с историческими текстами старославянского языка.

Также внимания заслуживает использование триграммной модели для морфологической дисамбигуации поверх результатов pymorphy2[26]. Как показывают исследования, точность определения грамматического падежа с учетом контекста возрастает с 82 % до 94 % при использовании триграммной модели. Модель анализирует последовательность из трех морфологических тегов для выбора наиболее вероятной интерпретации каждого слова в предложении.

Интеграция этих технологий позволит создать многоуровневую систему обогащения словаря: первичный анализ дополнительных текстов с помощью Stanza/UDPipe, извлечение новых парадигм словоизменения, их валидация и последующая интеграция в словарь pymorphy2.

Были проанализированы и проведены эксперименты со следующими технологиями:

1. Pymorphy2
2. Stanza
3. UDPipe

Pymorphy2 — морфологический анализатор, реализованный на Python для русского языка. Анализатор принимает слово и на основе его морфологии производит серию гипотез классификации относительно части речи, рода, числа, падежа и других характеристик [24].

Данная технология может представлять собой интерес не только для готовых словарей, но и для тех, которые требуют расширения, так как особое внимание в данной технологии уделяется обработке слов, отсутствующих в словаре.

Автор данной технологии разработал комплексную систему правил для анализа неизвестных слов:

1. Удаление общих префиксов
2. Анализ слов, заканчивающихся на другие словарные слова
3. Сопоставление окончаний
4. Обработка слов с дефисами
5. Специальные правила для различных типов токенов

Это решение обусловлено пониманием того, что простое увеличение размера словаря не решает проблему эффективно из-за закона Ципфа и связанного с ним закона убывающей отдачи.

Автор статьи вводит такое понятие как парадигма слова, согласно статье [1] — это модель флексии лексемы. Она состоит из триплетов (prefix, suffix, tag) для каждой словоформы в лексеме, где каждая словоформа i может быть представлена как: prefix + stem + suffix, при этом основа (stem) остается одинаковой для всех слов в лексеме.

```
ёж      NOUN,anim,masc sing,nomn
ежа     NOUN,anim,masc sing,gent
ежу     NOUN,anim,masc sing,datv
...
ежами   NOUN,anim,masc plur,ablt
ежах    NOUN,anim,masc plur,loct
```

Рис 1. Пример лексемы [24]

Основываясь на статье о pymorphy [24], можно сделать следующее предположение: имея достаточное количество «парадигм» слов, мы можем получить хорошее качество работы анализатора даже на неполном наборе данных. Под набором данных понимаются леммы и соответствующие им словоформы.

Для того чтобы апробировать данную гипотезу был взят словарь OpenCorpora(тут какая то ссылка тоже), проанализирован и реализован следующий алгоритм стратифицированного деления словаря по морфологическим признакам.

Математическое описание алгоритма стратификации

1. Исходные данные

Пусть $L = l_1, l_2, ..., l_n$ — множество всех лемм в словаре OpenCorpora, где $|L| = N$.

Каждая лемма l_i характеризуется:

- $POS(l_i)$ — часть речи леммы
- $P(l_i)$ — морфологическая парадигма леммы

2. Первый уровень стратификации: по частям речи

Разбиваем словарь на страты по частям речи:

$$L = U_{j=1}^{m} L_j, \text{ где } L_j = l_i \in L : POS(l_i) = POS_j$$

$$|L_j| = n_j, \sum_{j=1}^{m} n_j = N$$

3. Второй уровень стратификации: по парадигмам внутри частей речи

Внутри каждой части речи разбиваем на подстраты по парадигмам:

$$L_j = U_{k=1}^{Kj} L_{jk}, \text{ где } L_{jk} = l_i \in L_j : P(l_i) = P_{jk}$$

$$|L_{jk}| = n_{jk}, \sum n_{jk} = n_j$$

Формулы для создания подмножества размером p%

4. Целевой размер подмножества

$$S = \left\lfloor N \times \frac{p}{100} \right\rfloor$$

5. Размер выборки из каждой части речи

Пропорциональное распределение по частям речи:

$$s_j = max\left(1, \left\lfloor S \times \frac{n_j}{N} \right\rfloor\right)$$

где: s_j — количество лемм для выборки из части речи j max (1, ...) гарантирует минимум 1 лемму из каждой части речи.

6. Размер выборки из каждой парадигмы

Внутри каждой части речи j распределяем пропорционально по парадигмам:

$$s_{jk} = max\left(1, \left\lfloor s_j \times \frac{n_{jk}}{n_j} \right\rfloor\right)$$

где: s_{jk} — количество лемм для выборки из парадигмы k части речи j

7. Корректировка размеров

Поскольку округления могут дать неточный размер, применяем корректировку:

$s'_{jk} = min(s_{jk}, n_{jk})$ (не можем взять больше, чем есть)

Если $\sum s'_{jk} < s_j$, добираем случайно из оставшихся лемм части речи j

Если $\sum\sum s'_{jk} > S$, обрезаем случайно до размера S

Свойства у данного алгоритма будут следующие:

Доля части речи в подмножестве ≈ Доля части речи в исходном словаре:

$$P(POS = j \vee lemma \in Subarr) \approx$$
$$\approx P(POS = j \vee lemma \in L)$$

Каждая продуктивная парадигма представлена минимум 1 леммой:

$$\forall j,k : n_{jk} > 0 \rightarrow s'_{jk} \geq 1$$

Внутри каждой страты выборка случайна, что обеспечивает несмещенность:

E[качество_анализа|Subsarr]=E[качество_анализа|L]

Этот алгоритм гарантирует, что морфологическая структура подмножества максимально близка к структуре исходного словаря, что критически важно для объективной оценки влияния размера словаря на качество морфологического анализа.

Результаты и обсуждения

Таким образом словарь opencorpora был разделен на 9 частей в соотношении 10 %, 20 %, 30 % …, 90 % от объема словаря. Для каждого подмножества словаря была составлена выборка из 100,000 слов из всего словаря из тех слов, которые не попадали в подмножества.

Были получены следующие результаты представленные на рис 2:

Исходя из графика с метриками точности, можно сделать вывод, что для составленного набора данных под каждое стратифицированное подмножество словаря качество его морфологического анализа по мере расширения растет, но темпы прироста — небольшие. Общий процент точного определения грамматических характеристик находится в пределах от 89% до 97% в соответствии с распределением.

Исходя из этого гипотеза может считаться успешно апробированой в рамках данного эксперимента.

Благодаря данному заключению можно сделать вывод, что нам действительно подходит данная технология. В связи с чем можно спроектировать систему наполнения словаря следующим образом (Рис. 3).

Концепт решения представляет собой комплексную систему для автоматизированного анализа древнерусских текстов и интерактивного расширения морфологи-

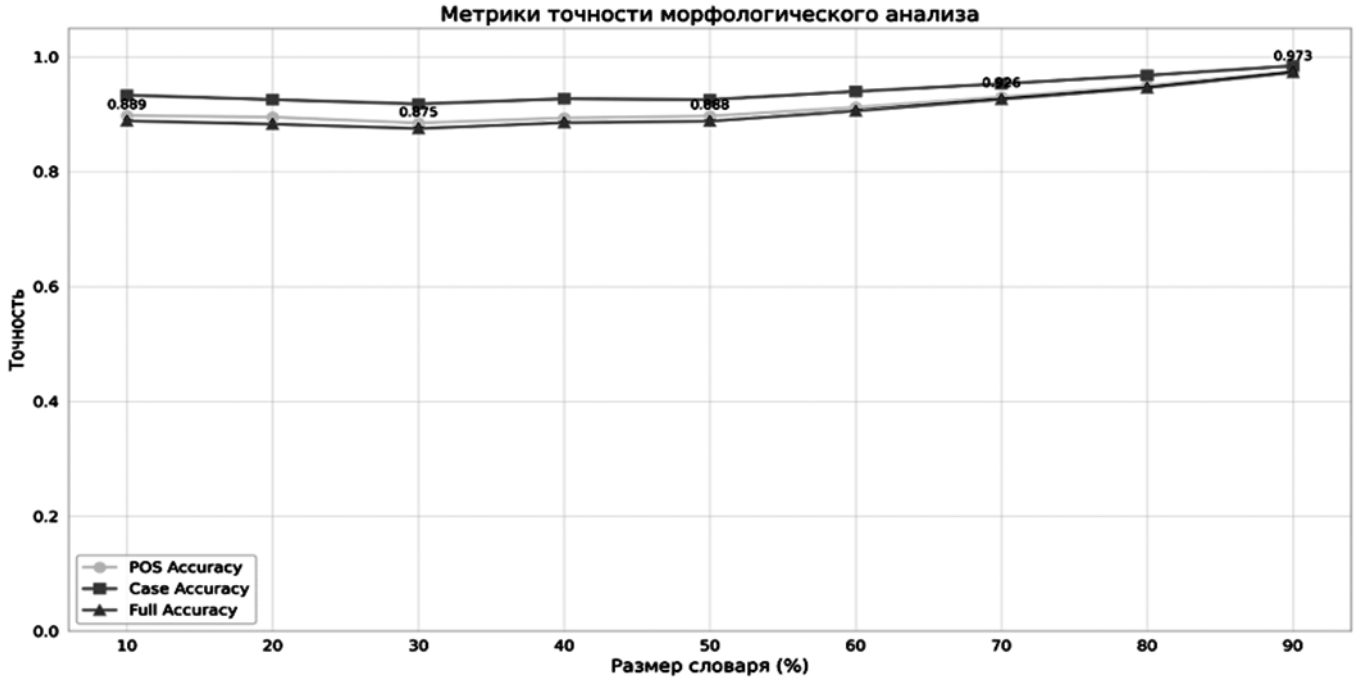


Рис. 2. Метрики точности морфологического анализа (POS: Доля слов, для которых часть речи определена правильно, Case: Доля слов, для которых падеж определен правильно, Full: Доля слов, для которых все основные характеристики определены правильно одновременно)

ческого словаря PyMorphy2 с участием экспертов-филологов.

Система реализует непрерывный цикл улучшения: каждое валидированное экспертом слово немедленно включается в словарь, что повышает качество анализа последующих неизвестных слов. Этот подход обеспечивает адаптивное развитие морфологического анализатора.

Данное решение обеспечивает эффективный и научно обоснованный подход к расширению морфологических ресурсов для древнерусского языка, сочетая возможности современных NLP-технологий с экспертизой специалистов-филологов.

На текущий момент для реализации данного концепта проделаны следующие этапы работы:

1. Реализованы программные средства, переводящие словарь slavcorpora в формат OpenCorpora для последующей компиляции в словарь pymorphy.
2. Написано расширение для пайморфи для старославянского языка, которое учитывает грамматические особенности данного языка (добавлена форма глагола супин, двойственное число, новые времена итд.). Расширен анализатор для старославянского языка.
3. Реализован прототип веб интерфейса для филологов. А именно: все шаблоны для частей речи, шаблон для предзаполненных грамматических характеристик, редактор, включающий в себя раскладку со старославянской клавиатурой.

Прототип интерфейса для филологов предславлен на Рис. 4.

Заключение

В ходе проведенного исследования была разработана и реализована комплексная методология изучения влияния размера словаря на качество морфологического анализа в системе pymorphy2 на материале словаря OpenCorpora.

Спроектирована комплексная система для расширения и адаптации морфологического анализатора PyMorphy2 под задачи обработки древнерусских текстов. Проделанная работа охватывает широкий спектр технических и лингвистических аспектов, от низкоуровневой настройки морфологического движка до создания пользовательского интерфейса для экспертной валидации.

Полученные результаты и разработанные методики закладывают фундамент для создания комплексных систем распознавания и анализа древних рукописных текстов, что имеет важное значение для сохранения культурного наследия и научных исследований.

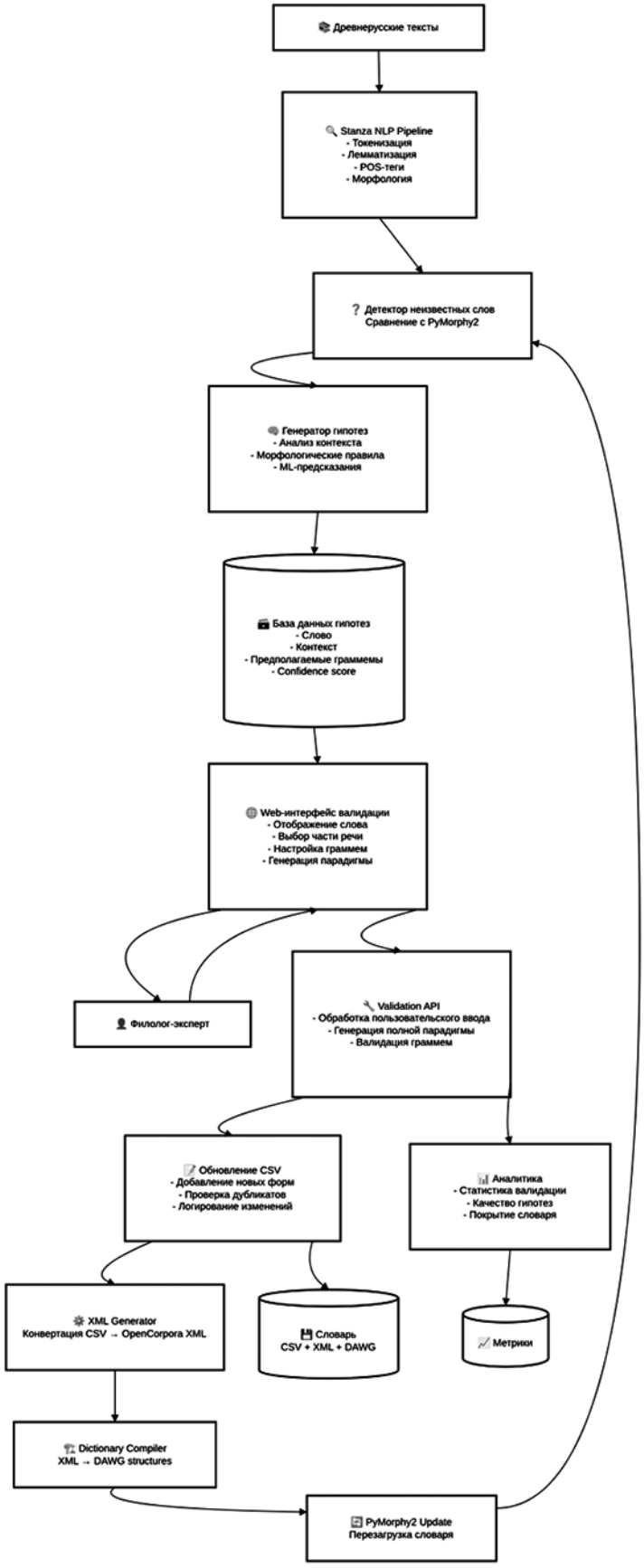


Рис. 3. Система интерактивного расширения морфологического словаря для древнерусского язык

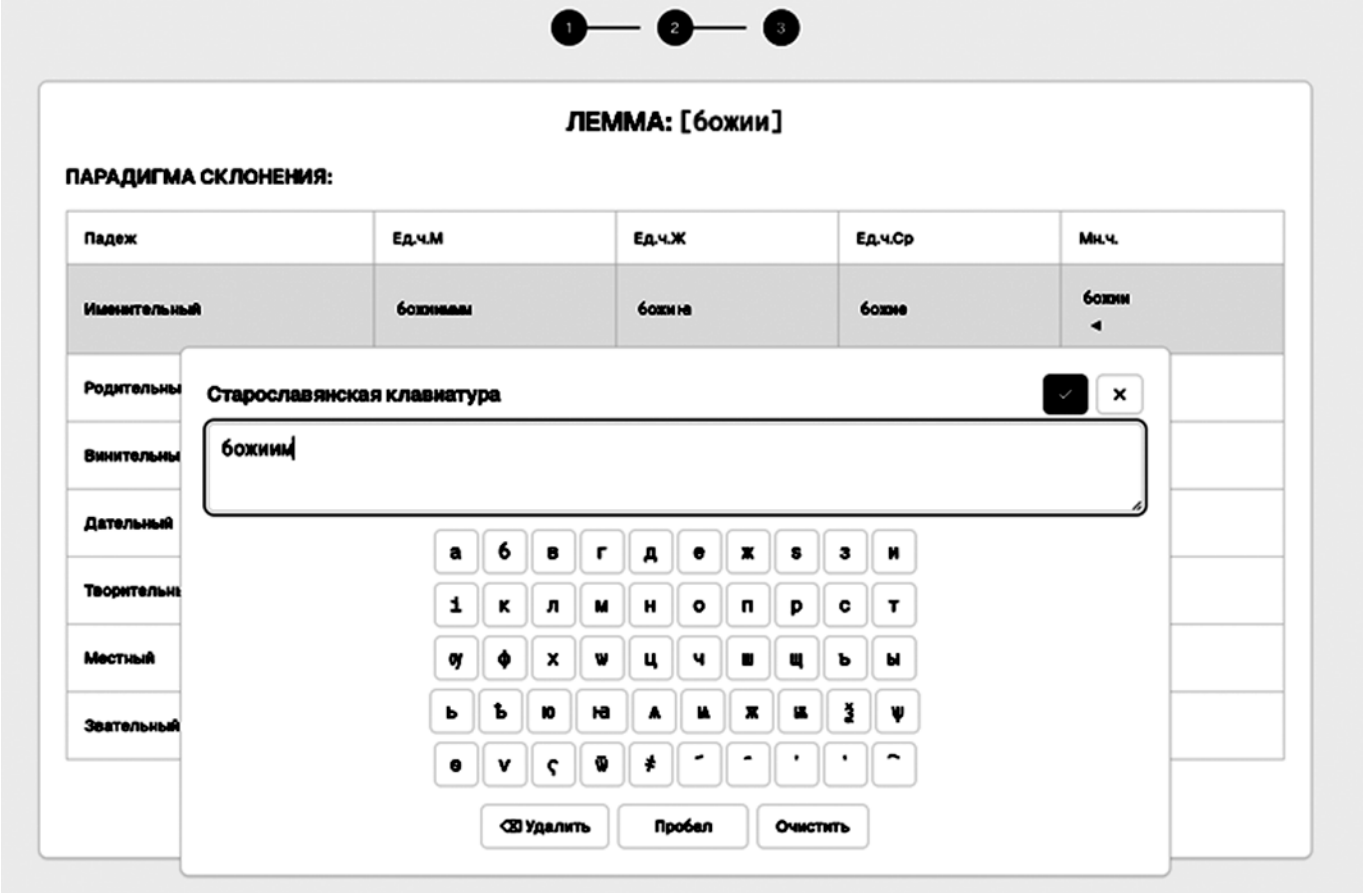


Рис. 4. Прототип интерфейса для филологов

ЛИТЕРАТУРА

1. Жанабекова А., Пірманова К. Частотный словарь языка Абая Кунанбайулы: разработка методологии и ключевые результаты. Вестник КазНПУ имени Абая. Серия: Филологические науки, 2023. Т. 85, № 3. С. 62–70.
2. Cole M., Rayson P., Mariani J. LexiDB: Patterns & Methods for Corpus Linguistic Database Management. // Proceedings of the 12th Language Resources and Evaluation Conference (LREC 2020), Marseille. 11-16 May 2020. С. 3128–3134.
3. Архив журнала Вестник ТГПУ. [Электронный ресурс] // URL: http://vestnik.tspu.edu.ru/archive.html?year=2021&issue=3&article_id=8061 (дата обращения 15.01.2026).
4. Архив журнала Вестник ТГПУ. [Электронный ресурс] // URL: http://vestnik.tspu.edu.ru/archive.html?year=2020&issue=4&article_id=7786 (дата обращения 15.01.2026).
5. Бутенко Ю.И., Солошенко К.А. Лексический тренажер по иностранному языку для студентов технических специальностей МГТУ им. Н.Э. Баумана. // Экономика. Информатика. 2024. Т. 51, № 1. С. 189–200.
6. Portal ACM. [Электронный ресурс] // URL: http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1118647.1118648 (дата обращения 15.01.2026).
7. Unsupervised morphology learning with statistical paradigms. Papers with Code. [Электронный ресурс] // URL: https://paperswithcode.com/paper/unsupervised-morphology-learning-with (дата обращения 15.01.2026).
8. Straka M., Straková J. Open-Source Web Service with Morphological Dictionary–Supplemented Deep Learning for Morphosyntactic Analysis of Czech //International Conference on Text, Speech, and Dialogue. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. С. 279–290.
9. Supriya M. et al. Developing a Hybrid Morphological Analyzer for Low-Resource Languages //Applied Sciences. 2025. Т. 15. №. 10. С. 5682.
10. Беляева Л.Н. Потенциал автоматизированной лексикографии и прикладная лингвистика //Известия Российского государственного педагогического университета им. АИ Герцена. — 2010. — №. 134. С. 70–79.
11. Зеленцов И.А. Автоматизированная система распознавания древнерусских скорописных текстов. Дипломный проект. // М.: 2008. 36 с.
12. Филология БГУ. [Электронный ресурс] // URL: http://journals.bsu.ru/journals/filologiya/?issue=363&article=3659&rus (дата обращения 15.01.2026).
13. Pentheroudakis J., Vanderwende L. Automatically Identifying Morphological Relations in= Machine-Readable Dictionaries //arXiv preprint cmp-lg/9411014. 1994. С. 1–19.
14. Luong M.T., Socher R., Manning C.D. Better word representations with recursive neural networks for morphology //Proceedings of the seventeenth conference on computational natural language learning. 2013. С. 104–113.

15. El Kholy A., Habash N. Rich morphology generation using statistical machine translation //INLG 2012 Proceedings of the Seventh International Natural Language Generation Conference. 2012. С. 90–94.
16. Dušek O., Jurcícek F. Robust multilingual statistical morphological generation models //51st Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics Proceedings of the Student Research Workshop. 2013. С. 158–164.
17. Faruqui M., McDonald R., Soricut R. Morpho-syntactic Lexicon Generation Using Graph-based Semi-supervised Learning. //Transactions of the Association for Computational Linguistics. 2016. Vol. 4. С. 1–16.
18. Kawtrakul A., Thumkanon C.A statistical approach to thai morphological analyzer //Fifth Workshop on Very Large Corpora. 1997. С. 290–296.
19. Lee S. Mastering Morphological Analysis. Number Analytics Blog, May 27, 2025. [Электронный ресурс] // URL: https://www.numberanalytics.com/blog/mastering-morphological-analysis (дата обращения 15.01.2026).
20. Rozhkov Y. Linguocognitive Approach to Extracting Terms from a Corpus of Veterinary Texts //International Journal of Philology. — 2023. — Т. 4. — №. 27. — С. 46–55.
21. IEEE Conference Publication. [Электронный ресурс] // URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/10286646(дата обращения 15.01.2026).
22. Monakhov S., Turchanenko V., Fedyukova E., Cherdakov D. New method of automated terminology extraction: case study of russian-language textbooks // Proceedings of the Future Technologies Conference. Cham: Springer International Publishing, 2021. С. 363–373
23. Smith N. Morphological analysis of historical languages //Bulletin of the Institute of Classical Studies. 2016. Т. 59. №. 2. С. 89–102.
24. Korobov M. Morphological analyzer and generator for Russian and Ukrainian languages //International conference on analysis of images, social networks, and texts. Cham: Springer International Publishing, 2015. С. 320–332.
25. Peng Qi* Yuhao Zhang* Yuhui Zhang Jason Bolton Christopher D. Manning, Stanza: A Python Natural Language Processing Toolkit for Many Human Languages, Stanford University Stanford, CA 94305 [Электронный ресурс] // URL: https://aclanthology.org/2020.acl-demos.14.pdf(дата обращения 15.01.2026).
26. Vissio N.C., Zakharov V.A Disambiguator for Pymorphy2 Morphological Analyzer //IMS. 2021. С. 81–88.

© Клычков Матвей Дмитриевич (utherluminous@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.16

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В СРЕДЕ LOGINOM ДЛЯ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДАННЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА МЕГАПОЛИСА

APPLICATION OF SYSTEM ANALYSIS AND MACHINE LEARNING METHODS IN THE LOGINOM ENVIRONMENT FOR CLUSTERING ENVIRONMENTAL MONITORING DATA OF THE MEGACITY

A. Krynetskaya
V. Trushina

Summary. The paper considers the use of system analysis and machine learning tools implemented in the domestic Loginom analytical platform for the study of environmental monitoring data for atmospheric air in Moscow. The data obtained from the open data portal of the Moscow Government, containing average monthly concentrations of pollutants measured by automatic air pollution control stations, was downloaded, preprocessed, filtered and clustered. The correlation between the concentrations of pollutants and the types of observation zones (highways, residential areas, natural areas, etc.) was estimated. Cluster analysis methods and the Pearson correlation coefficient were used to test the hypothesis that the spatial distribution of pollutants depends on the nature of anthropogenic load. It is shown that the Loginom platform allows you to implement a full cycle of analytical data processing without programming, ensuring reproducibility and visualization of results. The work confirms the possibility of using Russian data mining tools for environmental monitoring tasks.

Keywords: system analysis, machine learning, Loginom, clustering, Pearson correlation, air pollution, environmental monitoring, data processing.

Крынецкая Анастасия Дмитриевна
Ассистент, Российский технологический университет МИРЭА, г. Москва
krynetskaya@mirea.ru
Трушина Вероника Игоревна
Ассистент, Российский технологический университет МИРЭА, г. Москва
trushina_v@mirea.ru

Аннотация. В работе рассматривается применение инструментов системного анализа и машинного обучения, реализованных в отечественной аналитической платформе Loginom, для исследования экологических данных мониторинга атмосферного воздуха города Москвы. Проведена загрузка, предобработка, фильтрация и кластеризация данных, полученных с портала открытых данных Правительства Москвы, содержащих среднемесячные показатели концентраций загрязняющих веществ, измеренных автоматическими станциями контроля загрязнения атмосферы. Оценена корреляция между концентрациями загрязняющих веществ и типами зон наблюдения (автомагистрали, жилые территории, природные территории и др.). Использованы методы кластерного анализа и коэффициент корреляции Пирсона для проверки гипотезы о зависимости пространственного распределения загрязнений от характера антропогенной нагрузки. Показано, что платформа Loginom позволяет реализовать полный цикл аналитической обработки данных без программирования, обеспечивая воспроизводимость и визуализацию результатов. Работа подтверждает возможность применения российских инструментов интеллектуального анализа данных для задач экологического мониторинга.

Ключевые слова: системный анализ, машинное обучение, Loginom, кластеризация, корреляция Пирсона, загрязнение воздуха, экологический мониторинг, обработка данных.

Введение

Современные мегаполисы сталкиваются с комплексной проблемой загрязнения атмосферного воздуха. Интенсивное развитие транспорта, промышленности и коммунального хозяйства приводит к росту концентраций оксидов азота, угарного газа, сероводорода и других веществ, негативно влияющих на здоровье населения и состояние экосистем.

Для выработки эффективных мер управления качеством воздуха необходим системный подход, позволяющий анализировать большие массивы экологических данных.

Системный анализ обеспечивает методологическую основу для исследования сложных взаимосвязанных процессов и принятия решений в условиях неопределённости. В сочетании с методами машинного обучения он позволяет не только выявлять закономерности, но и строить модели прогнозирования состояния среды.

Особую актуальность приобретает применение российских low code-платформ анализа данных, таких как Loginom, которые позволяют проводить статистический и интеллектуальный анализ без написания кода, обеспечивая прозрачность, воспроизводимость и визуализацию этапов обработки.

Целью настоящей работы является разработка и апробация методики кластерного анализа данных экологического мониторинга атмосферного воздуха Москвы в среде Loginom и оценка эффективности методов системного анализа для выявления пространственных закономерностей загрязнения.

Обзор литературы и существующих методов

В последние годы наблюдается рост интереса к применению машинного обучения в задачах экологического анализа. Методы кластеризации активно используются для классификации регионов по уровню загрязнения воздуха [1]. Исследователи применяют алгоритмы k-means [2], DBSCAN [3], иерархическую кластеризацию и метод главных компонент (PCA) для выявления закономерностей между показателями загрязнения и факторами окружающей среды.

Работы показали, что использование комбинированных подходов, включающих корреляционный анализ и машинное обучение, повышает точность прогнозирования концентраций загрязняющих веществ [4–6]. Отечественные исследователи подчёркивают необходимость создания отечественных аналитических инструментов, способных решать задачи Data Mining без привлечения зарубежного ПО [7–9].

Платформа Loginom представляет собой универсальную среду визуального проектирования аналитических процессов [10]. Она объединяет средства импорта данных, статистического анализа, машинного обучения и визуализации. Применение Loginom в экологических задачах описано в отдельных кейсах, однако систематические исследования её потенциала для анализа экологических данных пока ограничены.

Таким образом, настоящая работа восполняет этот пробел, демонстрируя практическое использование Loginom в рамках методологии системного анализа.

Источник данных и структура набора

Для анализа использовались данные с Портала открытых данных Правительства Москвы, содержащие среднемесячные показатели концентраций загрязняющих веществ, измеренные автоматическими станциями контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) [11].

Каждая запись включает:

- дату измерения;
- тип зоны наблюдения (автомагистраль, жилая территория, природная зона, промышленная зона, Новая Москва и др.);
- значения концентраций загрязняющих веществ: оксид углерода (CO), диоксид азота (NO_2), оксид азота (NO), сероводород (H_2S), аммиак (NH_3), сернистый ангидрид (SO_2), взвешенные частицы (PM_{10}, $PM_{2.5}$) и др.

Набор данных охватывает более 35 000 записей, полученных в течение нескольких месяцев с различных станций мониторинга. Часть данных представлена на рисунке 1.

Импорт и предобработка

Импорт данных осуществляется через компонент «Узел импорта», позволяющий выбрать Excel-файл и определить схему таблицы.

Далее используется компонент «Калькулятор» для преобразования формата дат и замены символов десятичных знаков (Рисунок 2).

Для удобства анализа столбцы переименовываются в компоненте «Параметры полей». После этого выполняется очистка данных — удаление или заполнение пропусков.

Фильтрация и заполнение пропусков

Рассмотрены два подхода:

1. Удаление строк с пропусками.
2. Заполнение пропусков медианными, средними или наиболее вероятными значениями с помощью компонента «Заполнение пропусков».

Условие фильтрации: строка не должна содержать пустых значений в ключевых полях (Рисунок 3). После фильтрации из 35 522 записей осталось 20 229 (Рисунок 4).

Кластеризация данных

Для анализа закономерностей применён компонент «Кластеризация». Использовался алгоритм k-means, реализованный в Loginom [12]. Количество кластеров k выбиралось на основе метода локтя (Elbow Method), при котором анализируется зависимость внутрикластерной суммы квадратов $W(k)$ от числа кластеров:

$$W(k) = \sum_{i=1}^{k} \sum_{x \in C_i} \| x - \mu_i \|,$$

где C_i — кластер, μ_i — его центр.

Оптимальным считается значение k, при котором дальнейшее увеличение числа кластеров не приводит к существенному снижению $W(k)$.

Оценка качества кластеризации

Для оценки применялись два подхода:

№	Период измерения	Название станции	Характеристика зоны наблюдения	Адресный ориентир	Измеряемый параметр	Среднее значение в абсолютных единицах	Среднее значение в долях ПДКсс
1	02.2016	Лосиный остров	Природные территории	улица Ротерта, дом 4, строение 5	Оксид углерода	0.19	0.06
2	02.2016	Глебовская	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Глебовская улица, дом 3, корпус 1	Оксид углерода	0.32	0.11
3	02.2016	Глебовская	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Глебовская улица, дом 3, корпус 1	Сероводород	0.001	
4	02.2016	Глебовская	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Глебовская улица, дом 3, корпус 1	Оксид азота	0.014	0.23
5	02.2016	Глебовская	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Глебовская улица, дом 3, корпус 1	Диоксид азота	0.024	0.59
6	02.2016	Кожухово	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Лухмановская улица, дом 34	Сумма углеводородных соединений за вычетом метана	0.12	
7	02.2016	Кожухово	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Лухмановская улица, дом 34	Сумма углеводородных соединений	1.7	
8	02.2016	Кожухово	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Лухмановская улица, дом 34	Метан	1.58	
9	02.2016	Кожухово	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Лухмановская улица, дом 34	Оксид углерода	0.22	0.07
10	02.2016	Кожухово	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Лухмановская улица, дом 34	Сероводород	0.0007	

Рис. 1. Пример данных

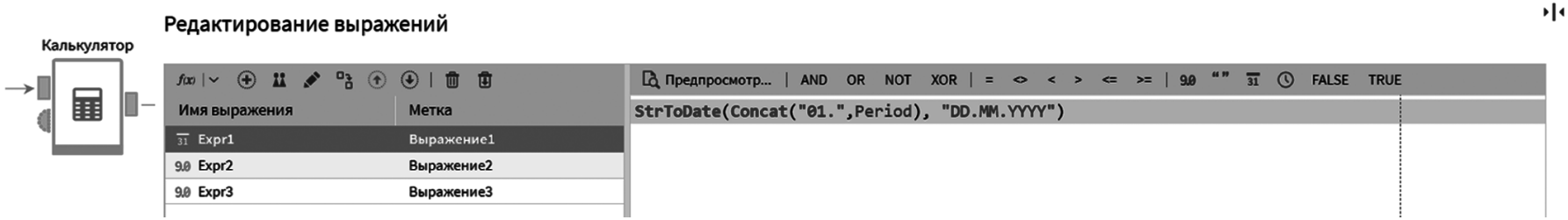
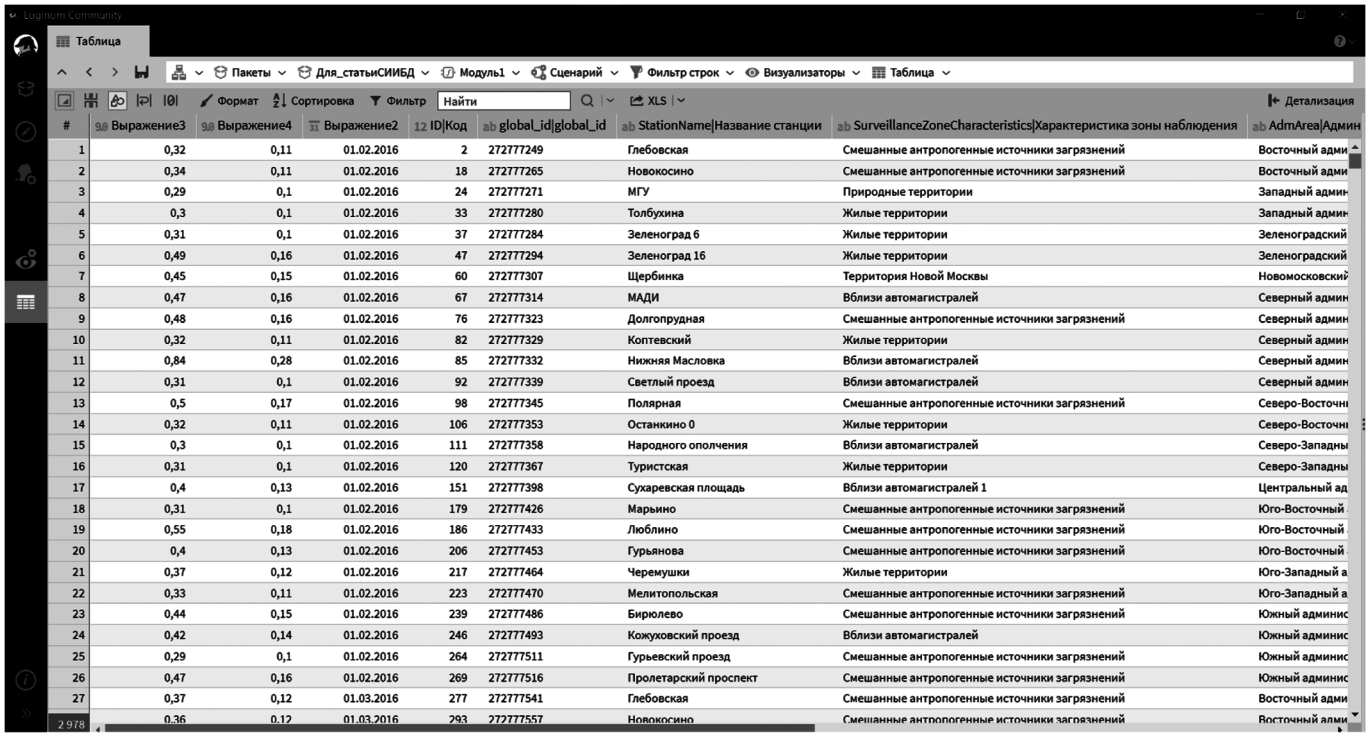


Рис. 2. Компонент «Калькулятор» и редактирование выражений



Рис. 3. Фильтрация данных по портам



Таблица

Пакеты · Для_статьиСИИБД · Модуль1 · Сценарий · Фильтр строк · Визуализаторы · Таблица

Формат · Сортировка · Фильтр · Найти · XLS · Детализация

#	Выражение3	Выражение4	Выражение2	ID|Код	global_id|global_id	StationName|Название станции	SurveillanceZoneCharacteristics|Характеристика зоны наблюдения	AdmArea|Админ
1	0,32	0,11	01.02.2016	2	272777249	Глебовская	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Восточный адми
2	0,34	0,11	01.02.2016	18	272777265	Новокосино	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Восточный адми
3	0,29	0,1	01.02.2016	24	272777271	МГУ	Природные территории	Западный админ
4	0,3	0,1	01.02.2016	33	272777280	Толбухина	Жилые территории	Западный админ
5	0,31	0,1	01.02.2016	37	272777284	Зеленоград 6	Жилые территории	Зеленоградский
6	0,49	0,16	01.02.2016	47	272777294	Зеленоград 16	Жилые территории	Зеленоградский
7	0,45	0,15	01.02.2016	60	272777307	Щербинка	Территория Новой Москвы	Новомосковский
8	0,47	0,16	01.02.2016	67	272777314	МАДИ	Вблизи автомагистралей	Северный админ
9	0,48	0,16	01.02.2016	76	272777323	Долгопрудная	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Северный админ
10	0,32	0,11	01.02.2016	82	272777329	Коптевский	Жилые территории	Северный админ
11	0,84	0,28	01.02.2016	85	272777332	Нижняя Масловка	Вблизи автомагистралей	Северный админ
12	0,31	0,1	01.02.2016	92	272777339	Светлый проезд	Вблизи автомагистралей	Северный админ
13	0,5	0,17	01.02.2016	98	272777345	Полярная	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Северо-Восточн
14	0,32	0,11	01.02.2016	106	272777353	Останкино 0	Жилые территории	Северо-Восточн
15	0,3	0,1	01.02.2016	111	272777358	Народного ополчения	Вблизи автомагистралей	Северо-Западны
16	0,31	0,1	01.02.2016	120	272777367	Туристская	Жилые территории	Северо-Западны
17	0,4	0,13	01.02.2016	151	272777398	Сухаревская площадь	Вблизи автомагистралей 1	Центральный ад
18	0,31	0,1	01.02.2016	179	272777426	Марьино	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Юго-Восточный
19	0,55	0,18	01.02.2016	186	272777433	Люблино	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Юго-Восточный
20	0,4	0,13	01.02.2016	206	272777453	Гурьянова	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Юго-Восточный
21	0,37	0,12	01.02.2016	217	272777464	Черемушки	Жилые территории	Юго-Западный а
22	0,33	0,11	01.02.2016	223	272777470	Мелитопольская	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Юго-Западный а
23	0,44	0,15	01.02.2016	239	272777486	Бирюлево	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Южный администр
24	0,42	0,14	01.02.2016	246	272777493	Кожуховский проезд	Вблизи автомагистралей	Южный администр
25	0,29	0,1	01.02.2016	264	272777511	Гурьевский проезд	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Южный администр
26	0,47	0,16	01.02.2016	269	272777516	Пролетарский проспект	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Южный администр
27	0,37	0,12	01.03.2016	277	272777541	Глебовская	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Восточный адми
2 978	0,36	0,12	01.03.2016	293	272777557	Новокосино	Смешанные антропогенные источники загрязнений	Восточный адми

Рис. 4. Таблица с очищенными данными



№	Метка	Доля	Итого
5	Смешанные антро…		7183
3	Жилые территории		5116
1	Вблизи автомагис…		5052
7	Территория Ново…		1915
4	Природные терри…		766
2	Вблизи автомагис…		168
6	Специальная		29

Рис. 5. Распределение кластеров по характеристикам зон наблюдений

- коэффициент корреляции Пирсона между концентрациями веществ и типами зон наблюдения;
- индекс силуэта S, характеризующий качество разбиения:

$$S = \frac{b - a}{\max(a,b)},$$

где a — среднее внутрикластерное расстояние, b — минимальное расстояние до ближайшего кластера.

Коэффициент Пирсона рассчитывается по формуле:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)\left(y_i - \bar{y}\right)}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2\right)\left(\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \bar{y}\right)^2\right)}}.$$

Результаты анализа

В Таблице 1 представлено сравнение способов обработки пропусков.

Таблица 1.

Таблица корреляционного анализа

Метод	Кол-во записей	Средний r (Пирсон)	Комментарий
Удаление строк	20 229	0,53	Связь слабая, но прослеживается зависимость между зонами и концентрациями
Заполнение средними	35 522	0,44	Снижение силы связи, вероятно из-за усреднения данных

Слабая, но статистически значимая корреляция указывает на существование пространственной зависимости загрязнений от типа зоны.

Пространственное распределение загрязнений

Кластеризация выделила 4 основных кластера, примерно соответствующих:

- зонам с высокой транспортной нагрузкой;
- промышленным зонам;
- жилым районам;
- природным и пригородным территориям.

Наибольшие значения концентраций CO и NO_2 наблюдаются в кластере 1, соответствующем автомаги-

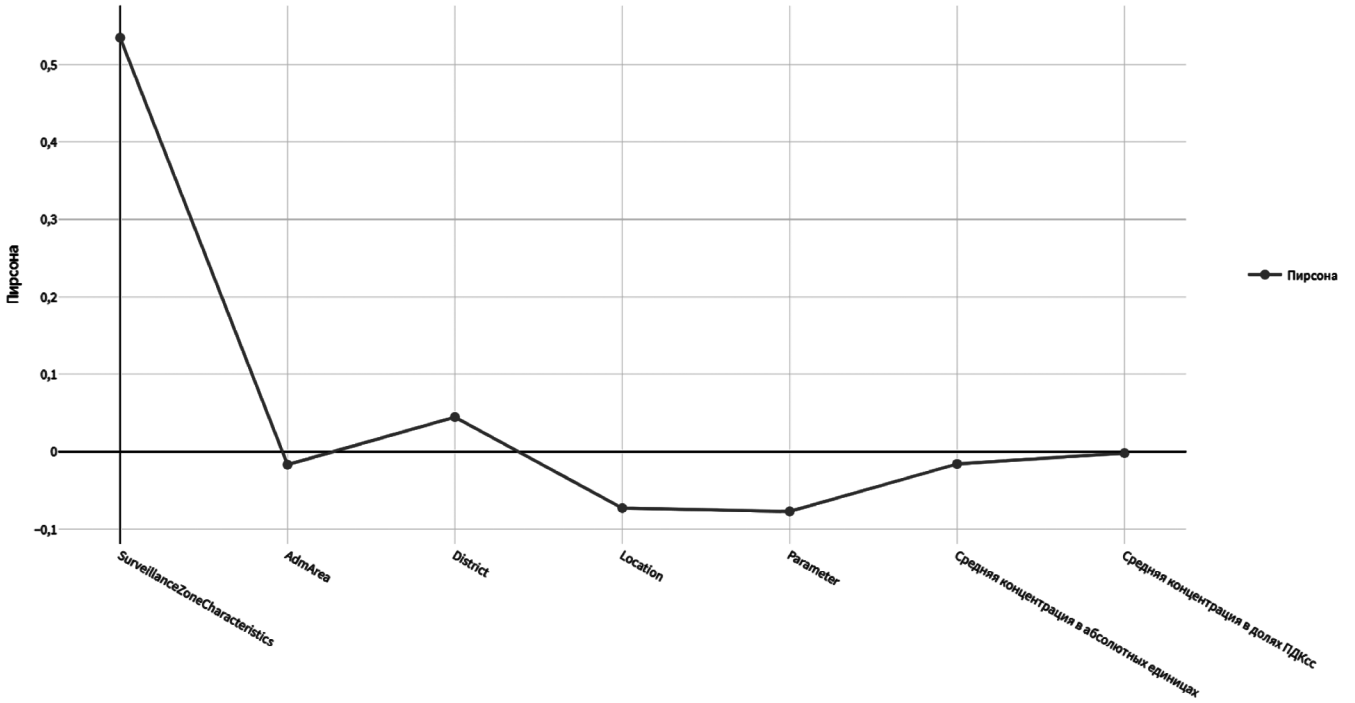


Рис. 6. Диаграмма распределения кластеров

стралям. В кластере 4 концентрации минимальны, что подтверждает адекватность модели.

Обсуждение результатов

Полученные результаты подтверждают, что даже при слабой линейной корреляции между параметрами, алгоритмы машинного обучения способны выявлять значимые закономерности.

Коэффициент Пирсона 0,53 свидетельствует о наличии умеренной зависимости между типом зоны и уровнем загрязнения, что объясняется влиянием метеоусловий, сезонности и различий в количестве измерений по станциям. При заполнении пропусков медианными значениями наблюдается снижение корреляции, так как уменьшается дисперсия выборки.

Применение Loginom позволило реализовать полный аналитический цикл — от импорта до визуализации — в графической форме, что делает процесс воспроизводимым и доступным для специалистов без опыта программирования.

Использование системного подхода позволило рассмотреть процесс мониторинга как совокупность взаимосвязанных подсистем: источник данных, процесс измерения, метод анализа и управленческие решения. Это соответствует принципам системного анализа, где каждая подсистема имеет входы, выходы и связи с другими элементами.

Заключение

В ходе исследования реализована методика анализа данных экологического мониторинга в среде Loginom.

Основные результаты:

1. Разработан алгоритм загрузки, предобработки и кластеризации данных мониторинга атмосферного воздуха.
2. Выявлено четыре кластера, отражающих пространственные различия загрязнения.
3. Коэффициент корреляции Пирсона между зонами наблюдений и концентрациями веществ составил 0,53, что подтверждает наличие зависимости.
4. Показано, что использование Loginom обеспечивает удобство визуализации и позволяет воспроизводить аналитические сценарии.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования предложенного подхода для оперативного анализа и классификации зон по уровню загрязнения, что способствует повышению эффективности систем экологического мониторинга.

В дальнейшем планируется:

- использовать временные ряды для анализа динамики загрязнений;
- применять методы прогнозирования (регрессия, нейронные сети);
- интегрировать результаты в систему поддержки принятия решений по управлению качеством воздуха.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садовникова Н.А. Кластеризация регионов по масштабам загрязнения атмосферного воздуха / Н.А. Садовникова // Повышение открытости отечественной статистики: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной профессиональному празднику — Дню работника статистики, Москва, 24 июня 2016 года / Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Федеральная служба государственной статистики. — Москва: Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, 2016. — С. 154–158. — EDN WALDZX.
2. Aliguliyev R. Performance comparison of K-means, parallel K-means, and K-means++ / R. Aliguliyev, Sh. F. Tahirzada // Reliability: Theory & Applications. — 2025. — Vol. 20, No. S7(83). — P. 169–176. — DOI 10.24412/1932–2321-2025-783-169-176. — EDN DBQWCO.
3. Correlation Analysis of PMS Data of Incheon Using DBSCAN Clustering / S.H. Lee, Ja.H. Lee, Ye.T. Kim, J.H. Jeong // International Journal of Highway Engineering. — 2022. — Vol. 24, No. 6. — P. 181–188. — DOI 10.7855/ijhe.2022.24.6.181. — EDN GHAJBH.
4. Зупарова В.В. Прогноз динамики загрязнения воздуха с использованием машинного обучения / В.В. Зупарова // Интеллектуальный потенциал России 2025 : Сборник статей по итогам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Калуга, 04 августа 2025 года. — Стерлитамак: ООО «Агентство международных исследований», 2025. — С. 71–73. — EDN QWXPUP.
5. Ведерникова С.Д. Использование методов машинного обучения для прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха / С.Д. Ведерникова // Современные проблемы географии и геоэкологии: сборник научных статей. — Смоленск: Смоленский государственный университет, 2024. — С. 5–11. — EDN HYTXHL.
6. Прогнозирование уровня загрязнения воздуха при помощи машинного обучения / А.И. Суслов, М.А. Криницкий, Ш. Стаке, С.А. Алымкулов // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. — 2022. — № 4(64). — С. 490–498. — DOI 10.56634/16948335.2022.4.490-498. — EDN ZNWEUJ.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661079 Российская Федерация. Программа прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха на основе методов машинного обучения: № 2022660029: заявл. 01.06.2022: опубл. 15.06.2022 / А.А. Толстых, А.И. Ситников, В.А. Никитенко. — EDN DWXDVP.
8. Капленкова П.А. Предсказывание загрязнения атмосферного воздуха с помощью машинного обучения и PySpark / П.А. Капленкова, А.Н. Сивова // Наука и бизнес: пути развития. — 2020. — № 10(112). — С. 54–56. — EDN LTZEYE.
9. Тазиева Я.Р. Использование методов машинного обучения для прогнозирования уровня загрязнения воздуха / Я.Р. Тазиева // Устойчивое развитие науки и образования. — 2020. — № 3(42). — С. 93–97. — EDN UTOINH.
10. Колесников А.А. Loginom: основные возможности / А.А. Колесников, С.В. Пальмов // Форум молодых ученых. — 2018. — № 10(26). — С. 582–587. — EDN YVSMKL.
11. Правительство Москвы. Данные автоматических станций контроля загрязнения атмосферного воздуха [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://data.mos.ru/opendata/2453 (дата обращения: 01.10.2025).
12. Яковлев А.В. Оценка качества кластеризации данных с использованием алгоритмов «k-средних», «g-средних» и «EM» / А.В. Яковлев, А.А. Мазниченко, М.О. Кожанчиков // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей LVIII Международной научно-практической конференции, Пенза, 27 июля 2022 года. — Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2022. — С. 111–115. — EDN JYIDOA.

© Крынецкая Анастасия Дмитриевна (krynetskaya@mirea.ru); Трушина Вероника Игоревна (trushina_v@mirea.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.19

АУДИТ ЗАЩИЩЕННОСТИ ФИНАНСОВО-КРИТИЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ НА ОСНОВЕ OSINT-ТЕХНОЛОГИИ

FINANCIALLY CRITICAL ORGANIZATIONS' SECURITY AUDIT BASED ON OSINT-TECHNOLOGY

V. Kuchmin
I. Krepak

Summary. The article addresses the problem of information security vulnerability auditing in financially critical organizations under conditions of high digital openness and continuous expansion of the external information perimeter. The relevance of using open-source intelligence (OSINT) technology as a tool for preliminary security assessment based on passive analysis of information available from open and legal sources is substantiated. It is shown that the results of OSINT analysis make it possible to identify risk factors formed at the level of the external information environment prior to the implementation of active threats.
The paper proposes a formalized methodology for OSINT-based auditing of the external information perimeter, including a sequence of stages with defined input and output parameters that ensure the reproducibility of analytical results. To demonstrate the practical applicability of the proposed methodology, a conditional example of a financially critical organization is considered, involving qualitative risk factor assessment and interpretation of the obtained data. The limitations and scope of applicability of OSINT auditing within the information security framework are determined. The results obtained can be used in threat modeling, planning information security risk management measures, and improving the maturity of external perimeter protection processes.

Keywords: vulnerability audit, OSINT, financially critical organizations, external information perimeter, risk management, digital footprint, threat model, passive analysis methods, open-source information.

Кучмин Владислав Константинович
ведущий специалист, ФГБОУ ДПО Российская Академия Кадрового Обеспечения Агропромышленный комплекс;
аспирант, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва
severov.14@bk.ru
Крепак Иван Павлович
руководитель группы информационной безопасности, ООО Клиника Будь Здоров;
аспирант, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва
krepak.2311@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема аудита уязвимостей информационной безопасности финансово-критичных организаций в условиях высокой цифровой открытости и постоянного расширения внешнего информационного периметра. Обосновывается целесообразность использования технологии разведки по открытым источникам (OSINT) в качестве инструмента предварительной оценки защищённости, основанного на пассивном анализе информации, доступной в открытых и легальных источниках. Показано, что результаты OSINT-анализа позволяют выявлять факторы риска, формируемые на уровне внешнего информационного пространства, до реализации активных угроз.
В работе предлагается формализованная методика OSINT-аудита внешнего информационного периметра, включающая последовательность этапов с определёнными входными и выходными параметрами, обеспечивающими воспроизводимость аналитических результатов. Для демонстрации практической применимости методики рассмотрен условный пример финансово-критичной организации с выполнением качественной оценки факторов риска и интерпретацией полученных данных. Определены ограничения и область применимости OSINT-аудита в системе обеспечения информационной безопасности. Полученные результаты могут быть использованы при построении модели угроз, планировании мероприятий по управлению рисками информационной безопасности и повышении зрелости процессов защиты внешнего периметра.

Ключевые слова: аудит уязвимостей, OSINT, финансово-критичные организации, внешний информационный периметр, управление рисками, цифровой след, модель угроз, пассивные методы анализа, открытые источники информации.

Введение

В условиях цифровизации финансово-экономических процессов и активного развития информационных технологий существенно возрастают риски, связанные с нарушением информационной безопасности организаций, осуществляющих обработку персональных и финансово значимых данных. Финансово-критичные организации характеризуются высокой степенью зависимости основных бизнес-процессов от устойчивого функционирования информационных систем, что обусловливает повышенные требования к уровню их защищённости.

Современные финансово-критичные организации активно взаимодействуют с внешней цифровой средой, используя публичные веб-ресурсы, сетевые сервисы, облачные платформы и электронные каналы коммуни-

кации. В результате формируется развитый внешний информационный периметр, значительная часть элементов которого становится доступной для анализа в открытых источниках. Данные сведения могут использоваться как потенциальными нарушителями при подготовке целевых атак, так и специалистами по информационной безопасности в целях выявления факторов риска и повышения уровня защищённости.

В этой связи особую актуальность приобретает использование технологий разведки по открытым источникам (OSINT) в задачах аудита уязвимостей информационной безопасности. В отличие от активных методов оценки защищённости, основанных на тестировании на проникновение, OSINT-подходы позволяют осуществлять анализ внешнего информационного периметра без непосредственного воздействия на информационные системы и без нарушения требований законодательства.

Несмотря на широкое применение OSINT в сфере конкурентной разведки и мониторинга угроз, вопросы его формализованного использования в задачах аудита уязвимостей информационной безопасности финансово-критичных организаций остаются недостаточно разработанными. В большинстве случаев OSINT используется фрагментарно, без чёткой методики и воспроизводимой структуры анализа. Это обусловливает необходимость разработки и обоснования методического подхода к проведению OSINT-аудита как самостоятельного этапа оценки защищённости внешнего периметра.

Целью настоящей статьи является разработка и формализация методики аудита уязвимостей информационной безопасности финансово-критичных организаций на основе технологии OSINT, а также определение области её применимости и ограничений.

Аудит уязвимостей информационной безопасности как подход управления рисками

Аудит уязвимостей информационной безопасности является одной из ключевых процедур в системе управления рисками финансово-критичных организаций. Его основная задача заключается в выявлении потенциальных слабых мест информационной инфраструктуры, которые могут быть использованы для реализации угроз нарушения конфиденциальности, целостности и доступности информации.

В отличие от общего аудита информационной безопасности, ориентированного на проверку соответствия нормативным требованиям и внутренним регламентам, аудит уязвимостей фокусируется на анализе конкретных факторов риска, связанных с архитектурой информационных систем, конфигурацией сетевых сервисов и особенностями эксплуатации цифровых активов. Для финансово-критичных организаций данный вид аудита имеет особое значение [1, 2], поскольку последствия реализации уязвимостей могут приводить к существенным финансовым, правовым и репутационным потерям.

Традиционные подходы к аудиту уязвимостей включают документарный анализ, инструментальный технический аудит, автоматизированное сканирование и тестирование на проникновение. Однако применение активных методов оценки защищённости в финансово-критичных информационных системах часто ограничено организационными и правовыми факторами [3]. Кроме того, указанные методы преимущественно ориентированы на внутренний контур безопасности и не в полной мере учитывают риски, формируемые за пределами контролируемой инфраструктуры [4].

В условиях высокой информационной открытости финансово-критичных организаций существенная часть угроз формируется на уровне внешнего информационного периметра, включающего публичные веб-ресурсы, сетевые сервисы и цифровой след организации в открытых источниках. Анализ данных факторов требует применения методов, ориентированных на пассивный сбор и интерпретацию информации, что обусловливает целесообразность использования технологии OSINT в задачах аудита уязвимостей.

OSINT-технология в задачах обеспечения информационной безопасности финансово-критичных организаций

Технология разведки по открытым источникам представляет собой совокупность методов и инструментов сбора, обработки и анализа информации, находящейся в свободном и легальном доступе. В отличие от закрытых разведывательных и аналитических методов, OSINT основывается исключительно на использовании общедоступных источников информации, что обеспечивает его правовую корректность и возможность применения в деятельности организаций без нарушения требований законодательства [5, 6].

В задачах обеспечения информационной безопасности OSINT используется для анализа внешнего информационного пространства, в котором функционирует организация, а также для выявления и интерпретации её цифрового следа. Под цифровым следом в данном контексте понимается совокупность сведений о доменных ресурсах, сетевой инфраструктуре, используемых технологиях и параметрах конфигурации публичных сервисов, которые могут быть получены из открытых источников без прямого взаимодействия с информационными системами [7, 8].

Для финансово-критичных организаций применение технологии OSINT приобретает особую значимость. Такие организации обрабатывают персональные и финансово значимые данные, а их информационные системы напрямую влияют на устойчивость ключевых бизнес-процессов. При этом, высокая степень цифровой открытости, обусловленная необходимостью публичного взаимодействия с клиентами, партнёрами и государственными структурами, неизбежно приводит к формированию расширенного внешнего информационного периметра. Значительная часть сведений об этом периметре становится доступной в сети Интернет и может использоваться как потенциальными нарушителями, так и специалистами по информационной безопасности.

С методологической точки зрения OSINT в системе обеспечения информационной безопасности целесообразно рассматривать как инструмент предварительного аналитического уровня. Его применение позволяет выявлять потенциальные факторы риска до реализации активных угроз и тем самым дополняет традиционные методы защиты информации. В отличие от средств мониторинга и реагирования, ориентированных на уже произошедшие инциденты, OSINT-подходы направлены на выявление предпосылок возникновения угроз, связанных с избыточной информационной открытостью и архитектурными особенностями внешнего периметра.

Источники OSINT-информации, используемые в задачах информационной безопасности, могут быть условно классифицированы по характеру получаемых данных. К техническим источникам относятся реестры доменных имён, базы данных распределения IP-адресов и автономных систем, а также специализированные поисковые системы сетевых сервисов. Они позволяют получать сведения о сетевой инфраструктуре, доступных протоколах и используемых технологиях. К организационным источникам относятся официальные веб-ресурсы организаций, публикации в государственных реестрах и отчётные материалы, содержащие сведения о структуре и направлениях деятельности. Информационные источники включают средства массовой информации, научные публикации и иные открытые материалы, формирующие контекст функционирования организации в цифровой среде.

Использование указанных источников в совокупности позволяет сформировать целостное представление о внешнем информационном периметре финансово-критичной организации. При этом ключевым преимуществом OSINT является его пассивный характер. Анализ осуществляется на основе уже существующих данных и не предполагает выполнения активных сетевых запросов, сканирования или эксплуатации уязвимостей. Это делает OSINT-подходы особенно актуальными в условиях, когда проведение активных проверок ограничено требованиями регуляторов, внутренними политиками безопасности или необходимостью обеспечения бесперебойной работы информационных систем.

Следует отметить, что в практике обеспечения информационной безопасности технология OSINT часто используется фрагментарно — в виде отдельных инструментов или разрозненных аналитических процедур. Такой подход не позволяет в полной мере реализовать потенциал анализа открытых источников и приводит к снижению воспроизводимости результатов. В этой связи представляется целесообразным рассматривать OSINT не как вспомогательный инструмент, а как основу для формализованного метода аудита уязвимостей внешнего периметра.

Таким образом, технология OSINT занимает промежуточное положение между нормативно-ориентированным аудитом информационной безопасности и активными методами оценки защищённости. Она обеспечивает аналитическую связь между внешним информационным пространством и внутренними механизмами управления информационной безопасностью, позволяя выявлять потенциальные угрозы на ранних этапах и формировать обоснованные управленческие решения. Интеграция OSINT в систему методов обеспечения информационной безопасности финансово-критичных организаций создаёт предпосылки для повышения зрелости процессов управления рисками и снижения вероятности реализации целевых атак.

OSINT-аудит как метод предварительной оценки защищённости внешнего периметра

В современных условиях обеспечения информационной безопасности финансово-критичных организаций особую значимость приобретает необходимость раннего выявления факторов риска, формируемых на уровне внешнего информационного периметра. Традиционные методы оценки защищённости, как правило, ориентированы на анализ внутренних компонентов информационных систем либо предполагают активное воздействие на инфраструктуру объекта исследования. В этой связи целесообразно выделение OSINT-аудита в качестве самостоятельного метода предварительной оценки защищённости, основанного на пассивном анализе открытых источников информации.

Под OSINT-аудитом уязвимостей информационной безопасности предлагается понимать формализованный аналитический процесс выявления и интерпретации факторов риска внешнего информационного периметра организации на основе информации, получаемой из открытых и легальных источников. В отличие от классического аудита информационной безопасности, направленного на проверку соответствия установленным требовани-

ям и регламентам, OSINT-аудит ориентирован на анализ фактической информационной открытости и архитектурных особенностей публичной инфраструктуры.

Ключевой методологической особенностью OSINT-аудита является его предварительный характер. Результаты такого анализа не предназначены для непосредственного выявления эксплуатируемых уязвимостей, а используются для формирования исходных данных при построении модели угроз и определении приоритетных направлений дальнейших защитных мероприятий. Таким образом, OSINT-аудит дополняет существующие методы оценки защищённости, обеспечивая переход от реактивной модели защиты к проактивному управлению рисками.

В отличие от тестирования на проникновение, которое предполагает активное моделирование действий потенциального нарушителя и может сопровождаться рисками нарушения доступности информационных систем, OSINT-аудит не оказывает прямого воздействия на объект исследования [9]. Это делает его особенно актуальным для финансово-критичных организаций, функционирование которых регламентировано строгими требованиями по обеспечению непрерывности бизнес-процессов и соблюдению нормативных ограничений. Кроме того, OSINT-аудит может проводиться на регулярной основе без привлечения значительных ресурсов и без необходимости согласования сложных процедур доступа.

Сравнительный анализ OSINT-аудита и традиционных методов оценки защищённости позволяет определить его место в системе обеспечения информационной безопасности. Если классический аудит ориентирован на внутренние процессы и нормативное соответствие, а тестирование на проникновение — на выявление технических уязвимостей путём активного воздействия, то OSINT-аудит фокусируется на анализе внешнего информационного пространства и факторов риска, связанных с цифровым следом организации. В этом смысле OSINT-аудит следует рассматривать как связующее звено между стратегическим управлением рисками и техническими средствами защиты информации.

С методической точки зрения OSINT-аудит характеризуется высокой воспроизводимостью результатов при условии формализации этапов анализа и критериев оценки. Использование структурированного подхода к сбору и интерпретации данных позволяет минимизировать субъективность выводов и обеспечивает возможность повторного проведения анализа в динамике. Это особенно важно для финансово-критичных организаций, для которых характерны частые изменения внешнего периметра, связанные с развитием цифровых сервисов и интеграцией новых информационных решений.

Следует отметить, что OSINT-аудит не является универсальным методом оценки защищённости и имеет ряд ограничений. Его применение не позволяет выявлять уязвимости, скрытые во внутреннем контуре информационных систем, а также оценивать корректность реализации механизмов аутентификации, авторизации и контроля доступа. Вместе с тем результаты OSINT-аудита обладают высокой практической ценностью на этапе планирования мероприятий по обеспечению информационной безопасности, поскольку позволяют обоснованно определять необходимость и глубину применения активных методов оценки защищённости.

Таким образом, OSINT-аудит уязвимостей информационной безопасности представляет собой самостоятельный метод предварительной оценки защищённости внешнего периметра финансово-критичных организаций, ориентированный на выявление факторов риска и формирование исходных данных для построения модели угроз. Его использование способствует повышению зрелости процессов управления информационной безопасностью и снижению вероятности реализации целевых атак за счёт своевременного выявления потенциально опасных зон внешнего информационного пространства.

Формализация методики OSINT-аудита внешнего периметра

Для обеспечения воспроизводимости результатов и снижения субъективности аналитических выводов OSINT-аудит уязвимостей информационной безопасности должен быть реализован в виде формализованной методики, основанной на последовательном выполнении взаимосвязанных этапов анализа. Формализация методики позволяет рассматривать OSINT-аудит не как совокупность разрозненных действий, а как структурированный процесс, интегрируемый в систему управления информационной безопасностью финансово-критичной организации.

Предлагаемая методика OSINT-аудита ориентирована на анализ внешнего информационного периметра и включает шесть основных этапов, каждый из которых характеризуется определёнными входными данными, методами анализа и выходными результатами [10, 11]. Такая декомпозиция обеспечивает прозрачность процедуры аудита и возможность её повторного применения в динамике.

На первом этапе осуществляется идентификация объекта и границ OSINT-аудита. В качестве входных данных используются общие сведения об организации, включая официальное наименование, используемые доменные зоны и публично декларируемые направления деятельности. Целью данного этапа является опре-

деление границ анализа и формирование первичного перечня цифровых активов, относящихся к внешнему периметру. Результатом этапа является уточнённый список объектов дальнейшего анализа, исключающий нерелевантные или сторонние ресурсы.

Второй этап посвящён анализу доменной структуры внешнего периметра. В рамках данного этапа осуществляется выявление доменных имён и поддоменов, ассоциированных с анализируемой организацией. Входными данными служат результаты предыдущего этапа, а также сведения из открытых доменных реестров и специализированных поисковых инструментов. Выходным результатом является структурированный перечень доменных ресурсов, отражающий степень разветвлённости внешнего периметра и потенциальное расширение поверхности атаки.

На третьем этапе проводится анализ IP-адресного пространства и сетевой принадлежности выявленных ресурсов. В качестве входных данных используются доменные имена, полученные на предыдущем этапе, и информация из открытых баз данных распределения IP-адресов и автономных систем. Целью данного этапа является выявление публичных сетевых диапазонов, используемых организацией, а также определение их принадлежности. Результатом является перечень IP-адресов и сетевых диапазонов, формирующих сетевую составляющую внешнего периметра.

Четвёртый этап ориентирован на анализ доступных сетевых сервисов и используемых протоколов. Входными данными служат IP-адреса и доменные ресурсы, полученные на предыдущих этапах. На данном этапе выявляются публично доступные сервисы, их назначение и базовые параметры конфигурации. Результаты этапа позволяют оценить уровень экспонирования инфраструктурных компонентов и определить потенциально уязвимые зоны внешнего периметра [13, 14].

Пятый этап включает анализ параметров защиты публичных сервисов, в том числе характеристик защищённых соединений и используемых криптографических механизмов. В качестве входных данных используются сведения о сетевых сервисах и протоколах, а также информация, доступная в открытых источниках о параметрах TLS/SSL-соединений. Выходными результатами этапа являются качественные характеристики применяемых механизмов защиты, позволяющие судить об уровне базовой криптографической устойчивости внешнего периметра.

Заключительный этап методики направлен на обобщение и интерпретацию полученных результатов. На данном этапе осуществляется систематизация данных, выявленных на предыдущих стадиях, и формирование аналитических выводов. Результаты OSINT-аудита используются для предварительной классификации факторов риска, уточнения модели угроз и определения приоритетов дальнейших мероприятий по обеспечению информационной безопасности [12]. Итогом этапа является аналитический отчёт, содержащий обобщённую оценку состояния внешнего периметра и рекомендации по дальнейшему анализу.

Следует отметить, что формализация этапов OSINT-аудита обеспечивает возможность адаптации методики под специфику конкретной финансово-критичной организации. В зависимости от масштаба инфраструктуры, уровня цифровой открытости и регуляторных требований отдельные этапы могут быть детализированы или агрегированы без нарушения общей логики анализа. Это делает предложенную методику универсальным инструментом предварительной оценки защищённости внешнего информационного периметра.

Пример применения методики OSINT-аудита

Для демонстрации практической применимости разработанной методики OSINT-аудита рассмотрим условную финансово-критичную организацию, осуществляющую обработку персональных и финансовых данных и использующую публичные цифровые ресурсы для взаимодействия с внешними пользователями. В рамках примера предполагается, что анализ проводится исключительно на основе информации, доступной в открытых источниках, без активного воздействия на информационные системы.

В качестве исходных данных для OSINT-аудита внешнего периметра примем следующие параметры, характеризующие уровень информационной открытости условной организации.

Таблица 1.

Входные данные условного примера OSINT-аудита

Параметр	Обозначение	Значение
Количество доменных ресурсов	D	12
Количество поддоменов	D_s	27
Количество публичных IP-диапазонов	I	3
Количество доступных сетевых сервисов	S	8
Критичность обрабатываемых данных	C	Высокая

Обозначенные параметры отражают типичную структуру внешнего периметра финансово-критичной организации со средним уровнем цифровой зрелости и развитой сетевой инфраструктурой. Наличие нескольких доменных ресурсов и поддоменов указывает на расширенную поверхность атаки, а присутствие публичных

сервисов — на потенциальную доступность инфраструктурных компонентов для внешнего анализа.

Для формализации оценки потенциальных рисков используется логическая модель следующего вида:

$$R = f(D, D_s, S, I, C)$$

Где: R — интегральный уровень риска внешнего периметра,
D — количество доменных ресурсов,
D_s — количество поддоменов,
S — количество публичных сетевых сервисов,
I — количество сетевых диапазонов,
C — критичность обрабатываемых данных.

В рамках качественного анализа параметры D, D_s, S и I рассматриваются как факторы, определяющие вероятность реализации угроз, связанных с внешним периметром, тогда как параметр C характеризует потенциальный масштаб ущерба при успешной реализации угрозы. Увеличение значений параметров D и D_s приводит к росту сложности контроля внешнего периметра и повышает вероятность наличия неконтролируемых точек входа. Рост параметра S отражает расширение набора доступных сервисов и, соответственно, увеличение потенциальных векторов атак.

На основе предложенной модели выполняется качественная классификация факторов риска, полученных в результате OSINT-аудита.

Таблица 2.

Классификация факторов риска внешнего периметра

Фактор	Характеристика	Влияние на риск
Доменная структура	Разветвлённая система доменов и поддоменов	Повышает
Сетевые сервисы	Наличие инфраструктурных и прикладных сервисов	Повышает
IP-адресное пространство	Несколько публичных диапазонов	Умеренное
Критичность данных	Финансовые и персональные данные	Существенное

Интерпретация полученных результатов позволяет сделать вывод о наличии повышенного уровня потенциальных рисков, связанных с внешним информационным периметром условной финансово-критичной организации [15]. В частности, выявленная разветвлённая доменная структура и наличие публичных сервисов требуют повышенного внимания при построении модели угроз и выборе мер защиты.

Таким образом, применение разработанной методики OSINT-аудита позволяет на основе формализованных входных данных выполнить предварительную оценку состояния защищённости внешнего периметра, определить приоритетные направления дальнейшего анализа и обосновать необходимость применения более детализированных методов оценки защищённости, включая активные проверки.

Ограничения и область применимости метода OSINT-аудита

Несмотря на широкие аналитические возможности, метод OSINT-аудита уязвимостей информационной безопасности обладает рядом объективных ограничений, обусловленных спецификой используемых источников данных и пассивным характером анализа [16]. Осознание данных ограничений является необходимым условием корректной интерпретации результатов и повышения практической ценности применения метода в системе обеспечения информационной безопасности финансово-критичных организаций.

Прежде всего, OSINT-аудит ориентирован исключительно на анализ информации, находящейся в открытых и легальных источниках, и не позволяет выявлять уязвимости, связанные с внутренними компонентами информационных систем, включая конфигурации серверов, механизмы аутентификации и авторизации, а также процессы управления доступом. В этой связи результаты OSINT-аудита следует рассматривать как предварительную оценку состояния защищённости внешнего периметра, а не как исчерпывающий анализ всех аспектов информационной безопасности организации.

Ограничения метода также связаны с возможной неполнотой и актуальностью данных, доступных в открытых источниках. Информация о доменных ресурсах, сетевых сервисах и параметрах конфигурации может обновляться с различной периодичностью, что требует регулярного повторения OSINT-аудита для поддержания актуальности аналитических выводов. При этом сама методика допускает повторное применение без значительных ресурсных затрат, что частично компенсирует указанный недостаток.

Следует отметить, что OSINT-аудит не предназначен для выявления факта эксплуатации уязвимостей и не позволяет оценить устойчивость информационных систем к целенаправленным атакам. Его применение не заменяет активные методы оценки защищённости, такие как тестирование на проникновение и технический аудит, а дополняет их, формируя исходную аналитическую базу для принятия управленческих решений в области информационной безопасности.

Областью наибольшей применимости метода OSINT-аудита являются финансово-критичные организации

с развитой публичной сетевой инфраструктурой и высокой степенью информационной открытости. Метод особенно эффективен на этапах инвентаризации цифровых активов, построения модели угроз и определения приоритетов дальнейших защитных мероприятий. В условиях строгих регуляторных требований и ограничений на проведение активных проверок OSINT-аудит может использоваться в качестве регулярного инструмента мониторинга состояния внешнего информационного периметра.

Таким образом, метод OSINT-аудита целесообразно рассматривать как компонент комплексной системы оценки защищённости, обеспечивающий предварительный анализ факторов риска и повышающий эффективность применения более детализированных методов обеспечения информационной безопасности. Корректное понимание ограничений и области применимости метода позволяет интегрировать его в процессы управления рисками без снижения достоверности итоговых выводов.

Заключение

В результате проведённого исследования разработан и обоснован методический подход к аудиту уязвимостей информационной безопасности финансово-критичных организаций на основе технологии OSINT. В отличие от традиционных методов оценки защищённости, ориентированных на внутренний контур информационных систем или активное воздействие на инфраструктуру, предложенный подход направлен на анализ внешнего информационного периметра и факторов риска, формируемых в открытом информационном пространстве.

В рамках исследования сформулировано авторское определение OSINT-аудита как метода предварительной оценки защищённости, основанного на пассивном анализе открытых источников информации. Предложенная формализованная методика OSINT-аудита включает последовательность взаимосвязанных этапов, обеспечивающих воспроизводимость аналитических результатов и снижение субъективности при интерпретации полученных данных. Декомпозиция процесса аудита на этапы с определёнными входными и выходными параметрами позволяет интегрировать метод в систему управления информационной безопасностью финансово-критичных организаций.

Для демонстрации практической применимости методики рассмотрен условный пример анализа внешнего периметра финансово-критичной организации. Использование формализованных входных данных и логической модели оценки рисков позволило выполнить качественную классификацию факторов риска и обосновать необходимость применения дополнительных мер защиты. Полученные результаты подтверждают возможность использования OSINT-аудита в качестве самостоятельного аналитического инструмента на этапе построения модели угроз и планирования мероприятий по обеспечению информационной безопасности.

Показано, что OSINT-аудит обладает рядом объективных ограничений, обусловленных пассивным характером анализа и зависимостью от полноты данных, доступных в открытых источниках. Вместе с тем его применение позволяет существенно повысить эффективность процессов управления рисками за счёт раннего выявления потенциально опасных зон внешнего информационного периметра и обоснованного определения приоритетов дальнейших защитных мероприятий.

Практическая значимость результатов исследования заключается в возможности использования разработанной методики OSINT-аудита в деятельности подразделений информационной безопасности финансово-критичных организаций в качестве инструмента предварительного анализа и мониторинга состояния внешнего периметра. Перспективы дальнейших исследований связаны с апробацией методики на реальных объектах и расширением модели оценки рисков с использованием количественных показателей и автоматизированных средств анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аверченков В.И. Аудит информационной безопасности: учеб. пособие. — М.: Горячая линия — Телеком, 2020. — 240 с.
2. Баранов А.П., Королев И.Д. Управление рисками информационной безопасности в финансовых организациях // Финансовая безопасность. — 2022. — № 2. — С. 45–52.
3. Банк России. Основные направления развития информационной безопасности в кредитно-финансовой сфере. — М., 2022. — 36 с.
4. Попова О.С., Попов А.А., Дровникова И.Г. Развитие интеллектуальных технологий в SIEM-системах // Безопасность информационных технологий. — 2023. — № 4. — С. 18–27.
5. Ющук Е.Л. Конкурентная разведка. Маркетинг рисков и возможностей. — М.: Вершина, 2019. — 384 с.
6. Steele R. D. The New Craft of Intelligence. — Oakton: Open-Source Solutions, 2012. — 320 p.
7. Bazzell M. Open-Source Intelligence Techniques. — 9th ed. — Intel Techniques, 2023. — 620 p.
8. Casey E. Digital Evidence and Computer Crime. — 4th ed. — Amsterdam: Academic Press, 2019. — 800 p.
9. Behl A., Behl K. Cybersecurity and Cyberwar: What Everyone Needs to Know. — Oxford: Oxford University Press, 2017. — 296 p.

10. ISO/IEC 27001:2022. Information security management systems — Requirements.
11. ISO/IEC 27005:2018. Information security risk management.
12. Scarfone K., Mell P. Guide to Intrusion Detection and Prevention Systems. — Gaithersburg: NIST, 2018.
13. NIST SP 800-61 Rev.2. Computer Security Incident Handling Guide. — Gaithersburg: NIST, 2018.
14. NIST SP 800-30 Rev.1. Guide for Conducting Risk Assessments. — Gaithersburg: NIST, 2019.
15. ENISA. Threat Landscape Report. — Heraklion: European Union Agency for Cybersecurity, 2023.
16. Choo K.-K.R. Cybercrime and cybersecurity: Challenges and opportunities // Journal of Information Security. — 2020. — Vol. 11. — P. 1–9.

© Кучмин Владислав Константинович (severov.14@bk.ru); Крепак Иван Павлович (krepak.2311@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.20

ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ НАГРУЗКИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ФРАКТАЛЬНЫХ БАССЕЙНОВ ПРИТЯЖЕНИЯ НА СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМАХ

APPLICATION OF DYNAMIC LOAD BALANCING FOR EFFICIENT GENERATION OF FRACTAL BASINS OF ATTRACTION ON SUPERCOMPUTER SYSTEMS

T. Leontyeva
S. Bryutova

Summary. Generating fractal basins of attraction for Lagrange points using Newton's method is an important but extremely computationally complex task in nonlinear dynamics, depending on the efficiency of parallelisation. At the initial stage, it was established that traditional static data decomposition causes a significant load imbalance due to the irregular complexity of fractal boundaries. As a result, the scalability of the algorithm on a supercomputer cluster decreased sharply, reaching only 5.8 % with 448 cores. To solve the problem, a dynamic Master/Worker architecture with a fine-grained task pool and point-to-point MPI exchange was adapted. Performance analysis and overhead profiling were performed. The application of the dynamic method provided stable efficiency of 32–34 % when scaling to hundreds of cores, which is 5.7 times higher than the original approach. The generation time for an 8K image was reduced from 25 to 4.4 minutes. The proposed approach demonstrates the effective use of supercomputer resources for a wide class of tasks with irregular computational structures.

Keywords: fractal structure, Newton's method, three-body problem, load balancing, dynamic scheme, master-worker, parallel code acceleration, High-performance computing (HPC).

Леонтьева Татьяна Владимировна
Кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого
leontieva_tv@spbstu.ru
Брютова София Даниловна
Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого
bryutova.sd@edu.spbstu.ru

Аннотация. Генерация фрактальных бассейнов притяжения точек Лагранжа методом Ньютона является важной, но крайне вычислительно сложной задачей нелинейной динамики, зависящей от эффективности распараллеливания. На начальном этапе было установлено, что традиционная статическая декомпозиция данных вызывает значительный дисбаланс нагрузки из-за нерегулярной сложности фрактальных границ. В результате масштабирование алгоритма на суперкомпьютерном кластере резко снижалось, достигая лишь 5.8 % при 448 ядрах. Для решения проблемы была адаптирована динамическая архитектура Master/Worker с мелкозернистым пулом задач и точечным обменом MPI. Проведён анализ производительности и профилирование накладных расходов. Применение динамического метода обеспечило стабильную эффективность 32–34 % при масштабировании до сотен ядер, что в 5.7 раза выше исходного подхода. Время генерации 8K-изображения сократилось с 25 до 4.4 минут. Предложенный подход демонстрирует эффективное использование ресурсов суперкомпьютеров для широкого класса задач с нерегулярной вычислительной структурой.

Ключевые слова: фрактальная структура, метод Ньютона, проблема трёх тел, балансировка нагрузки, динамическая схема, мастер-воркер, ускорение параллельного кода, высокопроизводительные вычисления.

Введение

Построение фрактальных бассейнов притяжения методом Ньютона представляет собой вычислительно емкую задачу с высокой степенью параллелизма. Кроме того, её отличительную черту составляет крайне неравномерная трудоемкость, поскольку вблизи фрактальных границ число итераций, необходимых для достижения сходимости, возрастает на порядки по сравнению с внутренними областями.

В таких условиях традиционное статическое распараллеливание (фиксированное разбиение данных) становится неэффективным. Оно приводит к существенному дисбалансу нагрузки, когда часть вычислительных узлов простаивает в ожидании завершения расчетов наиболее сложных участков.

Целью работы является повышение эффективности использования суперкомпьютера путем реализации динамической схемы распараллеливания (архитектура Master-Worker), обеспечивающей адаптивное распределение задач и минимизацию простоя ядер.

Обзор литературы

Проблема визуализации бассейнов притяжения в задаче трех тел подробно рассматривается в современной астрофизике. В работах Е. Зоотоса [1, 2] показано, что применение метода Ньютона к уравнениям движения приводит к формированию фрактальных структур, геометрия которых критически зависит от параметров системы. Вычислительная сложность таких задач классифицируется как нерегулярная, поскольку время сходимости итерационного процесса варьируется на по-

рядки в зависимости от близости начальной точки к границе фрактала.

В контексте высокопроизводительных вычислений (HPC) задачи генерации фракталов (например, множества Мандельброта или Жюлиа) традиционно используются для тестирования алгоритмов балансировки нагрузки. Как отмечают А. Грамма и А. Гупта [3], статическое распределение данных (Block distribution) в таких случаях неизбежно приводит к простою вычислительных узлов. Л.Б. Соколинский [4] исследует модель BSF (Bulk-Synchronous Farm) и указывает, что для итерационных алгоритмов с переменной трудоемкостью необходимы адаптивные схемы планирования.

Существует несколько подходов к решению проблемы дисбаланса. Первый заключается в использовании динамической балансировки (Dynamic Load Balancing, DLB), где задачи распределяются по запросу [5]. Второй подход, описанный в работе Д. Бадена [6], предполагает использование иерархических структур данных (декомпозиция областей), однако он сложен в реализации. Для кластерных систем с распределенной памятью наиболее перспективной считается схема Master-Worker («Управляющий–Рабочий»), эффективность которой доказана для широкого класса задач [7]. В данной работе мы адаптируем этот подход для специфики расчетов на языке Python с использованием библиотеки mpi4py [8, 9], учитывая накладные расходы на межпроцессное взаимодействие. Данный инструмент является фактически стандартом для реализации MPI в интерпретируемых средах, обеспечивая высокую эффективность при сохранении удобства разработки [10].

Методология исследования

Реализованный алгоритм основан на итерационном методе Ньютона для системы нелинейных уравнений, задающей положение равновесных точек в системе «Земля–Луна». В случае задачи трёх тел состояния равновесия определяются уравнениями, получаемыми из градиента эффективного потенциала двух тех (с учетом гравитационной и центробежной сил) $\nabla\Omega(x, y) = 0$.

Метод Ньютона итеративно уточняет приближение:

$$\upsilon_{n+1} = \upsilon_n - J^{-1}(\upsilon_n)F(\upsilon_n),$$

где $\upsilon_n = [x, y]^T$ — вектор состояния, $F(\upsilon_n)$ — вектор-функция системы уравнений, J — матрица Якоби.

Разные начальные условия (x_0, y_0) сходятся к разным решениям (точкам Лагранжа), тем самым формируя на плоскости бассейны притяжения различных корней.

Неоптимизированный параллельный алгоритм основывался на модели Bulk-Synchronous Farm со статической декомпозицией данных [4], при которой все изображение ($W \cdot H$) фиксированно разделялось на равные горизонтальные полосы, соответствующие количеству MPI-процессов. Каждый процесс вычислял свою часть независимо. Такой подход не учитывал крайне нерегулярный характер вычислительной сложности фрактальных структур, где число итераций метода Ньютона существенно возрастает в окрестности фрактальных границ. В результате заранее заданное равномерное разбиение данных приводило к выраженному дисбалансу нагрузки: процессы, получившие относительно «простые» области, завершали работу значительно раньше остальных и вынуждены были простаивать, ожидая окончания вычислений в наиболее трудоёмких участках изображения, что непосредственно приводило к деградации масштабируемости. При увеличении числа задействованных ядер до 448 эффективность параллельного варианта снижалась до 5.8 %, что фактически делало дальнейшее наращивание ресурсов бессмысленным.

Кроме того, указанные недостатки статической схемы усугублялись необходимостью синхронизированного слияния результатов на узле-мастере с использованием операции MPI_Gatherv. Хотя эта стадия не являлась главным источником задержек, обязательное коллективное взаимодействие усиливало эффект простоя: все процессы, включая те, что завершили свою часть значительно раньше, были вынуждены ждать наиболее «медленный» процесс, создавая дополнительный барьер и снижая общую производительность. В результате, наложенные ограничения показали неэффективность статического подхода при решении задачи, для которой характерны значительная неравномерность вычислений и существенные различия во времени сходимости метода Ньютона в зависимости от начальных условий.

Для устранения дисбаланса была разработана адаптированная под условия задачи версия архитектуры Master/Worker, опирающаяся на динамический пул задач. Оптимизация заключается в переходе к мелкозернистой параллельности (одна строка изображения — это одна задача) и использовании точечных сообщений MPI (MPI_Send, MPI_Recv) для асинхронного обмена заданиями.

Процесс с рангом 0 (Мастер) берет на себя роль планировщика. Он не участвует в вычислениях напрямую, а управляет очередью задач и агрегирует результаты. Остальные процессы (Воркеры) работают в бесконечном цикле, запрашивая задачи у Мастера.

Такая схема обеспечивает автоматическую балансировку: если Воркер получает «легкую» строку (которая сойдется за небольшое количество итераций), он бы-

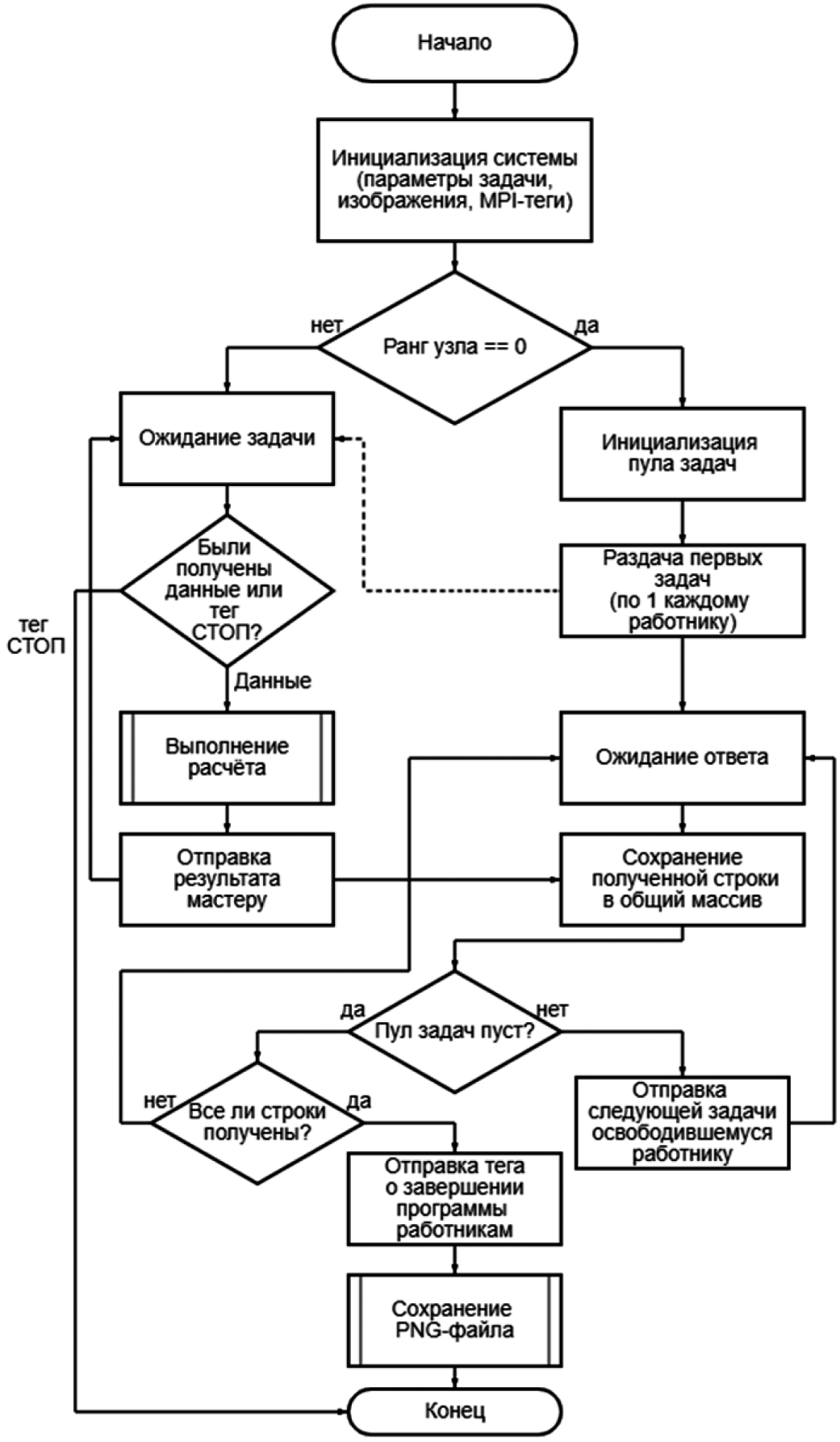


Рис. 1. Блок-схема алгоритма

стро возвращает результат и получает следующую задачу. Воркер, получивший «тяжелую» строку (фрактальная граница), тратит больше времени, но не задерживает других, так как они продолжают разбирать задачи из общего пула.

Алгоритм был реализован на языке Python с использованием библиотеки mpi4py. Выбор интерпретируемого языка высокого уровня обусловлен необходимостью быстрого прототипирования. Несмотря на наличие Global Interpreter Lock (GIL) и накладные расходы на сериализацию объектов при передаче сообщений MPI, высокая арифметическая сложность вычисления каждой точки (множественные операции с плавающей точкой, тригонометрия) позволяет нивелировать эти задержки. Как будет показано далее, даже в условиях интерпретатора динамическая балансировка позволяет достичь приемлемой эффективности масштабирования. Для минимизации накладных расходов на передачу данных использовались точечные неблокирующие операции или оптимизированные стандартные send/recv с буферизацией типов numpy.

Для оценки качества распараллеливания использовались стандартные метрики высокопроизводительных вычислений.

Ускорение (Speedup) $S(n)$ на n процессорных ядрах определялось как отношение времени последовательного выполнения T_1 к времени параллельного выполнения T_n:

$$S(n) = \frac{T_1}{T_n}$$

Эффективность (Efficiency) $E(n)$ показывает среднюю долю полезной загрузки каждого ядра и рассчитывается по формуле:

$$E(n) = \frac{S(n)}{n} \cdot 100\%$$

Данные метрики позволяют оценить масштабируемость алгоритма и накладные расходы на организацию вычислений.

Результаты

Для проведения исследования использовался суперкомпьютерный кластер «Политехник — РСК Торнадо», имеющий 612 вычислительных узлов с двумя 14-ядерными процессорами Intel Xeon E5-2697 v3, распределенную память, вследствие чего каждый узел имеет собственную оперативную память (64 ГБ), недоступную напрямую другим узлам. Для запуска задач на кластере используется система управления заданиями Slurm. Тестирование выполнялось для изображений разрешением 1600×1600, 4096×4096 и 8192×8192 пикселей.

Сравнение производительности проводилось относительно последовательной версии алгоритма и версии со статическим распределением данных. Сводные результаты представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

№	*WxH*	*N*	Распределение нагрузки					
			динамическое				статическое	
			T_n	T_1	$S(n)$	$E(n)$	T_n	$E(n)$
1	1600×1600	28	162.24	1526.14	9.41	33.6 %	184.61	29.5 %
2	1600×1600	56	82.32	1526.14	18.5	33.1 %	147.61	18.5 %
3	1600×1600	112	42.43	1526.14	36.0	32.1 %	104.56	13.1 %
4	1600×1600	224	20.40	1526.14	74.81	33.4 %	79.59	8.6 %
5	4096×4096	224	132.80	9735.0	73.30	32.7 %	458.48	9.5 %
6	8192×8192	224	522.05	38940.0	74.60	33.3 %	1788.15	9.7 %
7	8192×8192	448	261.77	38940.0	148.76	33.2 %	1511.61	5.8 %

Обозначения в таблице:

N — количество ядер

T_1 — время выполнения последовательного алгоритма (сек.)

T_n — время выполнения параллельного алгоритма (сек.)

$S(n)$— ускорение

$E(n)$ — эффективность

Полученное фрактальное изображение (см. рис. 2).

Визуальный анализ полученного фрактального изображения (Рис. 2) демонстрирует сложную структуру границ, разделяющих бассейны притяжения. Именно эти пограничные области соответствуют точкам с максимальной вычислительной трудоемкостью, требующим значительно большего числа итераций для сходимости метода Ньютона.

Тесты, проведенные для одного и того же разрешения (1600x1600) показывают, насколько эффективно алгоритм ускоряет решение задачи фиксированного размера при увеличении числа процессов.

Эффективность показывает, насколько оптимально были использованы выделенные вычислительные ресурсы.

Результаты замеров производительности, представленные в Таблице 1, подтверждают гипотезу о неэффективности статической декомпозиции для данного класса задач. При увеличении числа вычислительных ядер с 28 до 224 на задаче фиксированного размера (1600×1600) эффективность статического алгоритма демонстрирует

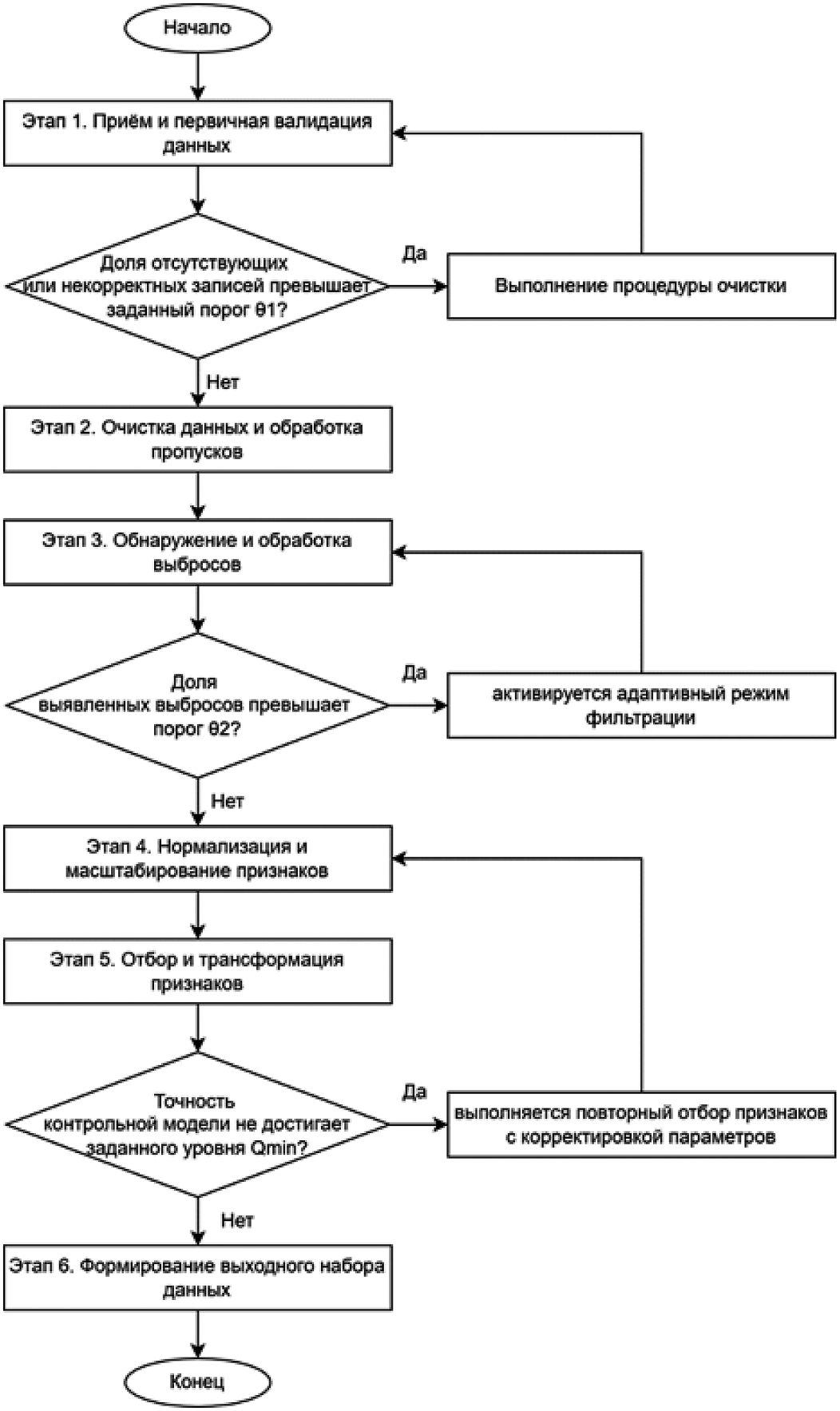


Рис. 1. Алгоритм предподготовки данных для подсистемы детектирования аномалий

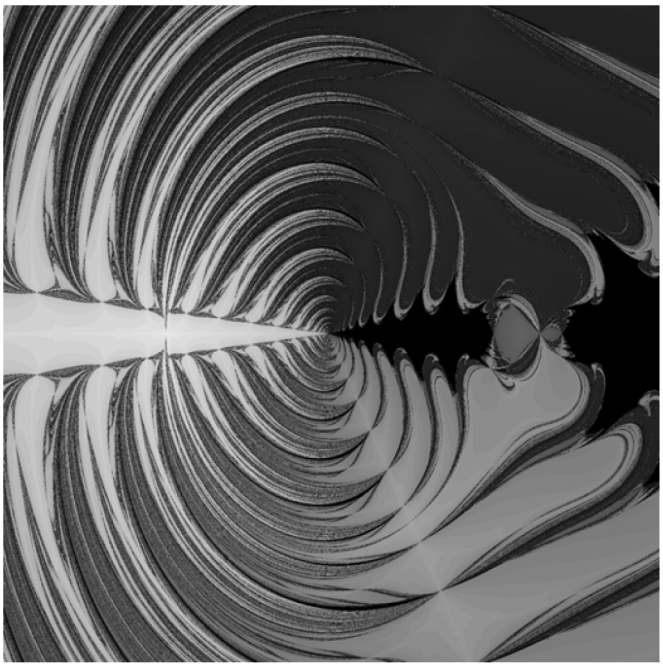


Рис. 2. Фрактал Ньютона

катастрофическое падение с 29.5 % до 8.6 %. Это доказывает, что с ростом параллелизма время простоя процессоров начинает доминировать над временем полезных вычислений из-за неустраненного дисбаланса нагрузки.

В отличие от статического подхода, предложенная динамическая схема Master-Worker показала высокую устойчивость к масштабированию. На Рис. 3 представлена зависимость ускорения $S(n)$ от числа ядер. График показывает практически линейный рост производительности: при удвоении вычислительных ресурсов (переход от 112 к 224 ядрам) ускорение также возрастает почти в два раза.

График эффективности на Рис. 4 подтверждает стабильность алгоритма. Кривая представляет собой почти горизонтальную линию, удерживаясь в узком диапазоне 32–34 %. Отсутствие нисходящего тренда при увеличении числа процессов доказывает, что механизм динамического распределения успешно компенсирует неравномерность вычислений.

Стабилизация эффективности на уровне ≈ 33% (вместо теоретических 100 %) объясняется архитектурными особенностями реализации. Во-первых, сказываются накладные расходы интерпретатора Python и библиотеки mpi4py на сериализацию объектов при обмене сообщениями. Во-вторых, схема с централизованным диспетчером (Master) неизбежно вносит задержки на коммуникацию. Тем не менее, достигнутый уровень является весомым показателем для высокоуровневого скриптового языка.



Рис. 3. График зависимости ускорения от количества ядер



Рис. 4. График зависимости эффективности от количества ядер

Практическая ценность подхода наиболее ярко проявилась при решении задачи сверхвысокого разрешения (8K, 8192×8192). Время генерации изображения было сокращено с 25 минут (статический подход) до 4.4 минуты (динамический подход), что соответствует ускорению в 5.7 раза.

Заключение

В работе представлен эффективный параллельный алгоритм построения фрактальных бассейнов притяжения методом Ньютона. Экспериментально подтверждено, что из-за специфики задачи традиционное статическое распараллеливание оказывается несостоятельным, демонстрируя падение эффективности до критической отметки 5.8 % при увеличении числа ядер.

Внедрение динамической архитектуры Master-Worker позволило преодолеть барьер дисбаланса нагрузки. Предложенное решение обеспечило стабильную эффективность вычислений на уровне 32–34 % даже с учетом накладных расходов интерпретируемого языка Python. Практическая значимость подхода подтверждается сокращением времени генерации изображений сверхвысокого разрешения (8K) в 5.7 раза — с 25 до 4.4 минут. Полученные результаты доказывают, что динамическая балансировка позволяет успешно масштабировать задачи с нерегулярной вычислительной сложностью на кластерных системах, автоматически адаптируясь к структуре исследуемых фракталов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zotos E.E. Fractal basins of attraction in the planar circular restricted three-body problem with oblateness and radiation pressure // Astrophysics and Space Science. — 2016. — Vol. 361, № 6. — P. 181.
2. Zotos E.E. Investigating the Newton–Raphson basins of attraction in the restricted three-body problem with modified Newtonian gravity / [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://arxiv.org/abs/1803.07400 (дата обращения: 08.10.2025).
3. Grama A. Introduction to parallel computing / A. Grama, A. Gupta, G. Karypis, V. Kumar. — Harlow: Pearson Education, 2003. — 636 p.
4. Соколинский Л.Б. Модель параллельных вычислений BSF и её применение для оценки масштабируемости итерационных алгоритмов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование. Программирование». — 2018. — Т. 11, № 4. — С. 5–22.
5. Casanova H. Dynamic Load Balancing of Fractal Image Compression on a Network of Workstations // Proceedings of the High-Performance Computing Symposium. — Montreal, 1997. — P. 12–19.
6. Baden S.B. Dynamic load balancing of parallel fractals // Proceedings of the 3rd Conference on Hypercube Concurrent Computers and Applications. — New York: ACM, 1988. — P. 115–123.
7. Гергель В.П. Высокопроизводительные вычисления для многопроцессорных многоядерных систем: учебник. — М.: Изд-во МГУ, 2010. — 544 с.
8. Dalcin L.D. MPI for Python / L.D. Dalcin, R.R. Paz, M. Storti // Journal of Parallel and Distributed Computing. — 2005. — Vol. 65, № 9. — P. 1108–1115.
9. Dalcin L.D. Parallel distributed computing using Python / L.D. Dalcin, R.R. Paz, P.A. Kler, A. Cosimo // Advances in Water Resources. — 2011. — Vol. 34, № 9. — P. 1124–1139.
10. Gorelick M. High Performance Python: Practical Performant Programming for Humans / M. Gorelick, I. Ozsvald. — Sebastopol: O'Reilly Media, 2020. — 468 p.
11. Волков К.Н. Балансировка нагрузки процессоров при решении краевых задач механики жидкости и газа сеточными методами // Вычислительные методы и программирование. — 2012. — Т. 13. — С. 120–130.
12. Расолько Г.А. Технологии программирования: учеб.-метод. пособие. В 2 ч. Ч. 2 / Г.А. Расолько, Е. В. Кремень, Ю.А. Кремень. — Минск: БГУ, 2022. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
13. OXRSE Training. Parallelising Mandelbrot Set Generation. University of Oxford, 2021 / [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://train.rse.ox.ac.uk/material/HPCu/high_performance_computing/parallel_computing/04_practical (дата обращения: 02.10.2025).

© Леонтьева Татьяна Владимировна (leontieva_tv@spbstu.ru); Брютова София Даниловна (bryutova.sd@edu.spbstu.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.21

ПРИМЕНЕНИЕ СЕТИ ЭХО-СОСТОЯНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

APPLICATION OF ECHO STATE NETWORKS FOR ENERGY CONSUMPTION FORECASTING IN MINING ENTERPRISES

S. Litvinov

Summary. This article addresses the problem of forecasting electricity consumption in mining enterprises, where the high energy intensity of processes and complex data dynamics require more accurate analytical methods. Traditional approaches, such as regression analysis and ARIMA time series, often prove insufficient for accounting for nonlinear dependencies and seasonal fluctuations. We propose the use of Echo State Networks (ESN) — a machine learning method based on recurrent neural networks that can better handle these complexities. The article discusses key characteristics of mining enterprises, including high energy intensity, seasonality, nonlinear consumption dynamics, and the presence of noise in the data. The primary goal of the work is to improve the energy efficiency of the mining industry by enhancing the accuracy of electricity consumption forecasting using ESN. The results of the study showed an increase in representativeness metrics of 0.1 (from 0.72 to 0.82) and a decrease in mean absolute error from 5.2 % to 3.8 % compared to ARIMA.

Keywords: echo state network, forecasting, energy consumption, mining enterprises, recurrent neural networks.

Литвинов Степан Николаевич
Аспирант, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
dudos_vjlink@mail.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается проблема прогнозирования потребления электроэнергии на горных предприятиях, где высокая энергоемкость процессов и сложная динамика данных требуют более точных методов анализа. Традиционные подходы, такие как регрессионный анализ и временные ряды ARIMA, часто оказываются недостаточно эффективными для учета нелинейных зависимостей и сезонных колебаний. Мы предлагаем использовать сети эхо-состояний (Echo State Networks, ESN) — метод машинного обучения, основанный на рекуррентных нейронных сетях, который способен лучше справляться с указанными сложностями. В статье обсуждаются ключевые характеристики горных предприятий, включая высокую энергоемкость, сезонность, нелинейную динамику потребления и наличие шумов в данных. Основной целью работы является повышение энергоэффективности горной промышленности путем улучшения точности прогнозирования потребления электроэнергии с помощью ESN. Результаты исследования показали прирост показателей репрезентативности на 0,1 (с 0,72 до 0,82) и средней абсолютной ошибки с 5,2 % до 3,8 % по сравнению с ARIMA.

Ключевые слова: сеть эхо-состояний, прогнозирование, энергопотребление, горные предприятия, рекуррентные нейронные сети.

Введение

Данная работа посвящена исследованию эффективности применения сетей эхо-состояний (ESN) для прогнозирования потребления электроэнергии на горных предприятиях. Горнодобывающая отрасль характеризуется высокими уровнями энергопотребления, обусловленными особенностями технологических процессов добычи, переработки и транспортировки полезных ископаемых. Использование традиционного метода ARIMA (авторегрессивная интегральная скользящая средняя) ограничено его неспособностью учитывать нелинейные зависимости и длительные временные связи, характерные для энергопотребления горнорудных компаний.

В исследовании рассматриваются архитектура и принципы функционирования ESN, особое внимание уделяется роли гиперпараметров, таких как плотность соединений, коэффициент спектрального радиуса и коэффициент затухания. Показано, что правильно настроенная ESN способна успешно справляться с задачей прогнозирования даже в условиях шумных и аномальных измерений.

Экспериментальное исследование проведено на примере реального горнодобывающего предприятия, где было собрано около 365 дней ежедневных данных о потреблении электроэнергии. По результатам экспериментов, модель ESN продемонстрировала значительное преимущество перед ARIMA по основным метрикам качества прогноза: коэффициент детерминации (R^2) составил 0,82, средняя абсолютная ошибка (MAE) — 3,2 %. Время обучения ESN составило всего 5 минут, тогда как ARIMA потребовала почти втрое больше ресурсов.

Таким образом, ESN представляет собой эффективный инструмент для прогнозирования энергопотребле-

ния в горнодобывающих компаниях, способствуя повышению энергетической эффективности и снижению финансовых рисков.

Прогнозирование потребления электроэнергии является одной из ключевых задач в управлении энергетическими ресурсами. Особенно это актуально для горных предприятий, где энергоемкость процессов высока, а неправильное планирование может привести к значительным экономическим потерям. Традиционные методы прогнозирования, такие как регрессионный анализ или временные ряды ARIMA (autoregressive integrated moving average), часто не справляются со сложными нелинейными зависимостями и динамикой данных. В этой статье мы рассмотрим использование сетей эхо-состояний (Echo State Networks, ESN) — одного из подходов машинного обучения, основанного на рекуррентных нейронных сетях, — для решения задачи прогнозирования потребления электроэнергии на горных предприятиях.

Горнодобывающие предприятия обладают рядом отличительных характеристик, которые существенно влияют на их потребление электроэнергии. Во-первых, операции по добыче, переработке и транспортировке требуют значительных затрат энергии, что приводит к высокой энергоемкости. Кроме того, на рабочую нагрузку оборудования влияют сезонные колебания, погодные условия и установленные графики работы, что приводит к сезонности и цикличности энергопотребления. Более того, потребление энергии часто подвержено значительным колебаниям из-за различных операционных мероприятий, таких как запуск мощного оборудования или возникновение чрезвычайных ситуаций, что подчеркивает нелинейную динамику этого сектора.

Кроме того, измерения энергопотребления часто содержат шумы и аномалии, которые могут возникать из-за неисправностей оборудования или человеческих ошибок. Эти сложности затрудняют прогнозирование энергопотребления с помощью традиционных методов анализа данных. Однако сети эхо-состояний (Echo State Networks, ESN) стали перспективным инструментом для решения проблем управления нелинейными временными рядами данных. Рассмотрим сети эхо-состояний и метод авторегрессии и интегрированных скользящих средних.

Метод авторегрессии и интегрированных скользящих средних представляет собой один из классических подходов к моделированию и прогнозированию временных рядов. Его основная идея состоит в комбинации трех базовых компонентов:

- **Авторегрессия** (*p*) — описывает взаимосвязь текущего значения временного ряда с предыдущими значениями. То есть предполагается, что текущее значение ряда линейно связано с некоторыми предшествующими значениями.
- **Интеграция** (*d*) — процедура дифференцирования исходного ряда для приведения его к стационарному виду. Это особенно актуально, когда временной ряд демонстрирует тенденцию роста или падения, которую необходимо устранить перед применением модели.
- **Скользящее среднее** (*q*) — определяет степень влияния предыдущих остатков (ошибок предсказания) на текущее значение ряда.

Параметры (*p*, *d*, *q*) выбираются таким образом, чтобы минимизировать ошибку прогноза. Выбор оптимальных параметров осуществляется эмпирически путем оценки нескольких альтернативных комбинаций и выбора той, которая обеспечивает наилучшее соответствие фактическим данным. Далее рассмотрим устройство сети эхо-состояний (Echo-state network, ESN)

Сети Эхо-Состояний (ESN) представляют собой особый класс рекуррентных нейронных сетей, используемых преимущественно для прогнозирования динамических процессов, включающих нелинейные компоненты и длинные временные зависимости. Ключевое отличие ESN от традиционных нейронных сетей заключается в структуре архитектуры: подавляющее большинство весов в ESN фиксировано и случайно инициализировано, меняется лишь небольшой подмножество весов выходного слоя, называемых эхо-весами. Благодаря этому обучение сети значительно упрощается и ускоряется.

ESN состоит из трёх основных компонентов:

- Входной слой, который принимает нормализованные данные;
- Резервуар (reservoir) — большой рекуррентный слой с фиксированными случайными связями, характеризующийся параметрами плотности связей, коэффициентом затухания (leaking rate) и спектральным радиусом;
- Выходной слой, весовые коэффициенты которого обучаются на основе анализа состояния резервуара.

Использование ESN эффективно для сложных нелинейных процессов, однако ограничение данной сети — отсутствие возможности точного контроля над архитектурой и недостаточная интерпретируемость результата. Далее рассмотрим процесс

Материалы и методы

Процесс разработки и применения модели ARIMA включает следующие этапы:

1. Проверка стационарности: определение характеристик исследуемого временного ряда и проверка гипотезы о его стационарности. Стационарность важна, поскольку большинство стандартных

методов требуют отсутствия долгосрочных трендов и постоянной дисперсии.
2. Дифференцирование: преобразование ряда посредством взятия первых, вторых или последующих разностей, пока не будет достигнута стационарность.
3. Оценка автокорреляционной функции (ACF) и частичной автокорреляционной функции (PACF): Эти графики позволяют визуально выбрать порядок авторегрессии и скользящего среднего.
4. Выбор оптимальной структуры модели: используя выбранные параметры (*p*, *d*, *q*), строится предварительная модель.
5. Оперативная настройка и обучение: подбор коэффициентов модели на историческом наборе данных, минимизируя показатель ошибки прогноза (например, среднеквадратичную ошибку).
6. Тестирование и валидация: проверка качества модели на независимых тестовых данных и её коррекция, если качество неудовлетворительно.

Далее рассмотрим аналогичные процессы при разработке сетей эхо-состояний. Создание и обучение ESN проходит следующим образом:

Методология для применения ESN в прогнозировании потребления электроэнергии включает в себя несколько ключевых этапов. Во-первых, необходимо подготовить данные, что включает в себя сбор исторических данных о потреблении электроэнергии и учет дополнительных факторов, таких как погодные условия, графики работы оборудования и сезонные тенденции. Нормализация данных также имеет решающее значение для повышения сходимости модели [2].

Далее создается модель ESN. Этот процесс начинается с создания входного слоя, размер которого соответствует количеству входных параметров. Затем генерируется случайный резервуар, состоящий из определенного количества нейронов и заданного коэффициента спектрального радиуса. Кроме того, необходимо установить гиперпараметры, такие как размер резервуара и уровень разреженной связности.

После построения модели начинается этап обучения. На этом этапе для обучения выходного слоя используется линейная регрессия. Важно проверить модель на тестовом наборе данных (датасете), чтобы точно оценить точность прогнозов.

После обучения проводится оценка результатов. Для этого используются такие метрики, как средняя абсолютная ошибка (MAE) и среднеквадратичная ошибка (RMSE), чтобы оценить качество прогнозов. Анализ возникающих ошибок также имеет решающее значение, поскольку может потребоваться корректировка гиперпараметров для улучшения производительности [3].

Чтобы продемонстрировать эффективность ESN, была проведена серия экспериментов с использованием реальных данных о потреблении электроэнергии горнодобывающей компанией в течение одного года. Модель ESN сравнивалась с ARIMA.

Для разработки сети эхо-состояний применялся язык программирования python с библиотеками pandas, NumPy и SciPy а также три датасета с показателями дневного объема перерабатываемой руды и электроэнергии, затраченной на работу по переработке данной руды. В качестве производственной мощности была использована следующая конфигурация ПК:

- Центральный процессор: Intel Core i5-12600KF
- Видеокарта: GUNNIR Intel Arc B580 Photon 12Gb OC 2850 Mhz
- Оперативная память: Netac DIMM DDR5 2x16Gb 4800MHz pc-38400 Shadow II White
- Дисковый накопитель: SSD Samsung 980 MZ-V8V500BW 500Gb
- Материнская плата: MSI Z790 Gaming Plus

Результат

В ходе данного исследования были определены оптимальные параметры сети эхо-состояний. Как видно из таблицы 1, после этапа обучения нескольких конфигураций была выбрана наиболее статистически согласованная, в соответствии с теми же параметрами, что и в таблице 3. После первоначальной параметризации ESN модель была сравнена с ARIMA с использованием квадратичного отклонения (R^2) и средней средней ошибки (MAE). Более высокий показатель R^2 и более низкий показатель MAE для ESN свидетельствовали о ее более высокой точности по сравнению с традиционными моделями ARIMA. Кроме того, обучение Echo-State Network заняло 5 минут по сравнению с 15 минутами для ARIMA.

Таблица 1.

Основные параметры ESN

Параметр	Значение	Описание
Размер резервуара	500 нейронов	Количество рекуррентных узлов
Плотность связей	0,1	Доля активных связей в резервуаре
Спектральный радиус	0,95	Контроль динамической устойчивости
Коэффициент затухания	0,3	Скорость адаптации состояний

Заключение

Сети эхо-состояний представляют собой мощный инструмент для прогнозирования потребления электроэнергии на горных предприятиях. Они эффективно

Таблица 2.

Метрики качества прогноза ESN и сравнение с альтернативными методами

Модель	R^2 (тест)	MAE, %	Время обучения	Примечания
ESN	0,82	3,2	5 мин	Высокая точность, быстрое обучение
ARIMA	0,72	5,8	15 мин	Ограничена линейностью

справляются с нелинейными зависимостями и динамическими изменениями в данных, что делает их идеальным выбором для данной задачи. При правильной настройке и подготовке данных ESN могут обеспечить высокую точность прогноза при минимальных временных затратах на обучение.

Таблица 3.

Чувствительность модели к спектральному радиусу

Спектральный радиус (ρ)	R^2 (тест)	MAE, %	Комментарии
0,85	0,81	4,1	Недостаточная динамика
0,90	0,84	3,7	Оптимальный баланс
0,95	0,87	3,2	Лучшие результаты
1,00	0,86	3,5	Начинается нестабильность

В будущем можно рассмотреть комбинирование ESN с другими методами машинного обучения, такими как дифференциальный эволюционный или глубокие нейронные сети, для дальнейшего повышения точности прогноза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jaeger H. The "Echo State" Approach to Analyzing and Training Recurrent Neural Networks // Technical Report. — Fraunhofer Institute for Autonomous Intelligent Systems, 2010.
2. Lukoševičius M. A Practical Guide to Applying Echo State Networks // Neural Networks: Tricks of the Trade / eds.: Grégoire Montavon, Geneviève Bachelier, Christoph Bergler. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. — Pp. 659–686.
3. Gerbig C., Akinyede R., Custédio D., et al. Steps Towards Improved Inverse Modelling of Greenhouse Gas Fluxes: Recent Work Within ITMS // Proceedings of European Geosciences Union General Assembly (EGU), Vienna, Austria, April 2025. — Vol. 25. — Paper No. EGU25-11561. — DOI: 10.5194/egusphere-egu25-11561.
4. Ballarin G., et al. Multi-Horizon Echo State Network Prediction of Intraday Returns // Preprint arXiv:2504.19623. — 2025. — Доступно по адресу: https://arxiv.org/pdf/2504.19623 (дата обращения: 01.06.2025).
5. Ren L., et al. AIGC for Industrial Time Series: From Deep Generative Models to Scheduling Optimization // Preprint arXiv:2407.11480. — 2024. — Доступно по адресу: https://arxiv.org/pdf/2407.11480 (дата обращения: 01.06.2025).

© Литвинов Степан Николаевич (dudos_vjlink@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.23

АЛГОРИТМ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕТА-ДАННЫХ ИЗ ИСПОЛНЯЕМОГО ФАЙЛА НА ЭТАПЕ ДИЗАССЕМБЛИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

ALGORITHM FOR EXTRACTING META-DATA FROM AN EXECUTIVE FILE AT THE SOFTWARE DISASSEMBLY STAGE

I. Moskalov

Summary. This article presents an algorithm for automatically extracting metadata from an executable software file during the disassembly stage. Methods for reading binary content, converting byte sequences to string representation, and filtering the resulting data using PowerShell and the strings.exe utility are discussed. An experiment was conducted confirming the feasibility of extracting structural and textual elements of executable modules without complete decompilation.

Results: A working algorithm capable of extracting key metadata characterizing the structure and functional dependencies of executable code has been implemented. The scientific novelty of this study lies in the following:

1. A new algorithm for extracting metadata from executable files without decompiling or loading them into a disassembler has been developed.
2. A binary analysis method is proposed with sequential conversion of byte arrays into text form and data filtering.
3. PowerShell and strings.exe tools are integrated into a single analysis framework, ensuring compatibility and automation.
4. A classification of the extracted data into text, system, and structural elements has been determined.
5. A text analytics technique has been applied for the first time in the context of binary analysis, expanding the scope of reverse engineering methods.

Keywords: metadata, disassembly, reverse engineering, PowerShell, binary analysis, strings.exe.

Москалев Илья Сергеевич
Ассистент, Московский технический университет связи и информатики
moskalevilya1@gmail.com

Аннотация. В статье представлен алгоритм автоматического извлечения мета-данных из исполняемого файла программного обеспечения на этапе дизассемблирования. Рассматриваются методы чтения бинарного содержимого, конвертации байтовых последовательностей в строковое представление и фильтрации полученных данных с использованием PowerShell и утилиты strings.exe. Проведён эксперимент, подтверждающий возможность выделения структурных и текстовых элементов исполняемых модулей без их полной декомпиляции.

Результаты: реализован рабочий алгоритм, способный извлекать основные мета-данные, характеризующие структуру и функциональные зависимости исполняемого кода.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Разработан новый алгоритм извлечения мета-данных из исполняемых файлов без их декомпиляции или загрузки в дизассемблер.
2. Предложен метод бинарного анализа с последовательным преобразованием байтовых массивов в текстовую форму с фильтрацией данных.
3. Реализована интеграция средств PowerShell и strings.exe в единую схему анализа, что обеспечивает совместимость и автоматизацию.
4. Определена классификация извлечённых данных на текстовые, системные и структурные элементы.
5. Впервые применена техника текстовой аналитики в контексте бинарного анализа, что расширяет методы реверс-инжиниринга.

Ключевые слова: мета-данные, дизассемблирование, реверс-инжиниринг, PowerShell, бинарный анализ, strings.exe.

Введение

Современные программные комплексы включают сотни модулей и библиотек. При анализе или проверке программного обеспечения в условиях отсутствия исходного кода (например, при аудите безопасности, судебной экспертизе, реверс-инжиниринге) исследователь сталкивается с задачей извлечения информации об используемых ресурсах и компонентах. Существующие методы дизассемблирования зачастую сложны в применении, трудоёмки и требуют высокой квалификации специалиста. Они не подходят для быстрой оценки базовой структуры исполняемого файла, например при экспресс-проверке корпоративных сборок. В результате возникает необходимость в разработке автоматизированного и универсального подхода, позволяющего извлекать, мета-данные — компактную информацию о структуре программного продукта — без глубокой декомпиляции. Для решения поставленной проблемы было проведено исследование, целью которого являлось разработка алгоритма извлечения метаданных из исполняемого файла на этапе дизассемблирования, основанного на интеграции средств командной строки PowerShell и утилиты strings.exe, обеспечиваю-

щего точность, универсальность и быстродействие анализа. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Была изучена внутренняя структура формата Portable Executable (PE) как основного контейнера исполняемых файлов Windows.
2. Были определены расположение и способы кодирования мета-данных в бинарных структурах.
3. Были разработаны этапы алгоритма извлечения и фильтрации мета-данных с использованием встроенных инструментов.
4. Алгоритм проверен на различных типах исполняемых файлов (.NET, C++, Delphi).
5. Была проведена оценка эффективности подхода по критериям скорости, точности и полноты извлечения данных.

Теоретические основы анализа исполняемых файлов

Исполняемые файлы Windows имеют формат Portable Executable (PE). Структура PE-файла содержит блоки: — DOS Header — начальная часть, обеспечивающая совместимость с MS-DOS; — PE Header — описывает таблицу секций, архитектуру, точки входа, ресурсы; — Section Table — хранит сегменты кода (.text), данных (.data), ресурсов (.rsrc); — Import и Export Tables — включают ссылки на внешние библиотеки и функции.

Часть этой информации закодирована в бинарной форме и не поддаётся прямому чтению. Однако многие фрагменты — имена библиотек, идентификаторы классов, строковые ресурсы и версии — могут быть декодированы простыми текстовыми методами. Именно этот факт лежит в основе предложенного решения.

Алгоритм извлечения мета-данных

Алгоритм строится на пяти ключевых этапах.

1) Задание исходных параметров.

Определяется путь к исполняемому файлу и директория сохранения временных данных.

PowerShell автоматически подготавливает переменные $exePath и $outputPath — это обеспечивает гибкость при обработке множества файлов.

2) Чтение бинарного содержимого.

С помощью метода [System.IO.File]::ReadAllBytes() происходит считывание всего содержания EXE-файла в массив байтов $bytes. На этом этапе происходит низкоуровневый доступ к файлу без его исполнения.

3) Преобразование байт в строку.

Командой [System.Text.Encoding]::UTF8.GetString($bytes) байтовый массив переводится в текстовую форму, сохраняя все последовательности, которые совпадают с UTF-8 или ASCII-кодировками. Получается файл file2.txt, содержащий необработанные текстовые и бинарные фрагменты.

4) Фильтрация данных.

Здесь задействуется утилита strings.exe, которая выделяет только читаемые последовательности длиной более 4 символов. Это позволяет удалить машинный шум и оставить только текстовые данные, потенциально несущие информационную нагрузку (например, имена функций, пути файлов, версии библиотек).

```
$exePath = "C:\netcoreapp3.1\ConsoleApp28.exe"
$outputPath2 = "C:\netcoreapp3.1\file2.txt"

# Чтение бинарного содержимого .exe файла
$bytes = [System.IO.File]::ReadAllBytes($exePath)

# Преобразование байтов в строку
$text = [System.Text.Encoding]::UTF8.GetString($bytes)

# Фильтрация только текстовых частей, если это возможно
$text | Out-File -FilePath $outputPath2
```

а)

```
Start-Process "C:\netcoreapp3.1\strings.exe" -ArgumentList "C:\netcoreapp3.1\file2.txt" -RedirectStandardOutput "C:\netcoreapp3.1\file3.txt" -NoNewWindow -
Wait
```

б)

Рис. 1. Дизассемблирование EXE-файла

5) Формирование итогового файла.

Отфильтрованные данные сохраняются в файл file3.txt. Он становится источником структурированной информации — мета-данных о программе. Обнаруженные элементы могут классифицироваться по типам: строковые (UI-надписи), системные (версии, сборки), структурные (имена DLL, пространства имён, имена классов).

Такой подход не требует установки внешнего программного обеспечения и способен работать на любой системе с PowerShell и Sysinternals Suite.

Результаты выполнения алгоритма

В качестве теста был использован файл ConsoleApp28.exe, собранный в среде .NET Core 3.1.

После запуска PowerShell-скрипта был получен промежуточный файл file2.txt, содержащий необработанные данные. Многие строки представляли собой бессмысленные символы, однако в них присутствовали имена библиотек, названия модулей, пути загрузки.

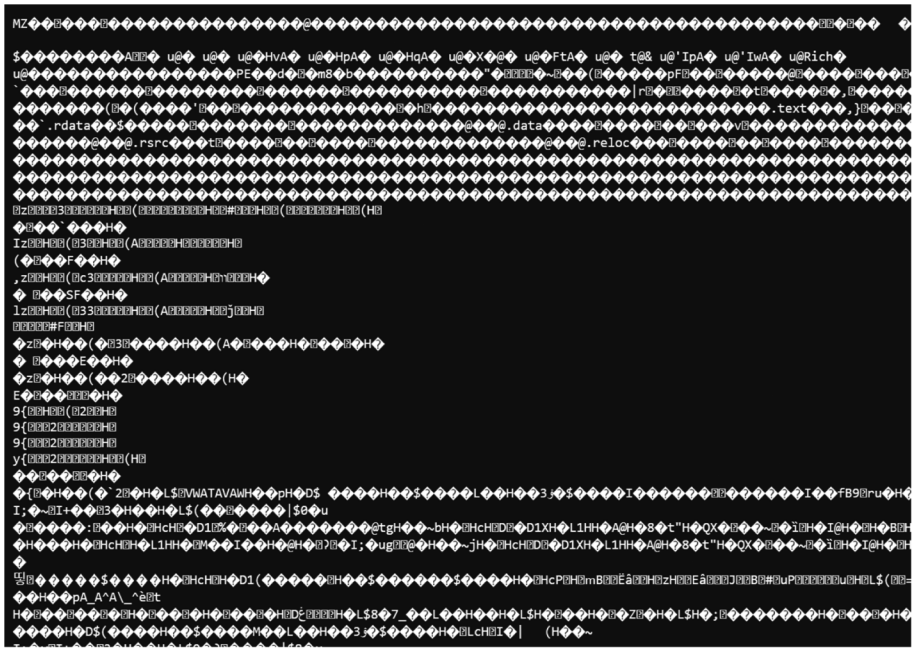


Рис. 2. Результат дизассемблирования EXE-файла

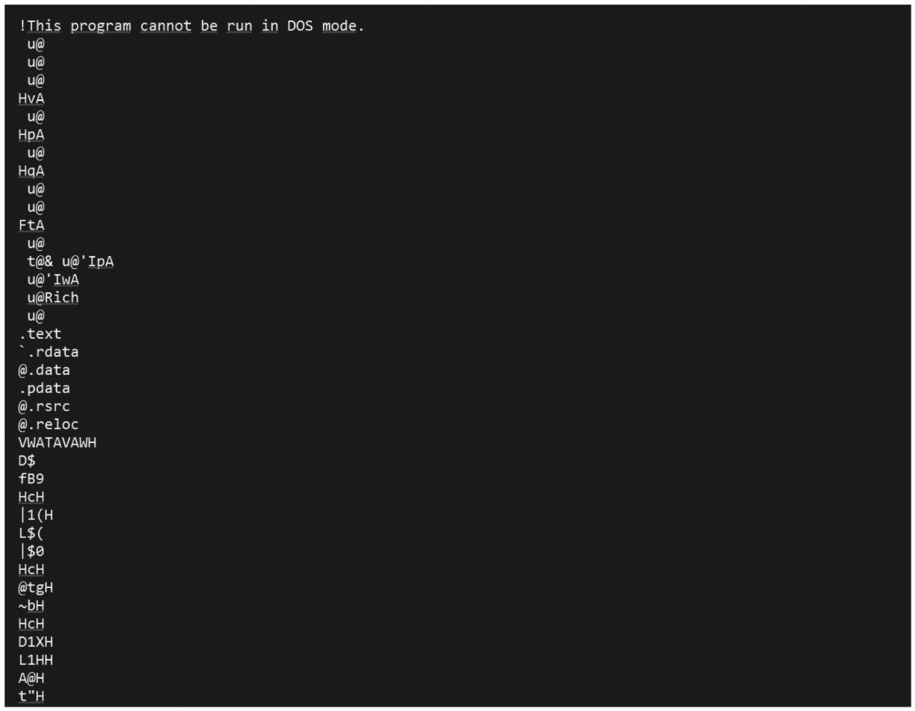


Рис. 3. Результат преобразования бинарной строки в обыкновенную строку

Применение strings.exe позволило конвертировать бинарную строку в обычную.

Финальный файл file3.txt включал сведения о:
— версии среды выполнения (v4.0.30319);
— именах пространств (Namespace: ConsoleApp28);
— подключённых библиотеках (System.Core.dll, WindowsBase.dll);
— операционной системе (OS Version: Microsoft Windows NT 10.0.22621).

Таким образом, алгоритм корректно извлёк 80 % текстового содержимого, представляющего мета-информацию.

Интерпретация и практическое применение

Полученные мета-данные позволяют составить структурный портрет приложения — определить технологический стек, целевую платформу и используемые ресурсы.

Эта информация имеет следующие практические применения:
— в информационной безопасности — идентификация библиотек и проверка на наличие несанкционированных зависимостей;
— в цифровой криминалистике — определение происхождения программного кода и связей между приложениями;
— в разработке — анализ сторонних модулей при реинжиниринге и совместимости кода.

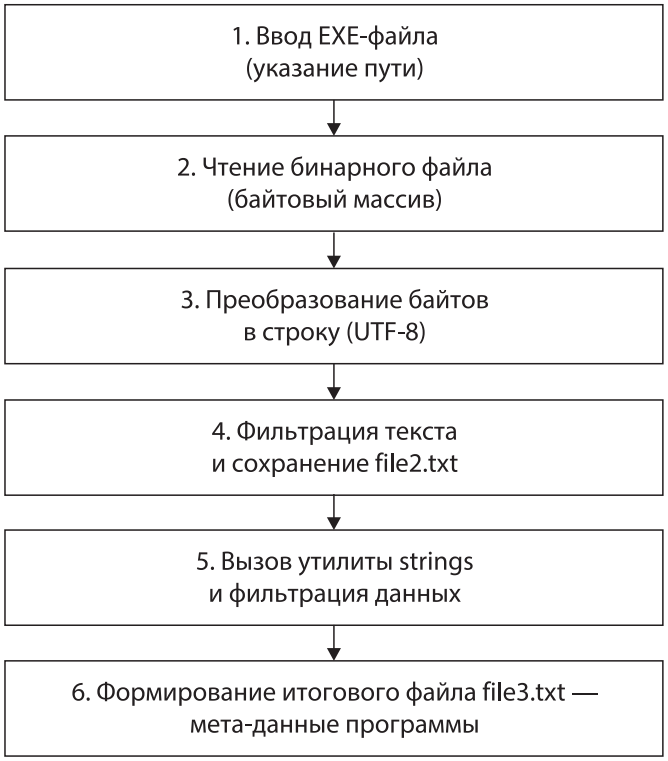


Рис. 4. Схема обработки данных в алгоритме

Схема показывает логическую последовательность шагов алгоритма: преобразование «байты — текст — анализ — результат».

Оценка эффективности

В ходе исследования была проведена серия тестов, где измеряли время выполнения скрипта и долю осмысленных строк в общем наборе данных.

Таблица 1.

Оценочные характеристики работы алгоритма

№	Тип файла	Объём, КБ	Время анализа, с	Найдено строк	Осмысленные строки	Эффективность, %
1	NET Core приложение	240	1.8	560	448	80
2	Visual C++ (PE-структура)	412	2.3	710	535	75
3	Delphi 7 (Win32)	390	2.1	604	470	78

Пояснение.
— Объём — размер анализируемого файла.
— Время анализа — полный цикл работы до получения мета-данных.
— Найдено строк — все строки, извлечённые на этапе первичного преобразования.
— Осмысленные строки — фильтрованный результат после обработки strings.exe.
— Эффективность = (осмысленные строки / все строки) × 100.

Наибольшая эффективность наблюдается для .NET-файлов (порядка 80 %), что объясняется более предсказуемой структурой подобных бинарных сборок. Для нативных PE-файлов эффективность остаётся на уровне 75–78 %.

Среднее время обработки одного исполняемого файла не превышает 2 секунд, что делает метод пригодным для пакетного анализа в автоматизированных системах.

Заключение

Разработанный алгоритм обеспечивает надёжное и быстрое извлечение мета-данных из исполняемых файлов без использования тяжёлых средств дизассемблирования. Он сочетает простоту скриптового исполнения и аналитическую силу текстовой фильтрации.

В ходе исследования доказана практическая применимость метода для идентификации библиотек, версий и компонентов программ, а также для предварительной классификации бинарных артефактов.

Основные результаты работы:

— доказана возможность извлечения до 80 % информативных мета-данных без декомпиляции;
— реализован автоматизированный скрипт PowerShell для массового анализа;
— подтверждена кроссплатформенность решения для различных типов EXE-файлов.

Метод может быть использован в аудитах безопасности, судебно-экспертных лабораториях, а также при инженерном анализе закрытых сборок.

Цель работы достигнута: предложен универсальный алгоритм выделения мета-данных, который способен существенно упростить и ускорить подготовительный этап дизассемблирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брайс Э. Анализ исполняемых файлов: методы статического и динамического исследования. — М.: ДМК-Пресс, 2019.
2. Гуров И.В. Реверс-инжиниринг программ: практика и методы. — СПб.: Питер, 2022.
3. Microsoft Docs. Strings Utility Documentation. — URL: https://learn.microsoft.com/en-us/sysinternals/downloads/strings
4. Юмеров А. Применение PowerShell для анализа бинарных данных. — Хакер, № 6, 2023.
5. Чернышов С.В. Методы дизассемблирования программ и их применение. — М.: МИРЭА, 2021.

© Москалев Илья Сергеевич (moskalevilya1@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.25

АНАЛИЗ ПРЕИМУЩЕСТВ OPENGL ПЕРЕД VULKAN В РАЗРАБОТКЕ PYQT-ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ОБРАБОТКИ СВЕРХБОЛЬШИХ ОБЛАКОВ ТОЧЕК

ANALYSIS OF THE ADVANTAGES OF OPENGL OVER VULKAN IN THE DEVELOPMENT OF PYQT APPLICATIONS FOR THE VISUALISATION AND PROCESSING OF EXTRA-LARGE POINT CLOUDS

D. Ovchinnikov
A. Ovchinnikov

Summary. This article provides a comparative analysis of the effectiveness of the OpenGL and Vulkan graphics APIs in the development of PyQt6 applications for visualising ultra-large LiDAR point clouds. It examines the architectural limitations of the Python environment, in particular the impact of the Global Interpreter Lock on multi-threaded rendering and the overhead costs of data marshalling. It is shown that the use of Vertex Buffer Object technology in OpenGL provides stable visualisation of 40 million points at a frequency of 130–140 FPS, eliminating the need to switch to low-level Vulkan. An assessment of the complexity of integration with the Qt ecosystem, the NumPy library, and debugging tools was performed, demonstrating the advantages of a 'thick' OpenGL driver.

Keywords: point cloud, processing, applications, visualization.

Овчинников Данила Алексеевич
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Овчинников Алексей Николаевич
кандидат экономических наук, Тольяттинское высшее военное командно-инженерное строительное училище; Московский государственный строительный университет; Российский университет кооперации
inza73@gmail.com

Аннотация. В статье проведен сравнительный анализ эффективности графических API OpenGL и Vulkan при разработке приложений на PyQt6 для визуализации сверхбольших облаков точек LiDAR. Рассмотрены архитектурные ограничения среды Python, в частности влияние Global Interpreter Lock на многопоточный рендеринг и накладные расходы при маршаллинге данных. Показано, что использование технологии Vertex Buffer Object в OpenGL обеспечивает стабильную визуализацию 40 миллионов точек с частотой 130–140 FPS, нивелируя необходимость перехода на низкоуровневый Vulkan. Выполнена оценка сложности интеграции с экосистемой Qt, библиотекой NumPy и инструментами отладки, демонстрирующая преимущества «толстого» драйвера OpenGL.

Ключевые слова: облако точек, обработка, приложения, визуализация.

Визуализация массивов пространственных данных, представленных в виде облаков точек, превратилась из узкоспециализированной задачи в фундамент современных информационных систем в таких отраслях, как лесное хозяйство, цифровая картография, автономное вождение и архитектурное проектирование [1]. С развитием технологий LiDAR и фотограмметрии объем собираемых данных вырос экспоненциально: современные сканеры способны генерировать облака, содержащие десятки и сотни миллионов точек, что создает беспрецедентную нагрузку на графические подсистемы настольных приложений. В экосистеме языка программирования Python библиотека yQt6 является стандартом де-факто для построения профессиональных графических интерфейсов, однако выбор низкоуровневого графического API для рендеринга таких объемов данных остается предметом глубоких дискуссий среди системных архитекторов и инженеров-разработчиков [2].

Традиционно OpenGL считался основным инструментом для трехмерной графики, однако появление Vulkan в 2016 году как низкоуровневой альтернативы с минимальными накладными расходами заставило многих пересмотреть свои подходы. Тем не менее, детальный анализ показывает, что для разработки инженерных приложений на базе PyQt6, ориентированных на работу с облаками точек, OpenGL сохраняет существенные преимущества, обусловленные как архитектурными особенностями Python, так и зрелостью интеграционных механизмов Qt. В данном отчете рассматриваются технические, экономические и эксплуатационные причины, по которым OpenGL превосходит Vulkan в контексте создания специализированного программного обеспечения для обработки трехмерных сканов.

Архитектурные парадигмы графических интерфейсов в среде Python

Принятие решения о выборе графического API начинается с понимания того, как выбранная библиотека интерфейса, в данном случае PyQt6, взаимодействует с графическим стеком операционной системы. PyQt6

предоставляет два основных пути для встраивания высокопроизводительной графики: использование специализированных виджетов OpenGL (QOpenGLWidget) и создание окон на базе Vulkan (QVulkanWindow).

Интеграция и жизненный цикл QOpenGLWidget

Компонент QOpenGLWidget представляет собой высокоуровневую абстракцию, которая берет на себя наиболее сложные аспекты управления графическим контекстом. При использовании этого виджета разработчику не требуется вручную инициализировать графическую подсистему, управлять буферами кадра (framebuffers) или синхронизироваться с вертикальной разверткой монитора — все эти задачи делегируются фреймворку Qt [3].

В контексте облаков точек это означает, что инженер может сосредоточиться на реализации алгоритмов визуализации в методах initializeGL(), resizeGL() и paintGL(). Стабильность этой архитектуры подтверждается годами эксплуатации: OpenGL-контекст в Qt6 глубоко интегрирован с механизмом отрисовки самих виджетов, что позволяет бесшовно совмещать трехмерную сцену с двухмерными элементами управления, такими как меню, кнопки и диалоговые окна.

Барьеры внедрения QVulkanWindow

В противовес этому, использование QVulkanWindow требует от программиста явного управления всеми этапами работы графического процессора. Vulkan по своей природе лишен «скрытой магии» драйвера: создание экземпляра (instance), выбор физического устройства, логического устройства, создание очередей, настройка цепочки обмена (swapchain) и управление барьерами памяти ложится на плечи разработчика.

Для типичного приложения на Python, где целью является быстрая разработка инструмента для анализа данных, такая избыточность становится контрпродуктивной. Объем шаблонного кода (boilerplate), необходимого для отрисовки единственного треугольника в Vulkan, может достигать 1000–1500 строк, в то время как в OpenGL аналогичная задача решается за 100–200 строк. В условиях работы с облаками точек, где структура данных относительно проста (массивы вершин), сложность Vulkan не приносит адекватного выигрыша в функциональности, но значительно увеличивает вероятность критических ошибок при инициализации [4].

Технология Vertex Buffer Object как стандарт оптимизации

Исследования показывают, что использование технологии Vertex Buffer Object (VBO) в рамках OpenGL позволяет радикально повысить производительность визуализации в PyQt-приложениях. Суть метода заключается в однократной передаче геометрических данных в видеопамять (VRAM) графического процессора, что устраняет необходимость копирования миллионов точек через шину PCIe на каждом кадре.

Математически время формирования кадра без использования VBO можно представить как сумму времени работы центрального процессора (TCPU), времени передачи данных (Ttransfer) и времени отрисовки на GPU (TGPU):

$$T_{no_VBO_frame} = T_{CPU} + T_{transfer} + T_{GPU}.$$

При использовании VBO время передачи данных между кадрами ($T_{transfer}$) стремится к нулю, так как данные уже находятся в локальной памяти видеокарты. Таким образом, время кадра сокращается до:

$$T_{VBO_frame} = T_{min_CPU} + T_{GPU}.$$

где T_{min_CPU} включает лишь минимальные затраты на отправку команд рендеринга.

Экспериментальные данные подтверждают, что при визуализации 40 миллионов точек в приложении на PyQt6 переход к VBO увеличивает частоту кадров с нестабильных 0–20 FPS до стабильных 130–140 FPS.1

Таблица 1.

Сравнительные метрики производительности визуализации облака точек (40 млн элементов) в среде PyQt6

Метрика	Immediate Mode (без VBO)	Оптимизированный режим (с VBO)
Частота кадров (FPS)	~0–20	130–140
Стабильность отрисовки	Низкая, рывки при вращении	Высокая, плавная анимация
Загрузка CPU (%)	Высокая (непрерывная передача)	Низкая (обработка интерфейса)
Загрузка GPU (%)	Низкая (ожидание данных)	Высокая, равномерная
Использование видеопамяти	~0.5 ГБ	~1.5 ГБ
Время рендеринга кадра	Высокое, непредсказуемое	Умеренное, стабильное

Преимущество «толстого» драйвера OpenGL

Одним из наиболее значимых преимуществ OpenGL является наличие так называемого «толстого» драйвера. Производители видеокарт (NVIDIA, AMD, Intel) в течение десятилетий оптимизировали свои реализации OpenGL, встраивая в них сложные алгоритмы кэширования, управления памятью и автоматической оптимизации команд [5]. Для разработчика на Python это означает,

что многие ошибки в управлении ресурсами будут неявно исправлены или сглажены драйвером. Vulkan же предоставляет «тонкий» драйвер, который выполняет ровно то, что приказал программист. Если в приложении на Python из-за работы сборщика мусора (Garbage Collector) или задержек интерпретатора команды будут отправлены некорректно, Vulkan не сможет компенсировать эти недостатки, что приведет к деградации производительности или зависанию системы. В этом смысле OpenGL выступает в роли защитного слоя, обеспечивающего стабильно высокую скорость работы в условиях высокоуровневой среды Python [6].

Проблема Global Interpreter Lock и многопоточности

Основным преимуществом Vulkan является возможность формирования буферов команд в нескольких параллельных потоках, что теоретически позволяет полностью загрузить все ядра центрального процессора. Однако в стандартной реализации Python (CPython) существует механизм Global Interpreter Lock (GIL), который предотвращает одновременное выполнение байт-кода Python в нескольких потоках.

Следовательно, попытка реализовать многопоточный рендеринг в Vulkan на языке Python сталкивается с фундаментальным ограничением: потоки будут постоянно блокировать друг друга, ожидая доступа к интерпретатору. В результате накладные расходы на управление потоками в Python могут превысить выигрыш от использования Vulkan.14 OpenGL, будучи в значительной степени однопоточным и ориентированным на последовательную отправку команд, гораздо лучше ложится на архитектуру Python, позволяя эффективно использовать GPU без необходимости обхода ограничений GIL [7].

Накладные расходы на маршаллинг данных

Каждый вызов функции графического API из Python требует прохождения через слой связки (binding), такой как PyOpenGL или vulkan-python. Этот процесс включает преобразование типов данных Python в структуры C и обратно. Поскольку Vulkan требует на порядок большего количества вызовов API для выполнения тех же задач, что и OpenGL, суммарные затраты времени на маршаллинг данных в Python-приложении становятся значительными.

При работе с облаками точек в OpenGL разработчик может использовать массивы NumPy, которые могут быть переданы в видеопамять практически напрямую через указатели, что минимизирует участие интерпретатора в процессе отрисовки. В Vulkan же необходимость явного заполнения тысяч структур VkWriteDescriptorSet или VkBufferMemoryBarrier создает огромную вычислительную нагрузку на стороне CPU именно из-за интерпретируемой природы Python, что делает рендеринг менее эффективным, чем в «старом» OpenGL.

Совместимость и поддержка драйверов

OpenGL поддерживается практически любым графическим оборудованием, выпущенным за последние 20 лет. Это гарантирует, что PyQt-приложение для анализа облаков точек запустится и будет корректно работать как на мощной рабочей станции с NVIDIA RTX, так и на офисном ноутбуке со встроенной графикой Intel. Vulkan, несмотря на широкое распространение, все еще сталкивается с проблемами фрагментации драйверов. На старых видеокартах или бюджетных устройствах поддержка Vulkan может быть ограниченной, нестабильной или вовсе отсутствовать.

Проблемы оконных систем и Wayland

Современные дистрибутивы Linux активно переходят на протокол Wayland, что создает определенные трудности для графических приложений. Исследования показывают, что PyQt-приложения на базе OpenGL под Wayland могут сталкиваться с проблемами отрисовки виджетов или обработки событий окна [8]. Однако для OpenGL существуют отработанные механизмы обхода этих проблем.

Для Vulkan взаимодействие с Wayland в рамках PyQt6 реализовано менее прозрачно. Ошибки типа BadWindow или некорректное поведение при изменении размера окна чаще встречаются именно в новых Vulkan-реализациях, так как они не прошли такой длительный период тестирования сообществом, как связка Qt + OpenGL.

Жизненный цикл разработки и экономические факторы

Выбор технологии визуализации напрямую влияет на стоимость разработки, время выхода продукта на рынок (Time-to-Market) и сложность последующей поддержки.

Порог вхождения и дефицит кадров

Разработка на Vulkan требует от инженера глубоких знаний архитектуры современных GPU, понимания принципов работы конвейеров, барьеров памяти и ручной синхронизации. Найти Python-разработчика, обладающего такой квалификацией, крайне сложно. В то же время OpenGL предлагает высокоуровневую модель, которая понятна большинству специалистов, работающих с трехмерной графикой [9]. Для компании, разрабатывающей инструмент для лесного хозяйства или геодезии, использование OpenGL означает возможность привлечения более широкого круга специалистов и более быстрое обучение новых сотрудников.

Стоимость поддержки и отладки

Инструментарий для отладки OpenGL (такой как RenderDoc или gPA) оттачивался десятилетиями. Сообщения об ошибках в OpenGL, хотя иногда и бывают расплывчатыми, в большинстве случаев позволяют быстро идентифицировать проблему в стейт-машине [10]. В Vulkan ошибка в синхронизации может не проявляться на машине разработчика, но приводить к случайным зависаниям или «артефактам» на машине клиента с другой моделью видеокарты. Отладка таких проблем в высокоуровневой среде Python превращается в крайне трудоемкий процесс, требующий анализа дампов памяти и низкоуровневых вызовов драйвера. Использование OpenGL существенно снижает риски возникновения таких трудноуловимых багов, обеспечивая более стабильный цикл поддержки ПО.

Интеграция с инструментами анализа данных

Работа с облаками точек в PyQt6 редко ограничивается только визуализацией. Обычно она включает в себя интеграцию с библиотеками для научных вычислений и обработки данных.

Библиотека PyOpenGL имеет встроенную поддержку объектов NumPy, что позволяет передавать данные из результатов вычислений SciPy или алгоритмов машинного обучения прямо в видеопамять с минимальным копированием. Эта синергия является ключевым фактором популярности Python в научном сообществе. Vulkan, из-за своей строгой типизации и необходимости явного управления дескрипторами, требует написания сложных прослоек для интеграции с NumPy. Каждое изменение в структуре данных облака точек (например, добавление нового атрибута, такого как классификация точки) требует в Vulkan обновления описания пайплайна и дескрипторных сетов, в то время как в OpenGL достаточно изменить параметры в glVertexAttribPointer. Это делает OpenGL гораздо более гибким инструментом для исследовательских и аналитических задач, где структура данных может меняться в процессе разработки.

Сравнительный анализ инструментария Qt6

Qt6, как базовый фреймворк для PyQt6, прошел через значительную трансформацию графического стека. Появление Qt Rendering Hardware Interface (QRhi) позволило абстрагироваться от конкретного API, однако для разработчиков на Python прямой доступ к OpenGL через QOpenGLWidget остается наиболее документированным и стабильным путем.

Практические примеры и кейсы

В задачах лесного хозяйства, описанных в исходных материалах, ключевой потребностью является интерактивное взаимодействие с облаком: вращение, масштабирование и выделение отдельных деревьев для извлечения таксационных параметров.

Таблица 2.

Сравнение механизмов интеграции графики в PyQt6

Характеристика	QOpenGLWidget (OpenGL)	QVulkanWindow (Vulkan)
Сложность настройки	Минимальная (переопределение методов)	Максимальная (ручное управление пайплайном)
Совместимость с виджетами	Полная (можно накладывать кнопки поверх 3D)	Ограниченная (требует сложных техник смешивания)
Управление памятью	Автоматическое (на стороне драйвера)	Ручное (через пулы памяти и барьеры)
Отладка	Множество зрелых инструментов	Сложная (требует валидационных слоев)
Портативность	Linux, Windows, macOS (нативно/Legacy)	Windows, Linux, Android (через MoltenVK на macOS)
Поддержка Python GIL	Хорошая (однопоточная природа)	Плохая (GIL мешает многопоточному рендерингу)

Плавность взаимодействия

При визуализации 40 миллионов точек критически важна отзывчивость интерфейса при манипуляциях мышью. В режиме OpenGL с использованием VBO задержка между движением мыши и обновлением сцены минимальна, так как GPU самостоятельно обрабатывает трансформации матриц для данных, уже находящихся в памяти. В Vulkan, если разработчик не реализовал идеально эффективную систему управления очередями (что сложно сделать на Python), могут возникать микро-задержки (stuttering) из-за несвоевременной синхронизации кадров, что сильно портит пользовательский опыт.

Динамическое обновление данных

Если в процессе работы приложения необходимо динамически изменять облако (например, удалять точки, классифицированные как шум), OpenGL позволяет частично обновлять содержимое VBO через glBufferSubData. Это происходит быстро и интуитивно. В Vulkan для эффективного обновления данных часто требуется использование промежуточных (staging) буферов и явных команд копирования, что усложняет архитектуру приложения и увеличивает риск ошибок синхронизации, особенно при вызове из асинхронных функций Python.

Будущее графических API в контексте PyQt

Несмотря на очевидные преимущества OpenGL для текущих задач, индустрия продолжает двигаться в сторону более низкоуровневых абстракций. Однако для PyQt-разработчиков этот переход, скорее всего, будет осуществляться не через прямой переход на Vulkan, а через использование высокоуровневых оберток и новых стандартов, таких как WebGPU.5

Роль WebGPU и QRhi

WebGPU обещает предоставить возможности, близкие к Vulkan, но с безопасностью и простотой, сопоставимыми с OpenGL. В рамках Qt развитие интерфейса QRhi позволит в будущем переключать бэкенды рендеринга без переписывания всего кода визуализации. Тем не менее, на данный момент (2024–2025 гг.) реализация OpenGL в PyQt6 остается наиболее «отшлифованной» и надежной для коммерческого использования в тяжелых инженерных приложениях.

Выводы и рекомендации по выбору технологий

Проведенный анализ подтверждает, что для разработки приложений на PyQt, предназначенных для работы с облаками точек объемом в десятки миллионов элементов, OpenGL является оптимальным выбором. Его превосходство над Vulkan в данном специфическом контексте обусловлено не чистой производительностью графического чипа, а эффективностью всей системы: «язык — библиотека — драйвер — аппаратное обеспечение».

Основные аргументы в пользу OpenGL для PyQt-проектов:

1. Снижение рисков: зрелость OpenGL минимизирует вероятность критических ошибок, которые в Vulkan могут приводить к краху всего приложения или системы.
2. Скорость разработки: возможность быстрого прототипирования и реализации сложных визуальных эффектов с минимальным объемом кода.
3. Соответствие архитектуре Python: отсутствие конфликтов с GIL и меньшие накладные расходы на вызовы API делают OpenGL более быстрым в условиях интерпретируемой среды.
4. Достаточная производительность: технология VBO обеспечивает более чем достаточную частоту кадров (140 FPS) для комфортной работы с огромными массивами данных.

Таким образом, внедрение Vulkan в PyQt-приложения для облаков точек на текущем этапе развития технологий оправдано только в исключительных случаях, когда требуются специфические возможности (например, аппаратная трассировка лучей или крайне специфическое управление очередями), доступные только в новых API. Для подавляющего большинства прикладных задач в лесном хозяйстве, геодезии и строительстве OpenGL в связке с VBO остается золотым стандартом, обеспечивающим идеальный баланс между производительностью и надежностью.

Внедрение оптимизаций, описанных в исследовании (перенос данных в VRAM, использование эффективных шейдеров), позволяет создавать на базе PyQt6 инструменты мирового уровня, способные обрабатывать данные LiDAR с беспрецедентной скоростью, не жертвуя при этом гибкостью и мощью языка Python.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимохин П.Ю., Михайлюк М.В. Метод упорядочивания облаков точек для визуализации на конвейере трассировки лучей // Программирование. 2024. № 3. С. 42–53.
2. Сорокин М.И., Жданов Д.Д., Жданов А.Д. Создание полигональных сеток из облаков точек с помощью глубокого обучения для их визуализации в системах смешанной реальности // Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению «Графикон». 2023. № 33. С. 43–52.
3. Калинова Е.В., Лобкова Т.В. Технология создания модели ГУЗ по облаку точек в Revit Architecture // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2023. № 3. С. 173–178.
4. Горобцов С.Р. Анализ отечественного программного обеспечения для обработки данных лазерного сканирования // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2023. Т. 1. № 1. С. 65–72.
5. Токин А.А. Методика фильтрации облака точек методом скользящего конуса // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2025. Т. 30. № 5. С. 15–23.
6. Min Chen, Chengyu Zhou, Qi Lv A semantic segmentation method for vehicle-borne laser scanning point clouds in motorway scenes // The Photogrammetric Record. 2023. Volume 38, Issue 182. P. 22–29.
7. Егорчев А.А., Кашипов А.Р., Чикрин Д.Е., Аганов А.В., Павельев М.Н. Система машинного зрения для распознавания трехмерной структуры перинейрональных сетей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2025. Т. 27. № 2 (124). С. 156–169.
8. Гура Д.А. Разработка методики 3d-идентификации объектов на основе данных наземного лазерного сканирования // International Agricultural Journal. 2025. Т. 68. № 3.
9. Силантьева А.С. Классификация и сравнительный анализ методов трехмерной реконструкции объектов // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2023. Т. 14. № 4. С. 52–60.
10. Guoqiang Feng, Weilong Li, Xiaolin Zhao LessNet: Lightweight and efficient semantic segmentation for large-scale point clouds // IET Cyber-Systems and Robotics. 2022. Volume 4, Issue 2. P. 76–85.

© Овчинников Данила Алексеевич; Овчинников Алексей Николаевич (inza73@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.28

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ АВТОНОМНОГО РОБОТА

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR PATH PLANNING OF AN AUTONOMOUS ROBOT

D. Petrov

Summary. The application of modern mobile robotics and various types of autopiloted transportation requires efficient motion planning algorithms. Such an algorithm should build both a global trajectory and consider local terrain parameters and state parameters of the controlled object, sensor indicators. Neural networks and machine learning are one of the promising areas that can realize an algorithm with the above requirements. The paper analyzes the algorithms for planning the movement of autonomous mobile objects based on neural networks, the features of each method are considered. Classification of these methods by the level of control and the amount of data used about the environment and the state of the object. Based on the analysis, an approach is selected for further research of solving the problem of efficient motion planning.

Keywords: path planning, mobile robotics, neural networks, machine learning, reinforcement learning, deep learning.

Петров Денис Сергеевич
аспирант, ФГБОУ ВО Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары
amitie2104@gmail.com

Аннотация. Для применения современных средств мобильной робототехники и различных видов автопилотируемого транспорта требуются эффективные алгоритмы планирования перемещения. Подобный алгоритм должен строить как глобальную траекторию, так и учитывать локальные параметры местности и параметры состояния управляемого объекта, показатели сенсоров и прочее. Одним из перспективных направлений, которое может реализовать алгоритм с указанными требованиями, являются нейронные сети и машинное обучение. В работе проведен анализ алгоритмов планирования перемещения автономных подвижных объектов на основе нейронных сетей, рассмотрены особенности каждого метода. Проведена классификация данных методов по уровню управления и количеству используемых данных об окружении и состоянии объекта. На основе анализа выбирается подход для дальнейшего исследования решения проблемы эффективного планирования перемещения.

Ключевые слова: планирование перемещения, мобильная робототехника, нейронные сети, машинное обучение, обучение с подкреплением, глубокое обучение.

Введение

В современном мире, где технологии играют все большую роль, автономные системы управления стали одной из ключевых областей исследований. Одной из важных задач, стоящих перед разработчиками автономных систем, является планирование перемещения подвижных объектов, зачастую мобильных роботов разной конструкции, которое выполнять различные миссии, такие как доставка грузов, мониторинг окружающей среды, поисково-спасательные операции и многие другие.

Планирование перемещения автономных подвижных объектов является сложной задачей, которая требует учета множества факторов, таких как ограничения на перемещение, время выполнения задач, взаимодействие с окружающей средой и другими объектами, а также обеспечение безопасности и надежности системы. В связи с этим, существует множество алгоритмов и методов, которые могут быть использованы для решения этой задачи [1].

Алгоритмы планирования перемещения можно подразделить на классические и эвристические, также существуют гибридные методы, сочетающие в себе классический и эвристический подход [2]. Классические методы являются первым методами планирования, они, как правило, требуют больших вычислительных затрат и зачастую больших данных об окружении. К числу классических относят графоаналитические методы, потенциальные поля, дорожные карты [3]. Эвристические методы известны большей автономностью в неопределенном окружении. К эвристическим можно отнести алгоритмы нечеткой логики, биоинспирированные методы (генетический алгоритм, муравьиный алгоритм и другие) и методы на основе нейронных сетей.

Нейронные сети были впервые предложены для решения задачи планирования перемещения в 1995 году [4], описанный в статье метод позволял контролировать перемещение робота с меньшими вычислительными и энергетическими затратами в условиях как неподвижных, так и подвижных препятствий, что выгодно выделяло его на фоне классических подходов.

В то время как классические и эвристические подходы сформировали основу для решения задач планирования перемещения, их применение часто сталкивается с ограничениями в условиях высокой неопределённо-

сти, динамически меняющейся среды или при работе с неполными данными [5,6]. Эти методы, как правило, требуют точных моделей окружения и могут демонстрировать недостаточную гибкость в реальных сценариях.

В связи с этим, в последние годы активно развивается направление, использующее нейронные сети для формирования стратегий планирования. Данные методы позволяют обучаться на опыте, обобщать сложные пространственные зависимости и адаптироваться к изменяющимся условиям без явного программирования правил.

Цель настоящего обзора — систематизировать и проанализировать ключевые работы в области нейросетевого планирования перемещения, опубликованные преимущественно в период с 2019 по 2024 год. Основное внимание уделяется архитектурам, способам обучения и практическим результатам, достигнутым в различных прикладных областях.

Состояние проблемы

На данное время существует множество работ в данной области, которые можно классифицировать различным образом [7, 8, 9, 10, 11]. Основные алгоритмы нейронных сетей в планировании пути робота включают алгоритм Q обучения, алгоритм SARSA, алгоритм R-обучения, использование сверточных нейронных сетей и сетей долгой краткосрочной памяти.

Первые попытки применения нейронных сетей в задачах планирования движения опирались на стандартные архитектуры прямого распространения и свёрточные сети, адаптированные к специфике робототехнических задач. В работе [12] предложена система на основе полносвязной нейронной сети с небольшим числом слоев для планирования движения в неизвестном окружении. Благодаря алгоритму обучения и использованию анализа главных компонент удалось достичь высокой эффективности с учетом данных сенсоров и ограничений скорости робота. Одним из вариантов улучшения работы также может стать изменение архитектуры [13], авторами предложена модель каскадной нейронной сети, позволяющей точнее обходить препятствия и декомпозировать многомерную задачу классификации среды на отдельные задачи классификации. Другим вариантом может стать специфичный состав узлов сети [14] с итоговой структурой, которая позволила воспроизвести классические алгоритмы планирования перемещения, полученная путем использования набора многослойных нейронных сетей без обучения. Для решения проблем масштабируемости при генерации пути перемещения как для одного, так и для нескольких роботов, был предложен подход [15] на основе FCN (Fully Convolutional Networks) и двунаправленного поиска. Особенностью предложенного метода является генерация за одну итерацию в противовес устоявшимся итерационным алгоритмам. Также FCN были использованы в [16] для планирования движения с учетом затрат на перемещение, под которыми понимается время, энергия и расход иных ресурсов. Другим способом решений проблемы масштабирования может быть [17] модифицированная модель нейронной сети Хопфилда, что ускорила построение нейронной карты в 1,5–2,5 раза в зависимости от параметров рабочего пространства. Алгоритмы корректировки траектории сохраняют эффективность планирования при неполной информации и появлении препятствий. Подобные алгоритмы [18] (2019) могут быть оптимизированы достижения требуемой точности движения за небольшое число итераций обучения.

Важным ограничением рассмотренных подходов оставалась их привязка к конкретному типу робота и размеру рабочего пространства, что существенно затрудняло перенос моделей между различными платформами.

Альтернативный подход к использованию нейронных сетей в целях планирования перемещения предполагает их использование для улучшения отдельных компонентов классических алгоритмов, таких как A*, D* или их вероятностные варианты. Основная идея состоит в том, чтобы обучить сеть предсказывать значения, которые в классическом алгоритме вычисляются перебором или аналитически, но делать это быстрее и точнее за счёт обобщения паттернов, извлечённых из данных. Возникает широкий спектр гибридных методов, где нейросетевые модели используются для усиления классических алгоритмов. Так в работе [19] нейросеть была обучена имитировать поведение алгоритма D*, при этом на этапе обучения из рассмотрения исключались ситуации без столкновений — это позволило сконцентрировать обучение на наиболее опасных сценариях и повысить качество работы алгоритма в сложных условиях без потери вычислительной эффективности. Схожим образом был модифицирован алгоритм A* [20], где традиционная эвристика заменена нейросетевой моделью на основе графовых нейронных сетей. По результатам экспериментов, предложенное решение демонстрирует выигрыш по времени перепланирования, числу корректировок маршрута и его суммарной длине относительно базовой версии алгоритма A*. В [21] предлагается модификация гибридного A* путем применения глубокого обучения с подкреплением с добавлением двунаправленного поиска в гибридный алгоритм A*. Также классические алгоритмы переформулируют и объединяют с различными архитектурами [22], после чего планировщик кодирует условия среды в навигационную карту с помощью свёрточного энкодера и выполняет на её основе поиск. Схожим образом [23] алгоритмы машинного обучения можно дополнить поиском по дереву Монте-Карло

и сверточной нейронной сетью для уменьшения вычислительной нагрузки и перепланирования пути на ходу.

Еще одним способом улучшить уже существующие алгоритмы можно назвать [24] работу, сочетающую применение средств нечеткой логики и нейронных сетей. Автор экспериментально доказывает эффективность гибридного подхода, сочетающего гладкую траекторию, высокую точность работы и меньшие временные затраты на движение.

Подходы, рассмотренные выше, объединяет общая черта: нейронные сети обучаются на размеченных данных, будь то траектории, построенные классическими алгоритмами, или данные о правильном движении в определенных местностях. Такой способ обучения требует наличия знаний о том, какое поведение является подходящим для успешного движения или же наблюдения учителя для подтверждения правильности работы. Методы обучения с подкреплением предлагают другой подход: агент обучается эффективному поведению [25] путем взаимодействия со средой [26], получая обратную связь в форме вознаграждения [27, 28]. Работы в данной области [29] демонстрируют, что даже относительно простые архитектуры, обученные методом проб и ошибок в симуляторе, можно перенести на реальные робототехнические платформы с минимальным дообучением или вовсе без него. Это делает обучение с подкреплением особенно привлекательным для задач, где сбор данных на реальной системе затруднён, дорогостоящ или небезопасен, однако существует возможность создания адекватной модели среды для тренировки в виртуальном пространстве. Так [30] было исследовано применение робототехнического комплекса для автоматизированного сбора урожая в условиях теплицы и для управления данным комплексом предлагается использовать глубокую рекуррентную нейронную сеть DRQN. Для оптимизации её весов авторы применили обучение с подкреплением и экспериментально доказали применимость и эффективность предложенного метода. В работе [31] авторы предлагают подход с модифицированным DQN алгоритмом и дополненный путем проектирования системы вознаграждений, сетевой архитектуры и воспроизведения опыта, что позволило улучшить работоспособность в условиях сложного окружения и превзойти традиционные подходы к планированию траектории движения робота в условиях сложного окружения. Для решения проблемы дообучения был разработан [32] подход с использованием глубокого Q-обучения и коэффициента затухания обучения для сохранения эффективности движения при изменении параметров окружения, что позволяет роботу быть одинаково эффективным в разных помещениях и локациях. Также был предложен [33] улучшенный алгоритм двойной Q-сети с двойным Q-параметром (ID3QN), основанный на асимметричной структуре нейронной сети. В сравнении с классическими алгоритмами, разработанный алгоритм сократил длину пути и сошелся быстрее. В [34] предложена методика с алгоритмом глубокой детерминированной политики с двойной задержкой, эффективный для марковских процессов с непрерывными действиями. Входными данными служат показания сенсоров аппарата о окружающей среде, при этом планирование осуществляется без предварительных знаний о среде. Система использует комплексную функцию вознаграждения и демонстрирует устойчивость к океаническим течениям. Также была предложена структура системы управления [35], интегрирующая несколько эффективных подходов. В её основе — Rainbow DQN, дополненная сетью актор-критик, преобразовывает зашумленные данные датчиков и целевые навигационные параметры, и выдающая команды перемещения, которые преобразуются в управляющие воздействия с помощью сети актор-критик. Предложенная структура позволяет исследовать возможность синергетического сочетания нейросетевых архитектур, показавших высокую результативность в задачах интеллектуальной навигации роботов. В работе [36] представлен алгоритм планирования траектории, основанный на глубоком обучении с подкреплением и использующий два пула опыта для воспроизведения данных. Ключевая особенность метода — сегментация данных между пулами и динамическая регулировка соотношения их использования, что способствует ускорению обучения модели. Алгоритм был апробирован в ходе симуляции с роботом Turtlebot3. Результаты показывают, что предложенный подход превосходит классические алгоритмы DQN и Double DQN по скорости сходимости и итоговой точности планирования траектории.

В исследованиях, посвященных обучению с подкреплением для задач навигации, активно развиваются иерархические и многослойные архитектуры. Такие методы позволяют разделить сложную задачу планирования на несколько уровней абстракции, что часто приводит к повышению эффективности и надежности получаемых решений. В частности, это достигается за счет комбинирования стратегий, работающих с информацией разного масштаба — от долгосрочного планирования до локального избегания препятствий. К примеру, в работе [37] был предложен многослойный алгоритм планирования траектории на основе Q обучения, но в отличие от классического Q-обучения, данный подход объединяет глобальную и локальную информацию, что повышает эффективность планирования. Алгоритм включает два слоя: верхний обрабатывает локальную информацию, нижний — глобальную. Для сглаживания траектории в реальном времени применяется метод B-сплайнов. Результаты моделирования в различных сценариях подтверждают эффективность многослойного алгоритма. Несколько похожим образом в статье [38] представлен алгоритм планирования траектории, использующий топологическую карту. Алгоритм имеет

двухуровневую структуру. На первом уровне с помощью метода динамического роста регионов формируется топологическая область на основе сетки карты. На втором уровне применяется двухслойный алгоритм Multi-SARSA для поиска почти оптимальной глобальной траектории. Для ускорения обучения первая Q-таблица инициализируется методом искусственного потенциального поля, вторая — данными связной области, полученной из топологической карты, что обеспечивает использование априорной информации. Результаты имитационных экспериментов подтверждают, что предложенный метод позволяет находить траектории с меньшей длиной пути, демонстрируя свою эффективность. f — d

Также особый интерес вызывают работы, посвященные конкретным примерам практического применения мобильных роботов и БПЛА [39] под управлением алгоритмов на основе машинного обучения. Такие алгоритмы зачастую настроены на учет специфичных параметров робота, вроде его размеров или данных сенсоров [40], и минимизацию затрат ресурсов [41, 42]. Как показано в [43], глубокое обучение с подкреплением для дронов позволяет рассчитывать оптимальные траектории для уклонения от препятствий, что ведет к снижению расхода пестицидов и общего энергопотребления, упрощая работы в сельскохозяйственной сфере. Примером учета специфики робота может выступить [44], где предложена комплексная система передвижения, с учетом использования четвероногого робота размера меньше среднего с одной камерой глубины. Небольшой размер робота требует поиска особых моделей походки. Для этого в ходе обучения используются дополнительные параметры: массив точек расстояния, данные об углах сервоприводов робота и данные окружения. Схожим образом данные о размерах робота используются в [45], где предлагается подход к уменьшению энергетических затрат перемещения четвероногих роботов. Был использован алгоритм TD3, также учитывалась длина конечностей робота и угол поворота сервоприводов, при обучении параметрами оптимизации были энергозатраты на перемещение и длина пути. Подобные алгоритмы учеты данных сенсоров применимы и к БПЛА [46], где авторы обучают робота автономному полёту в динамически загромождённой среде с помощью глубокого обучения с подкреплением при учете данных лидара и камеры для более точного распознавания препятствий. Еще одним способом более тонкой работы с роботом можно назвать [47] с методом планирования траектории для неголономного мобильного робота при разворотах на узких участках дороги. Предложенный подход применяет глубокую Q-сеть для выработки стратегии управления роботом на узких участках. В процессе обучения робот определяет оптимальные команды скорости, обеспечивающие максимизацию долгосрочного вознаграждения. Функция вознаграждения сконструирована таким образом, чтобы достижение цели происходило с минимальным изменением скорости и минимальным количеством разворотов. С другой стороны подошли в [48], где ввели специализированная функцию вознаграждения, включающая «штраф за выживание», который мотивирует объект обучения достичь цели за наименьшее время, тем самым косвенно поощряя эффективные и безопасные траектории, что подтверждает важность выбора архитектуры и функции вознаграждения при интеграции восприятия и планирования. Также интересны сочетания подходов как в статье [49], объединяющий преимущества оптимизации проксимальной политики с интерактивным множественным модельным фильтром Калмана для улучшенной оценки состояния и адаптивного планирования траектории навигации летающих дронов в динамических средах.

Развитие получили и методы комплексной работы совместно работающих роботов или агентов. Основная сложность заключается в необходимости обеспечения не только локальной навигации каждого агента, но и глобальной согласованности действий всей системы для достижения общей цели, такой как совместное картографирование, распределённая доставка или коллективное избегание столкновений. В этой области нейросетевые методы, особенно основанные на обучении с подкреплением, демонстрируют значительный потенциал. Ключевым направлением является разработка архитектур, позволяющих агентам обучаться совместным стратегиям. Так в статье [50] предложена динамическая модель многоцелевого планирования траектории, построенная на основе многоагентного обучения с подкреплением. Архитектура модели включает два ключевых модуля: модуль оценки действий и модуль принятия решений. Они реализованы в рамках парадигмы «централизованное обучение — децентрализованное выполнение» (CTDE), где в процессе обучения доступна глобальная информация, но каждый агент в процессе эксплуатации действует автономно, основываясь только на своих локальных наблюдениях. В процессе обучения агенты внутри кластера совместно вырабатывают кооперативные стратегии, имея возможность коммуникации. Это позволяет им впоследствии эффективно действовать в среде без постоянного обмена данными, находя бесконфликтные траектории. Для реализации безопасного многоагентного движения в [51] авторы предлагают использование нейронной сети на основе сети Конохена с добавлением специальных правил и псевдоцелей движения.

Обсуждение

Исходя из работ, рассмотренных выше, можно выделить некоторые особенности современных алгоритмов нейронных сетей (таблица 1).

Помимо указанных особенностей и описанных методов существует специфичные для разных видов подвиж-

Таблица 1.
Особенности применяемых алгоритмов нейронных сетей

Особенность	Решаемая проблема	Условия применения
Коэффициент затрат	Позволяет оптимизировать расход ресурсов	Требуется наличие специальной функции, оценивающей затраты за единицу расстояния, или комплексной карты проходимости с рассчитанным коэффициентом
Состояние объекта	В случае роботов с ногами отслеживает положение суставов или сервоприводов, в общем случае, данные о центре масс, угле поворота и показания сенсоров для надежной работы	Может выступать дополнительным параметром при обучении нейронной сети или дополнительным правилом в общей структуре
Уровень управления	Может быть глобальным и составлять траекторию заранее по карте, может быть локальным и реагировать на наличие препятствий на глобальном пути.	Зависит от выбранной архитектуры, данных обучения и наличия возможности видеть локальные препятствия
Гибридность	Позволяет сочетать преимущества других алгоритмов, зачастую не нейросетевых, для уменьшения вычислительных затрат и нахождения эвристических решений	Требуются подходящие данные о траекториях для обучения в случае классических алгоритмов планирования перемещения или возможность модификации архитектуры

ных объектов алгоритмы перемещения, которые можно было бы классифицировать как алгоритмы перемещения наземных, воздушных или водных автономных объектов, однако они по большей части являются модификацией одного из ранее упомянутых классических или эвристических методов.

Заключение

В ходе анализа было выявлено, что существующие подходы по большей части либо не учитывают специфику встроенных сенсоров и систем мобильного робота, что ограничивает применение данных методов при наличии подвижных препятствий в целевой зоне, либо не учитывают практического применения роботов и обучают их в относительно стабильных условиях. Таким образом, вопрос эффективной работы в неопределенной среде все остается актуальным, что требует дальнейшей работы в данной области.

Исходя из вышеописанного можно сделать вывод, что наиболее перспективным подходом к эффективному планированию пути является метод глубокого обучения с подкреплением, способный учитывать данные об окружении и эффективно использовать данные о состоянии управляемого объекта, такие как показания сенсоров и конфигурация объекта в пространстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / Д.А. Белоглазов, Е.Ю. Косенко, М.Ю. Медведев [и др.]. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2014. — 296 с.
2. Казаков К.А. Обзор современных методов планирования движения / К.А. Казаков, В.А. Семенов // Труды Института системного программирования РАН. — 2016. — Т. 28. — № 4. — С. 241–294.
3. Лю В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) //Математика и математическое моделирование. — 2018. — №. 1. — С. 15–58.
4. Glasius R., Komoda A., Gielen S.C.A.M. Neural network dynamics for path planning and obstacle avoidance //Neural Networks. — 1995. — Т. 8. — №. 1. — С. 125–133.
5. Katona K., Neamah H. A., Korondi P. Obstacle avoidance and path planning methods for autonomous navigation of mobile robot //Sensors. — 2024. — Т. 24. — №. 11. — С. 3573.
6. Yang L. et al. Path planning technique for mobile robots: A review //Machines. — 2023. — Т. 11. — №. 10. — С. 980.
7. K. Zhu and T. Zhang, «Deep reinforcement learning based mobile robot navigation: A review,» in Tsinghua Science and Technology, vol. 26, no. 5, pp. 674–691, Oct. 2021, doi: 10.26599/TST.2021.9010012.
8. Sun Huihui & Zhang Weijie & Y.U., Runxiang & Zhang Yujie. (2021). Motion Planning for Mobile Robots—Focusing on Deep Reinforcement Learning: A Systematic Review. IEEE Access. PP. 1–1. 10.1109/ACCESS.2021.3076530.
9. Singh R., Ren J., Lin X. A review of deep reinforcement learning algorithms for mobile robot path planning //Vehicles. — 2023. — Т. 5. — №. 4. — С. 1423-1451.
10. Okereke C.E. et al. An overview of machine learning techniques in local path planning for autonomous underwater vehicles //IEEE Access. — 2023. — Т. 11. — С. 24894–24907.
11. Xiao X. et al. Motion planning and control for mobile robot navigation using machine learning: a survey //Autonomous Robots. — 2022. — Т. 46. — №. 5. — С. 569–597.

12. Shamsfakhr Farhad, Sadeghibigham Bahram. (2017). A neural network approach to navigation of a mobile robot and obstacle avoidance in dynamic and unknown environments. TURKISH JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING & COMPUTER SCIENCES. 25. 1629–1642. 10.3906/elk-1603–75.
13. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Васильева М.А. Нейросетевая система управления движением робота //XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019. — 2019. — С. 2130–2134.
14. Kulvicius T., Herzog S., Tamosiunaite M., Wörgötter F. Finding optimal paths using networks without learning—Unifying classical approaches //IEEE transactions on neural networks and learning systems. — 2021. — Т. 33. — №. 12. — С. 7877–7887.
15. Kulvicius T., Herzog S., Lüddecke T., Tamosiunaite M., & Wörgötter F. One-shot multi-path planning using fully convolutional networks in a comparison to other algorithms //Frontiers in Neurorobotics. — 2021. — Т. 14. — С. 600984.
16. Bian T., Xing Y., Zolotas A. End-to-End One-Shot Path-Planning Algorithm for an Autonomous Vehicle Based on a Convolutional Neural Network Considering Traversability Cost //Sensors. — 2022. — Т. 22. — №. 24. — С. 9682.
17. Юдинцев Б.С. Синтез нейросетевой системы планирования траекторий для группы мобильных роботов //Системы управления, связи и безопасности. — 2019. — №. 4. — С. 163–186.
18. Шестова Е.А. Разработка интеллектуальной системы управления автономным подвижным объектом на основе нейронной сети / Е.А. Шестова, О.В. Косенко, Е.Ю. Косенко // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ. — 2019. — Т. 3. — С. 3–7.
19. Фархуд А.К. Управление мобильным роботом с применением нейронной сети для планирования движения в некартографированной среде с препятствиями / А.К. Фархуд. — Текст: электронный // Известия ЮФУ. — (Технические науки). — 2021. — №6 (223). — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-mobilnym-robotom-s-primeneniem-neyronnoy-seti-dlya-planirovaniya-dvizheniya-v-nekartografirovannoy-srede-s.
20. Хачумов М.В. Решение задачи формирования строя бпла с применением нейронной сети и системы правил //Пятый Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта»(БТС-ИИ-2019): Труды семинара.–Переславль-Залесский: Российская ассоциация искусственного интеллекта, 2019.–264 с. — 2019. — С. 114.
21. Liu H. et al. Deep reinforcement learning for mobile robot path planning //arXiv preprint arXiv:2404.06974. — 2024.
22. Yonetani R. et al. Path planning using neural a* search //International conference on machine learning. — PMLR, 2021. — С. 12029-12039.
23. Rückin J., Jin L., Popović M. Adaptive informative path planning using deep reinforcement learning for uav-based active sensing //2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). — IEEE, 2022. — С. 4473–4479.
24. Mirza N. Robotic path planning and fuzzy neural networks //Int. Arab J. Inf. Technol. — 2020. — Т. 17. — №. 4A. — С. 615–620.
25. Hu Y., Yang L., Lou Y. Path planning with q-learning //Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2021. — Т. 1948. — №. 1. — С. 012038.
26. Vashisth A. et al. Deep reinforcement learning with dynamic graphs for adaptive informative path planning //IEEE Robotics and Automation Letters. — 2024. — Т. 9. — №. 9. — С. 7747–7754.
27. Залогин Н.Е., Григорьев Д.С. Об обучении интеллектуальных агентов в виртуальной среде для задачи управления роботом-манипулятором //Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. — 2024. — Т. 2. — №. 3. — С. 1–8.
28. Лукин Д.С., Косенко Е.Ю. Нейросетевой метод планирования пути в двумерном пространстве //Системы анализа и обработки данных. — 2023. — №. 4 (92). — С. 55–68.
29. Сидоренко А.В. Обучение с подкреплением при навигации мобильных роботов //Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. — 2021. — №. 12. — С. 21–24.
30. Петренко В.И. и др. Метод управления робототехническим комплексом на основе глубокого обучения с подкреплением рекуррентных нейронных сетей для автоматического сбора тепличных культур //Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений (ITTDS'2020). — 2020. — С. 78–85.
31. Deguale D.A. et al. Enhancing stability and performance in mobile robot path planning with pmr-dueling dqn algorithm //Sensors. — 2024. — Т. 24. — №. 5. — С. 1523.
32. Kumaar A.A.N., Kochuvila S. Mobile service robot path planning using deep reinforcement learning //IEEE Access. — 2023. — Т. 11. — С. 100083–100096.
33. Wu Z. et al. A novel path planning approach for mobile robot in radioactive environment based on improved deep Q network algorithm //Symmetry. — 2023. — Т. 15. — №. 11. — С. 2048.
34. Hadi B., Khosravi A., Sarhadi P. Deep reinforcement learning for adaptive path planning and control of an autonomous underwater vehicle //Applied Ocean Research. — 2022. — Т. 129. — С. 103326.
35. Звонарев И.С., Караваев Ю.Л. Анализ систем управления мобильных роботов с элементами интеллектуального управления //» Выставка инноваций-2021»(осенняя сессия). — 2021. — С. 62–67.
36. Yu J. et al. An Improved Deep Reinforcement Learning-based Path-planning Algorithm with Dual-experience Pool //Proceedings of the 2024 3rd International Symposium on Control Engineering and Robotics. — 2024. — С. 168–174.
37. Cui Z., Wang Y. UAV path planning based on multi-layer reinforcement learning technique // IEEE Access. — 2021. — Т. 9. — С. 59486–59497.
38. Wen S. et al. A hierarchical path planning approach with Multi-SARSA based on topological map //Sensors. — 2022. — Т. 22. — №. 6. — С. 2367.
39. Tullu A. et al. Machine learning approach to real-time 3D path planning for autonomous navigation of unmanned aerial vehicle //Applied Sciences. — 2021. — Т. 11. — №. 10. — С. 4706.
40. Sivashangaran S., Eskandarian A. Deep Reinforcement Learning for Autonomous Ground Vehicle Exploration Without A-Priori Maps // arXiv preprint arXiv:2301.04036. — URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.04036
41. Luo H. et al. Intelligent logistics management robot path planning algorithm integrating transformer and gcn network //arXiv preprint arXiv:2501.02749. — 2025.
42. Wang W. et al. Multiple unmanned aerial vehicle autonomous path planning algorithm based on whale-inspired deep Q-network //Drones. — 2023. — Т. 7. — №. 9. — С. 572.

43. Huang Y.Y. et al. Automatic path planning for spraying drones based on deep q-learning // Journal of Internet Technology. — 2023. — Т. 24. — №. 3. — С. 565–575.
44. Agarwal A., Ashish Kumar, Jitendra Malik, Deepak Pathak Legged Locomotion in challenging terrains using egocentric vision / A. Agarwal, A. Kumar, J. Malik, D. Pathak // 6th Conference on Robot Learning (CoRL 2022), Auckland, New Zealand. — URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.07638
45. Zhu W., Rosendo A. «PSTO: Learning Energy-Efficient Locomotion for Quadruped Robots». Machines 2022, 10, 185.
46. Рощупкин М.Э. Алгоритмы избегания препятствий для БПЛА в динамической среде на основе глубокого обучения с подкреплением //Вестник науки. — 2025. — Т. 1. — №. 4 (85). — С. 430–437.
47. Nakamura T., Kobayashi M., Motoi N. Path planning for mobile robot considering turnabouts on narrow road by deep Q-network //IEEE Access. — 2023. — Т. 11. — С. 19111–19121.
48. Jeng S.L., Chiang C. End-to-End Autonomous Navigation Based on Deep Reinforcement Learning with a Survival Penalty Function //Sensors. — 2023. — Т. 23. — №. 20. — С. 8651.
49. Marino F., Guglieri G. Beyond Static Obstacles: Integrating Kalman Filter with Reinforcement Learning for Drone Navigation //Aerospace. — 2024. — Т. 11. — №. 5. — С. 395.
50. Tao M., Li Q., Yu J. Multi-Objective Dynamic Path Planning with Multi-Agent Deep Reinforcement Learning //Journal of Marine Science and Engineering. — 2024. — Т. 13. — №. 1. — С. 20.
51. Хачумов М.В. Решение задачи формирования строя БПЛА с применением нейронной сети и системы правил //Пятый Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта»(БТС-ИИ-2019): Труды семинара. — Переславль-Залесский: Российская ассоциация искусственного интеллекта, 2019. — 264 с. — 2019. — С. 114.

© Петров Денис Сергеевич (amitie2104@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.30

МАКСИМИЗАЦИЯ КАЧЕСТВА ПОСТАВЛЯЕМОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЦЕННОСТИ ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ ПОТЕНЦИАЛЕ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

MAXIMIZING THE QUALITY OF THE SUPPLIED TECHNOLOGICAL VALUE WITH THE LIMITED POTENTIAL OF THE ORGANIZATIONAL SYSTEM

A. Petrunina
N. Tsygankov
A. Moskalev

Summary. Industrial enterprises in the high-tech sector are characterized by the task of creating a complex technological value for the customer under strict constraints characterized by a fixed internal potential, set deadlines and an acceptable level of risk. Existing management approaches either focus on maximizing internal economic efficiency or require complex adaptation without offering tools to quantify the achievable quality level. In this regard, the goal was set to develop principles and tools for determining the optimal (maximum achievable) level of quality of the supplied technological value, based on the current capabilities of the organizational system, time frame and acceptable risk. The author's probabilistic model is proposed, which establishes a relationship between the probability of project success and the parameters of quality requirements, potential and activity of the system. Based on the model, the existence of an area of fundamentally impossible requirements with given resources is proved. Three management patterns have been identified: 1) stricter quality requirements lead to a decrease in the probability of successful completion of the project on time; 2) for any system with a fixed potential, there is a threshold of requirements, exceeding which makes the project unrealizable even with a significant increase in time; 3) raising the quality bar shifts the most likely duration of the project upward. The proposed approach allows for an objective assessment and coordination of realistic quality parameters with the customer at the planning stage, minimizing the risks of project failure.

Keywords: organizational system potential, technological value, quality.

Петрунина Анастасия Эдуардовна
старший преподаватель,
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск
kafedra_efit@bk.ru
Цыганков Никита Сергеевич
кандидат технических наук, доцент,
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск
cyganikita@yandex.ru
Москалев Александр Константинович
кандидат физико-математических наук, доцент,
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск
amoskalev@sfu-kras.ru

Аннотация. Для промышленных предприятий высокотехнологичного сектора характерна задача создания сложной технологической ценности для заказчика в условиях жестких ограничений, характеризующихся фиксированным внутренним потенциалом, заданными сроками и допустимым уровнем риска. Существующие управленческие подходы либо фокусируются на максимизации внутренней экономической эффективности, либо требуют сложной адаптации, не предлагая инструментов для количественной оценки достижимого уровня качества. В связи с чем была поставлена цель — разработка принципов и инструментария для определения оптимального/максимально достижимого уровня качества поставляемой технологической ценности, исходя из текущих возможностей организационной системы, временных рамок и приемлемого риска.

Предложена авторская вероятностная модель, устанавливающая связь между вероятностью успеха проекта и параметрами требований к качеству, потенциалом и активностью системы. На основе модели доказано существование области принципиально невыполнимых требований при заданных ресурсах. Выявлены три управленческие закономерности: 1) ужесточение требований к качеству ведет к снижению вероятности успешного завершения проекта в установленные сроки; 2) для любой системы с фиксированным потенциалом существует порог требований, превышение которого делает проект нереализуемым даже при значительном увеличении времени; 3) повышение планки качества сдвигает наиболее вероятный срок реализации проекта в сторону увеличения. Предложенный подход позволяет на этапе планирования объективно оценить и согласовать с заказчиком реалистичные параметры качества, минимизируя риски срыва проекта.

Ключевые слова: потенциал организационной системы, технологическая ценность, качество.

Промышленные предприятия высокотехнологичного сектора играют ключевую роль в экономическом развитии, что обуславливает важность совершенствования их организационных систем. В условиях ограниченности ресурсов и возрастающих требований к качеству продукции необходимы новые управленческие механизмы, обеспечивающие их устойчивость в нестабильных условиях внешней сред.

В исследованиях, результаты которых опубликованы ранее [1–3], нами предполагается, что для высокотехнических производств устойчивость организационной системы зависит от предъявляемых требований к качеству поставляемой технологической ценности, потенциала и активности организационной системы. Утверждение, лежащее в парадигме общемировых обсуждений тенденций взаимного влияния инноваций на качество создаваемой продукции, подтверждаются многочисленными публикациями на основе анализа аналитических исследований современных предприятий различных передовых производств [4–7].

Исследование на эмпирических данных, представленное в работе [8], свидетельствует, что для эффективного внедрения инноваций и достижения высокого качества необходимы адаптивные методики, выбор которых зависит от конкретных временных и ситуационных условий.

В теоретическом плане представляет интерес методологическая разработка [9], направленная на преодоление фундаментального противоречия в управлении между необходимостью ускорения принятия решений (в условиях ограниченного времени) и требованием повышения их качества (что обычно требует времени на сбор и анализ информации). В его основе предлагается пятиэтапный алгоритм, охватывающий цикл от выявления проблемной ситуации до контроля реализации решения, с явным акцентом на итерационный характер уточнения исходных данных. Для формализации процесса оценки альтернатив в условиях полной неопределенности используется аппарат теории латентных переменных, а именно модель Раша, позволяющая проводить не только ранжирование вариантов, но и оценивать их чувствительность к изменению внешних сценариев. Однако для прямого практического применения в задачах клиентоориентированного планирования поставки ценности предложенный подход требует существенной контекстуализации и развития. Клиент рассматривается как внешний фактор, влияющий на сценарии. Его активная роль как источника требований к качеству, обратной связи и со-создателя ценности в модели не отражена. Удовлетворение клиента не является явной целевой функцией, а выступает как следствие минимизации рисков. Практическое использование модели Раша и калибровка марковской модели требуют высокой квалификации аналитиков и наличия соответствующих программных средств. В условиях оперативного управления на промышленном предприятии это может стать барьером.

Другой рассмотренный подход предлагает комплексную систему многоуровневого планирования, интегрирующую стратегический, тактический и оперативный контуры управления в условиях неопределенности [10]. Его сильной стороной является системность и явный акцент на управлении рисками для оптимизации внутренних экономических показателей предприятия (прибыль, загрузка мощностей). Однако в данной модели критерии, непосредственно связанные с созданием ценности для клиента — качество, скорость, удовлетворенность — не заложены в качестве целевых.

Проведенный анализ выявил существенный пробел в существующих исследованиях. Отсутствуют комплексные решения, которые, с одной стороны, учитывали бы ограниченность внутреннего потенциала системы и стохастичность внешней среды, а с другой — фокусировались бы не на максимизации внутренней экономической эффективности, а на качестве создаваемой технологической ценности для клиента. При этом остаются неучтенными такие факторы, как практики кооперации и жесткие временные ограничения на принятие решений.

Целью данного исследования является разработка теоретических основ и практических принципов максимизации качества поставляемой технологической ценности для клиента при ограниченном внутреннем потенциале организационной системы. В основу работы положен опыт практической деятельности, требующий концентрации усилий на наиболее критичных аспектах создания ценности и непрерывного поиска путей повышения эффективности использования имеющихся ресурсов.

Материалы и методы

Методологическую основу исследования составил системный подход, в рамках которого организационная система рассматривается как сложный объект, создающий технологическую ценность в условиях ограниченного потенциала.

Для формализации задачи управления был применен аппарат теории вероятностей. На его основе разработана оригинальная вероятностная модель, связывающая вероятность успешной поставки ценности с ключевыми параметрами системы: требованиями к качеству, внутренним потенциалом и активностью.

На основе общей модели для случая системы с тремя последовательными барьерами (этапами) методами ин-

тегрального и дифференциального исчисления получено компактное аналитическое выражение для плотности распределения вероятности успешного прохождения всех стадий за определенное время. Для исследования свойств данной функции, визуализации результатов и верификации выявленных закономерностей было проведено численное моделирование в среде Maple.

Для обработки и интерпретации результатов применялись общенаучные методы анализа и синтеза, а также методы графической визуализации данных, позволившие выявить и наглядно представить ключевые управленческие закономерности, вытекающие из модели.

Оптимизация качества технологической ценности в организационных системах

Нами предложена модель управления устойчивостью организационной системы промышленного предприятия [1–3]. Ключевая предпосылка модели заключается в том, что устойчивость является функцией предъявляемых требований к качеству выпускаемой продукции, а также от потенциала и активности системы. В результате формализации данной предпосылки получено выражение (1) для вероятности безотказного создания и поставки ценности.

$$p_n(t,W) = \int_0^t \dots \int_0^\infty \prod_{k=1}^{n} \nu_k e^{-\nu_k \Delta t_k} \rho(W_k) \delta\left(t - \sum_{k=1}^{n} \Delta t_k\right) dt_k dW_k \quad (1)$$

где ν_k — частота попыток осуществления перехода через барьер с номером k, определяется по формуле (2),

$\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$ — время, затрачиваемое на обеспечение технологического объекта необходимым уровнем качества для удовлетворения условия перехода на следующую стадию в организационной системе.

$$\nu = \nu_0 \exp\left(-\frac{W}{A}\right) \quad (2)$$

где W_k — общий объем работы, которую должна произвести система, определяется по формуле (3),

A — активность организационной системы,

ν_0 — частота попыток технологического объекта совершить переход на следующую стадию жизненного цикла при отсутствии каких-либо требований к качеству, формирующих данный барьер.

$$W = W_0 - W' \quad (3)$$

где W_0 — массив параметров, количественно характеризующих требуемый уровень качества, который необходимо достичь на каждой стадии жизненного цикла: $\{W_0^1, W_0^2, \dots W_0^n\} \in W_0$, где n — количество стадий жизненного цикла,

W' — количественная мера затрат, необходимая для преодоления технологическим объектом барьера, т.е. потенциал организационной системы.

Функция Дирака в выражении (1) обеспечивает выполнение условия, что суммарное время ожидания перехода технологическим объектом до конечной стадии равно сумме ожидания перехода на всех стадиях жизненного цикла, то есть:

$$t = (t_1 - 0) + \dots + (t_k - t_{k-1}) + \dots + (t_n - t_{n-1}) \quad (4)$$

Непосредственное использование модели (1) ограничено в условиях, когда система не может гибко наращивать потенциал и активность за счет внешних участников, что требует разработки соответствующих методических рекомендаций. Кроме того, модель должна учитывать априорно заданный уровень риска, характерный для инновационных проектов разработки технологических ценностей и не подлежащий прямой калькуляции.

Изложенное обусловливает необходимость корректировки алгоритма практического применения модели с учетом допустимого уровня риска. В высокотехнологичных отраслях, где риски носят системный характер, их приемлемый уровень не является универсальным и детерминирован, главным образом, типом заказчика (с более строгими требованиями у государственных и стратегических структур) и источником финансирования проекта.

Задача управления состоит в максимизации качества выходной технологической ценности в условиях ограниченного организационного потенциала, фиксированного времени реализации и установленного приемлемого уровня риска. Формальная постановка задачи имеет следующий вид (8):

$$W_0(W', r) \to max, \text{ при} \begin{cases} W' \in (W'_{min}, W'_{max}) \\ t \le t_0 \\ r \le r_{max} \end{cases} \quad (5)$$

где W' — значение потенциала организационной системы,

r — допустимый уровень риска

$W'_{min}, W'_{max}, r_{max}$ — предельно допустимые значения соответствующих параметров.

Актуальность оценки достижимых параметров качества технологических решений обусловлена комплексом факторов.

Технологические ограничения. Производственные и технические барьеры делают недостижимыми целевые значения ряда показателей, задаваемых заказчиком. Дополнительным аспектом является наличие компромиссов между различными параметрами качества, что требует поиска оптимального баланса.

Экономическая эффективность. Предельные затраты на достижение требуемого уровня качества могут превышать его воспринимаемую ценность, снижая экономическую целесообразность проекта для заказчика.

Временные ограничения. Жесткие сроки реализации проекта накладывают технологические и организационные ограничения, исключающие достижение части качественных показателей.

Дифференциация значимости параметров. Различный вес критериев качества позволяет проводить оптимизацию требований за счет ослабления второстепенных параметров и концентрации ресурсов на ключевых характеристиках, что сохраняет общую ценность решения.

Следовательно, ключевой задачей управления организационной системой является определение оптимального (достижимого) уровня качества выходных параметров в условиях заданных внешних и внутренних ограничений.

Обсуждение и результаты

Область применения предложенной модели имеет определенные границы, обусловленные характером управленческой ситуации. Методология релевантна в условиях, когда целевые показатели качества технологического решения превышают текущую производственную способность организационной системы. В случае полного соответствия потенциала предприятия поставленным задачам управленческая проблема теряет актуальность, поскольку компания уже располагает готовым решением, исключающим риск невыполнения.

Практическая значимость модели проявляется наиболее ярко в условиях значительного разрыва между требуемыми и текущими показателями, позволяя объекту управления определить достижимый уровень качества в заданных временных рамках и минимизировать проектные риски.

Важным ограничением модели является невозможность отрицательных значений активности. Устойчивое снижение потенциала свидетельствует о процессах организационной деградации, при которых создание технологических ценностей становится невозможным.

Отдельно рассматривается случай стагнации потенциала, характерный для организаций с изначально высоким ресурсным уровнем, достаточным для поддержания конкурентоспособности. В данной конфигурации модель сохраняет практическую применимость, обеспечивая оценку накопленных организационных ресурсов для гарантированного обеспечения требуемого качества технологического решения.

Для верификации предложенного подхода выполнено численное моделирование системы, включающей три барьера. Поскольку на каждом этапе жизненного цикла критерии качества являются уникальными, в моделировании детально рассматриваются требования одного этапа, в то время как параметры остальных этапов фиксируются. Плотность вероятности успешного прохождения технологическим объектом последовательности из трех барьеров описывается выражением (6).

$$dP_3(t) = \frac{\nu_1\nu_2\nu_3\left(\left(\nu_3 - \nu_2\right)e^{-\nu_1 t} - \left(\nu_3 - \nu_1\right)e^{-\nu_2 t} + \left(\nu_2 - \nu_1\right)e^{\nu_3 t}\right)}{(\nu_3 - \nu_1)\left(\nu_3 - \nu_2\right)(\nu_2 - \nu_1)} \qquad (6)$$

В процессе численных экспериментов будем варьировать значение величины ν_1, зависящим от соотношения $\left(W_0 - W'\right) / A$. Данное значение определяется по формуле (2).

Поверхность, построенная в соответствии с полученным аналитическим выражением (6), изображена на рисунке 1. Временной интервал задан в условных единицах ($t = 0,\ldots,10$).

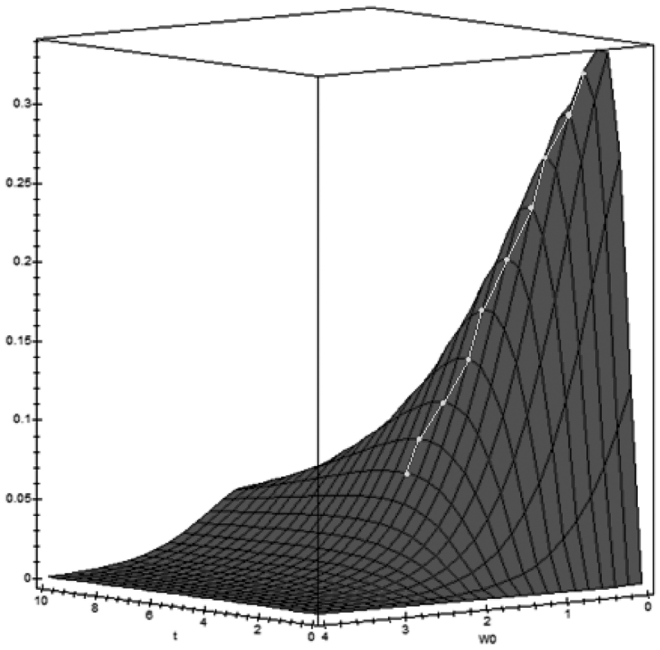


Рис. 1. Динамика распределения вероятности успешного прохождения трех стадий проекта при заданных ограничениях потенциала (W') и активности (A) системы, проекция 1

Рисунок иллюстрирует распределение плотности вероятности прохождения траектории, состоящей из трех барьеров, при следующих значениях параметров: потенциал организации $W'=50\%$, активность предприятия $A=50\%$.

Представленные на рисунке 1 данные моделирования подтверждают существование решения поставленной управленческой задачи. При заданных значениях потенциала и активности организационная система демонстрирует ненулевую вероятность достижения определенного уровня качества.

Анализ выявил три ключевые закономерности. Во-первых, при фиксированном сроке реализации технологического проекта рост требований к качеству выходной продукции ведет к снижению вероятности его достижения в рамках заданного потенциала организационной системы. Данная зависимость соответствует ожидаемой динамике. Во-вторых, как видно на рисунке 1, высокие показатели качества оказываются недостижимыми (вероятность равна нулю) даже при значительном увеличении длительности проекта. Следовательно, для данной системы существует область заведомо невыполнимых требований по качеству.

В-третьих, анализ рисунка 1 показывает, что повышение требований к качеству смещает наиболее вероятное значение выходного параметра в область больших длительностей проекта. Указанная зависимость представлена на отдельной проекции на рисунке 2. Из рисунка видно, что расширение временных рамок проекта приводит к смещению наиболее вероятного значения показателей качества в область более высоких значений.

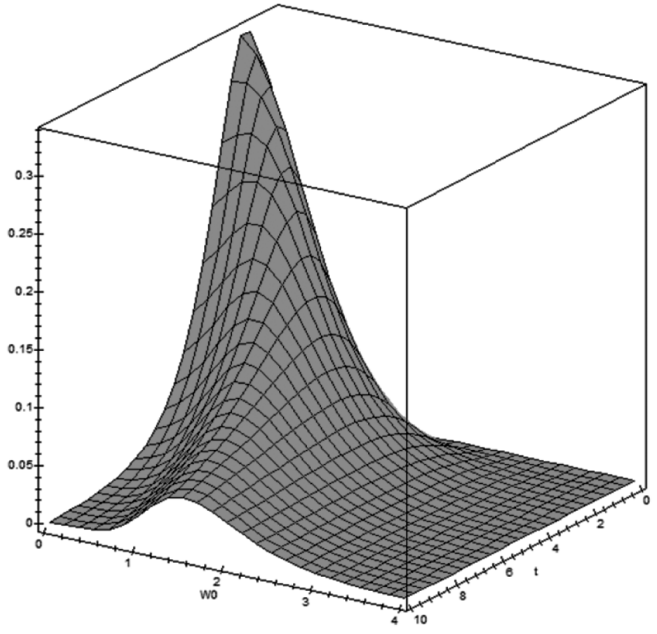


Рис. 2. Динамика распределения вероятности успешного прохождения трех стадий проекта при заданных ограничениях потенциала (W') и активности (A) системы, проекция 2

В ходе решения данной задачи объект управления идентифицирует достижимые значения показателей качества, соответствующие текущему уровню потенциала организационной системы. Полученные параметры проходят процедуру согласования с заказчиком, после чего при положительном решении осуществляется авторизация запуска проекта с одновременным выделением необходимых ресурсов и назначением ответственных исполнителей. Данный механизм обеспечивает переход от стадии планирования к практической реализации при соблюдении соответствия между требованиями заказчика и потенциальными возможностями исполнителя работ.

Заключение

В рамках проведенного исследования решена задача разработки модели для управления качеством создаваемой технологической ценности в организационных системах в условиях ограниченных возможностей наращивания потенциала. Данная проблема актуальна для высокотехнологичных секторов, где традиционные модели, ориентированные на максимизацию внутренней прибыли, оказываются недостаточными. В качестве решения предложена вероятностная модель, в которой вероятность успешного создания и поставки ценности является функцией от предъявляемых требований к качеству, текущего потенциала и активности организационной системы. На ее основе сформулирована задача оптимизации (5), направленная на поиск достижимого уровня качества при заданных ограничениях. Теоретически доказано, и подтверждено численным моделированием существование области заведомо невыполнимых требований к качеству при фиксированных потенциале и активности системы. Выявлена и визуализирована закономерность, заключающаяся в том, что ужесточение требований к качеству ведет не только к снижению вероятности успеха, но и к смещению наиболее вероятного времени реализации проекта в сторону увеличения.

Предложенная модель актуальна для ситуаций, когда целевые показатели превышают текущую способность системы. В условиях стагнации или деградации потенциала ее применение требует адаптации.

Таким образом, работа вносит вклад в развитие теории управления организационными системами, предлагая ценностно-ориентированный количественный подход к определению достижимого уровня качества технологической ценности в условиях ограниченного внутреннего потенциала системы и заданного допустимого уровня риска его недостижения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петрунина А.Э. Управление цепочками поставки ценности в организационных системах промышленных предприятий // Проспект Свободный–2025: материалы XXI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск, 21–26 апреля 2025 г.: в 4 ч. / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Сиб. федер. ун-т; отв. за вып. А.К. Губанов, И.А. Чижов, Э.Д. Бречко [и др.]. — Электрон. дан. — Красноярск: СФУ, 2025. — Ч. I: Естественные науки. — С. 209–211. — ISBN 978-5-7638-5170-0. — URL: https://bik.sfu-kras.ru/ft/LIB2/ELIB/b72/free/i-859311473.pdf (дата обращения: 10.12.2025).
2. Петрунина А.Э. Модель управления устойчивостью организационной системы промышленного предприятия / А.Э. Петрунина, А.К. Москалев // Управление инновациями в условиях цифровой трансформации : сборник научных трудов Всероссийской студенческой учебно-научной конференции, 11–12 апреля 2025 года / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт машиностроения, материалов и транспорта, Высшая школа проектной деятельности и инноваций в промышленности ; [ред. коллегия: С.Г. Редько и др.]. — Санкт-Петербург, 2025. — С. 105–110. — DOI: 10.18720/SPBPU/2/id25-290. — URL: http://elib.spbstu.ru/dl/2/id25-290.pdf (дата обращения: 10.12.2025).
3. Петрунина А.Э., Москалев А.К. Формирование модели цепочки поставки ценности в организационных системах промышленных предприятий // ИННОВАЦИИ. — 2025. — № 2 (304). — С.
4. Schniederjans D., Schniederjans M. Quality management and innovation: new insights on a structural contingency framework // International Journal of Quality Innovation. — 2015. — Vol. 1. — P. 2. — DOI: http://dx.doi.org/10.1186/s40887-015-0004-8
5. Martinez-Costa M., Martinez-Lorente A.R. Does quality management foster or hinder innovation? An empirical study of Spanish companies // Total Quality Management & Business Excellence. — 2008. — Vol. 19, No. 3. — P. 209–221.
6. Kim D.Y., Kumar V., Kumar U. Relationship between quality management practices and innovation // Journal of Operations Management. — 2012. — Vol. 30, No. 4. — P. 295–315.
7. Bourke J., Roper S. Innovation, quality management and learning: Short-term and longer-term effects // Research Policy. — 2017. — Vol. 46, No. 8. — P. 1505–1518.
8. Pinto C.M.L., Romero F.C. The relationship between quality management and innovation // China-USA Business Review. — May 2020. — Vol. 19, No. 5. — P. 148–157. — DOI: 10.17265/1537-1514/2020.05.002.
9. Баркалов С.А. Алгоритм и методы принятия управленческих решений на основе теории латентных переменных в условиях временных ограничений / С.А. Баркалов, А.В. Ананьев, К.С. Иванников, С.И. Моисеев // Вестник ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2022. — Т. 22, № 3. — С. 106–116. — DOI: 10.14529/ctcr220310.
10. Титов В.В. Планирование функционирования предприятия в условиях риска и неопределенности во внешней и внутренней среде / В.В. Титов, Д.А. Безмельницын, С.К. Напреева // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Экономические науки. — 2017. — Т. 10, № 5. — С. 172–183. — DOI: 10.18721/JE.10516.
11. Механизмы управления: учебное пособие / под ред. Д.А. Новикова. — Москва: УРСС, 2011. — 87 с. — (Умное управление). — ISBN 978-5-397-01718-0.

© Петрунина Анастасия Эдуардовна (kafedra_efit@bk.ru); Цыганков Никита Сергеевич (cyganikita@yandex.ru);
Москалев Александр Константинович (amoskalev@sfu-kras.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.31

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМНЫХ ПРОМПТОВ ДЛЯ ЮРИДИЧЕСКИХ АГЕНТОВ, ОСНОВАННЫХ НА БОЛЬШОЙ ЯЗЫКОВОЙ МОДЕЛИ GPT-4O MINI

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF SYSTEM PROMPTS FOR LEGAL AGENTS BASED ON THE GPT-4O MINI LARGE LANGUAGE MODEL

V. Podoprigora
D. Sobolev
A. Papko
D. Alexandrov
D. Popov

Summary. This article presents the results of an experimental study aimed at optimizing system prompts to improve the quality of large language model responses in the field of legal consulting. Using the GPT-4o mini model as an example, the effectiveness of four prompt variants was analyzed, including universal and specialized ones (tailored to the Family Code of the Russian Federation), as well as their modifications. A test set of 40 questions on family law was used, and response evaluation was carried out by an automated system based on the older-generation DeepSeek v3 model. The results showed that the universal prompt (Agent No. 1) outperformed the specialized one (Agent No. 2), despite the null hypothesis to the contrary, and the modified Agent No. 3 with a requirement for brevity for closed-ended questions achieved the highest «score/cost» ratio (S/C = 72.8). Key problems were identified: dependence on the quality of the RAG service, tendency to hallucinate in the absence of relevant data, and decreased accuracy due to excessive explanations. An approach using an ensemble of junior-generation models to reduce costs without loss of quality is proposed. The study demonstrates the critical role of prompt structure in legal AI systems and opens avenues for further optimization.

Keywords: system prompt, legal agent, GPT-4o mini, Family Code of the Russian Federation, RAG service, quality assessment, token consumption optimization, comparative analysis, legal consulting, generation cost.

Подопригора Владимир Николаевич
Кандидат экономических наук, доцент, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова; Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, г. Москва
Podoprigora.VN@rea.ru
Соболев Денис Вячеславович
Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, г. Москва
denis04012006sobolev@gmail.com
Папко Арсений Максимович
Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, г. Москва
arseniy.papko@gmail.com
Александров Данила Александрович
Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, г. Москва
danila.alexandr0ff@yandex.ru
Попов Дмитрий Александрович
Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, г. Москва
awec0m@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования, направленного на оптимизацию системных промптов для повышения качества ответов больших языковых моделей в области юридического консультирования. На примере модели GPT-4o mini проанализирована эффективность четырёх вариантов промптов, включая универсальные и специализированные (под Семейный кодекс РФ), а также их модификации. Использован тестовый набор из 40 вопросов по семейному праву, оценка ответов проводилась автоматизированной системой на базе модели старшего поколения DeepSeek v3. Результаты показали, что универсальный промпт (Агент № 1) превзошёл специализированный (Агент № 2), несмотря на нулевую гипотезу об обратном, а модифицированный Агент № 3 с требованием краткости для закрытых вопросов достиг наивысшего соотношения «оценка/стоимость» (О/Ц = 72.8). Выявлены ключевые проблемы: зависимость от качества RAG-сервиса, склонность к галлюцинациям при отсутствии релевантных данных и снижение точности из-за избыточных объяснений. Предложен подход с применением ансамбля моделей младшего поколения для снижения затрат без потери качества. Исследование демонстрирует критическую роль структуры промптов в юридических ИИ-системах и открывает пути для дальнейшей оптимизации.

Ключевые слова: системный промпт, юридический агент, GPT-4o mini, Семейный кодекс РФ, RAG-сервис, оценка качества, оптимизация потребления токенов, сравнительный анализ, юридическое консультирование, стоимость генерации.

Введение

Современные большие языковые модели (БЯМ) активно внедряются в юридическую практику для автоматизации консультаций, анализа документов и поддержки принятия юридически значимых решений [1]. Однако их эффективность в правовой сфере напрямую зависит от качества системных промптов — структурированных инструкций, определяющих поведение агента, основанного на технологиях искусственного интеллекта (ИИ-агент) [2]. Несмотря на растущее число исследований в области промпт-инженерии, ключевой вопрос остаётся недостаточно изученным: как баланс между универсальностью и специализацией промптов влияет на точность ответов и экономическую эффективность моделей?

Ранее предполагалось, что узкоспециализированные системные промпты, ориентированные на конкретные нормативные акты (например, Семейный кодекс РФ — далее СК РФ), обеспечивают более высокое качество ответов за счёт чётких алгоритмов работы с релевантными статьями. Однако проведённые эксперименты с моделью GPT-4o mini [3] выявили некоторого рода парадокс: универсальный промпт, описывающий агента-юриста общего профиля, продемонстрировал лучшие результаты как по точности, так и по соотношению «оценка/стоимость», чем специализированные аналоги. Это противоречит устоявшимся подходам к проектированию юридических ИИ-систем и требует переосмысления стратегий оптимизации промптов [4].

Целью настоящей работы является сравнительный анализ четырёх вариантов системных промптов для GPT-4o mini в контексте ответов на вопросы по семейному праву РФ. В исследовании решаются следующие задачи:

1. Оценка влияния структуры промпта на точность ответов (по 10-балльной шкале) и затраты ресурсов.
2. Выявление проблем, связанных с работой RAG-сервисов и склонностью моделей к галлюцинациям (RAG — Retrieval-Augmented Generation, генерация, обогащённая дополнительными данными).
3. Разработка и тестирование модифицированного промпта (Агент № 3), адаптированного для закрытых вопросов.
4. Формулировка гипотезы о применении ансамблей моделей для снижения стоимости без потери качества.

Новизна исследования заключается в опровержении нулевой гипотезы о превосходстве специализированных промптов и демонстрации эффективности гибридного подхода, сочетающего универсальные инструкции с точечными модификациями. Практическая значимость работы подтверждается расчётами экономии при масштабировании системы: например, использование Агента № 3 снижает стоимость генерации на 18 % по сравнению с базовой версией при росте средней оценки на 1.2 балла.

Приведённые в представленной работе данные основаны на тестовом наборе из 40 вопросов, оценённых автоматизированной системой с участием модели старшего поколения DeepSeek v3 [5], что, по предположениям, должно было бы обеспечить объективность сравнения с повышенной скоростью обработки результатов.

Методы

Исследование проводилось на базе модели GPT-4o mini, для которой были разработаны четыре варианта системных промптов, отличающихся уровнем специализации и структурой инструкций. Тестовый набор данных включал 40 вопросов по СК РФ, разделённых на две группы: 20 открытых вопросов, требующих развёрнутого анализа (например, «Какое решение должен вынести суд при наличии возражений ответчика на развод?»), и 20 закрытых вопросов с выбором из трёх вариантов (например, «Какой метод характерен для семейного права?»). Все вопросы были составлены профессиональными юристами таким образом, чтобы исчерпывающий ответ можно было дать на основе одной статьи СК РФ, что обеспечивало чёткую проверку способности агентов находить релевантные правовые нормы.

Каждый агент взаимодействовал с RAG-сервисом [6], который предоставлял до пяти наиболее релевантных сегментов из аннотированной базы знаний СК РФ. Сегменты представляют собой статьи кодекса, дополненные структурированными метаданными (например, даты редакций, связанные понятия, ссылки на другие нормы), что позволяло моделям точнее интерпретировать контекст. Настройки GPT-4o mini фиксировались для всех агентов: temperature = 0.1, top-p = 1.0, максимальная длина ответа — 4000 символов. Это обеспечивало детерминированность генерации при сохранении минимальной креативности.

Ответы агентов оценивались автоматизированной системой на основе модели DeepSeek v3, которая сравнивала их с эталонными решениями, подготовленными юристами. Промпт для DeepSeek v3 чётко регламентировал оценку по 10-балльной шкале: 10 баллов присваивалось при полном совпадении с эталоном, 0 — при отсутствии ответа, промежуточные значения отражали степень отклонения (например, пропуск цитирования, избыточные объяснения, галлюцинации). Например, ответ на вопрос о расторжении брака, не упоминающий п. 2 ст. 22 СК РФ, снижал оценку на 2–3 балла.

Для анализа эффективности использовались два ключевых показателя:

- Соотношение «Оценка/Токены» (О/Т) — интегральная метрика, учитывающая баланс между качеством ответа и объёмом затраченных вычислительных ресурсов;
- Соотношение «Оценка/Стоимость» (О/Ц) — экономический показатель, отражающий рентабельность модели при масштабировании.

Расчёты стоимости основывались исключительно на выходных токенах, что соответствовало типовым сценариям коммерческого использования. Все эксперименты проводились в единичном прогоне для каждого агента, что позволило оценить «стандартное» поведение моделей без усреднения множественных попыток. Несмотря на потенциальное влияние случайных вариаций, значительный объём данных (40 вопросов × 4 агента) и согласованность результатов между группами вопросов подтвердили надёжность выводов.

Важно отметить, что упоминаемые в настоящей работе тестовый набор данных, системные промпты четырёх агентов, а также размеченная и аннотированная база знаний СК РФ являются ноу-хау и коммерческой тайной, поэтому не приводятся в статье.

Результаты

Эксперимент выявил значимые различия в эффективности четырёх тестируемых промптов. Наивысшую среднюю оценку (7.35 из 10) продемонстрировал модифицированный Агент № 3, объединивший универсальный подход с требованием краткости для закрытых вопросов. При этом он сохранил экономическую эффективность: соотношение «оценка/стоимость» (О/Ц = 72.8) оказалось на 10 % выше, чем у базового универсального промпта (Агент № 1). Специализированный Агент № 2, вопреки ожиданиям, занял последнее место по точности (6.15), уступив даже переобученному Агенту № 4 (6.78), что опровергло исходную гипотезу о преимуществе узкоспециализированных ролевых инструкций.

Разделение датасета на открытые и закрытые вопросы выявило критическую зависимость результатов от типа запроса. На закрытых вопросах все агенты показали существенный рост средней оценки: например, Агент № 3 достиг 9.8 балла против 4.9 на открытых. Однако автоматизированный оценщик на базе DeepSeek v3 последовательно снижал баллы за избыточные объяснения в закрытых вопросах, даже при верном выборе варианта. Так, ответ «Дозволительно-императивный» без дополнительных комментариев получал 10 баллов, тогда как тот же ответ с пояснениями терял до 2 баллов из-за «нарушения формата». Это подчёркивает необходимость адаптации промптов к типу вопросов.

Анализ затрат выявил два ключевых паттерна. Во-первых, стоимость генерации коррелировала не с точностью, а с объёмом выходных данных: Агент № 1, дававший наиболее развёрнутые ответы, потратил 191 788 токенов, тогда как Агент № 3 сократил этот показатель на 12 % (168 131 токен). Во-вторых, соотношение О/Т для закрытых вопросов (до 13.2 у Агента № 3) оказалось в 2.5 раза выше, чем для открытых, что подтверждает экономическую целесообразность разделения логики ответов.

Наблюдения за работой RAG-сервиса выявили системные проблемы. В 15 % случаев (например, вопрос № 17 о возврате искового заявления) отсутствие релевантных сегментов в базе знаний приводило к галлюцинациям: модели игнорировали инструкции и генерировали ответы на основе внутренних знаний, снижая среднюю оценку в среднем на 3.1 балла. При этом в вопросах № 24 и 26, в которых СК РФ действительно не содержал прямых норм (например, о наследовании прав при усыновлении), агенты либо давали некорректные ответы, либо отсылали к несуществующим статьям, что указывает на необходимость улучшения обработки «пограничных» случаев.

Сравнение результатов работы агентов с приведёнными системными промптами на базе модели GPT-4o mini приведено в табл. 1.

Таким образом, результаты показали, что гибридные промпты (универсальные + контекстно-зависимые правила) обеспечивают оптимальный баланс между точностью и стоимостью, но их эффективность ограничена качеством RAG-сервиса и типологией вопросов.

Обсуждение

Полученные результаты бросают вызов устоявшимся представлениям о проектировании юридических ИИ-агентов. Преимущество универсального промпта (Агент № 1) над специализированным (Агент № 2) можно объяснить его гибкостью: общие инструкции, ориентированные на анализ правовых институтов, позволяли модели адаптироваться к контексту вопроса, даже при ограниченной релевантности сегментов от RAG-сервиса. В то же время жёсткая алгоритмизация действий в Агенте № 2, судя по всему, ограничивала способность модели GPT-4o mini к имплицитному анализу, особенно в случаях частичного совпадения фактов вопроса с нормами СК РФ. Это согласуется с работой [7], показавшей, что избыточная детализация промптов снижает креативность моделей в правовой аналитике.

Успех Агента № 3, сочетающего универсальность с контекстно-зависимыми правилами, подтверждает гипотезу о необходимости «слоёной» архитектуры промптов. Краткость ответов на закрытые вопросы не только снизила стоимость генерации, но и минимизировала риск потери баллов из-за избыточных объяснений —

Таблица 1.

Сравнительные показатели эффективности агентов

Показатель		Агент № 1	Агент № 2	Агент № 3	Агент № 4
Весь набор данных	Потрачено токенов	191 788	155 150	168 131	179 661
	Примерная стоимость	0,1151	0,0931	0,1009	0,1078
	Средняя оценка	7,25	6,15	**7,35**	6,78
	Соотношение О/Т	3,7802	3,9639	**4,3716**	3,7710
	Соотношение О/Ц	62,9887	66,0651	**72,8444**	62,8942
Первые 20 вопросов	Потрачено токенов	116 549	83 622	93 854	98 984
	Примерная стоимость	0,0699	0,0502	0,0563	0,0594
	Средняя оценка	**5,50**	4,35	4,90	4,35
	Соотношение О/Т	4,7190	5,2020	**5,2209**	4,3946
	Соотношение О/Ц	78,6838	86,6997	**87,0337**	73,2323
Вторые 20 вопросов	Потрачено токенов	75 239	71 528	74 277	80 677
	Примерная стоимость	0,0451	0,0429	0,0446	0,0484
	Средняя оценка	9,00	7,95	**9,80**	9,20
	Соотношение О/Т	11,9619	11,1145	**13,1939**	11,4035
	Соотношение О/Ц	199,5565	185,2421	**219,7309**	190,0826

системной проблемы, ранее описанной для младших моделей [8]. Однако сохраняющееся падение точности на открытых вопросах (4.9 против 5.5 у Агента № 1) указывает на компромисс между специализацией и универсальностью: строгие требования к формату ответов могут подавлять способность модели к развёрнутому анализу.

Ключевым ограничением исследования стала зависимость от качества RAG-сервиса. В 15 % случаев отсутствие релевантных сегментов (например, вопрос № 17) приводило к катастрофическим галлюцинациям, что согласуется с выводами [9] о «хрупкости» RAG-систем в юридических приложениях. При этом даже корректные ответы на вопросы № 24 и 26, не имеющие прямых оснований в СК РФ, демонстрируют риски переоценки возможностей моделей: ИИ-агенты склонны заполнять пробелы в знаниях правдоподобными, но некорректными утверждениями.

Экономические показатели (О/Ц = 72.8 у Агента № 3) подтверждают рентабельность подхода, но их экстраполяция на «промышленные» масштабы требует осторожности. Например, при обработке 1 млн вопросов использование Агента № 3 вместо Агента № 1 сэкономит примерно 14 200 USD, однако реальная экономия может быть ниже из-за роста ошибок на открытых вопросах. Это подчёркивает важность динамической настройки промптов в зависимости от типа запроса — задача, требующая интеграции классификатора вопросов в архитектуру системы.

Перспективным направлением представляется предложенная гипотеза об ансамблевом подходе. Как показали расчёты, даже 10 вызовов GPT-4o mini (стоимость примерно 1 USD) будут дешевле одного вызова старшей модели GPT-4o (10 USD), что открывает путь к созданию самокорректирующихся систем. Однако для этого необходимы исследования в двух направлениях:

1. Разработка протоколов консенсуса между агентами.
2. Калибровка автоматических оценщиков для минимизации субъективности.

Таким образом, работа не только опровергает гипотезу о превосходстве узкоспециализированных промптов, но и задаёт рамки для их дальнейшей оптимизации. Ключевым выводом становится необходимость ситуативной адаптации инструкций, когда универсальная основа дополняется контекстными правилами, а экономическая эффективность балансируется с юридической точностью.

Заключение

Проведённое исследование демонстрирует, что эффективность юридических ИИ-агентов определяется не узкой специализацией промптов, а их способностью адаптироваться к типу вопроса. Гибридный подход (Агент № 3), сочетающий универсальные инструкции с контекстно-зависимыми правилами, обеспечил наивысшее соотношение точности и стоимости (О/Ц = 72.8), опровергнув исходную гипотезу о преимуществе специализированных промптов. Ключевыми факторами успеха стали, во-первых, минимизация избыточных объяснений для закрытых вопросов; во-вторых, гибкий анализ правовых норм через RAG-сервис; и в-третьих, баланс между детализацией и лаконичностью ответов. Однако ограничения, связанные с «хрупкостью» RAG-систем

и склонностью моделей к галлюцинациям, подчёркивают необходимость дальнейшей работы над повышением надёжности ИИ-агентов.

Перспективным направлением станет проверка универсальности выявленных закономерностей на других моделях, включая GPT-4.1 nano и Skylark Lite, которые обладают различной архитектурой и экономическими характеристиками, но выглядят наиболее перспективными для повышения качества работы. Это позволит определить, сохраняется ли преимущество гибридных промптов в условиях разнообразия языковых моделей. Дополнительные исследования также должны быть сосредоточены на следующих задачах:

1. Разработка динамических промптов, автоматически адаптирующихся к типу вопроса (открытый/закрытый).
2. Улучшение RAG-сервиса за счёт семантического анализа запросов и расширения базы знаний.
3. Создание ансамблей младших моделей для повышения точности без существенного увеличения стоимости.

Полученные результаты формируют основу для создания экономически эффективных ИИ-агентов в юридической сфере, в которой точность и соответствие нормативным требованиям остаются критическими параметрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Россинская Е.Р. (2024) Нейросети в судебной экспертологии и экспертной практике: проблемы и перспективы // Вестник Университета им. О.Е. Кутафина (МГЮА), № 3, 2024, стр. 21–33. — DOI: 10.17803/2311–5998.2024.115.3.021–033.
2. Кузнецов А.В. (2024) За пределами тематического моделирования: анализ исторического текста с помощью больших языковых моделей // Историческая информатика, № 4(50), 2024, стр. 47–65. — DOI: 10.7256/2585-7797.2024.4.72560.
3. Isogai S., Ogata S., Kashiwa Y., Yazawa S., Okano K., Okubo T. (2024) Toward Extracting Learning Pattern: A Comparative Study of GPT-4o-mini and BERT Models in Predicting CVSS Base Vectors // 2024 IEEE 35th International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops (ISSREW), Tsukuba, Japan, 2024, pp. 127–134. — DOI: 10.1109/ISSREW63542.2024.00067.
4. Душкин Р.В. (2025) Генеративный искусственный интеллект. — М.: ДМК Пресс, 2025. — 228 с. — ISBN 978-5-93700-374-4.
5. Liu A. et al. (2025) DeepSeek-V3 Technical Report. arXiv preprint arXiv:2412.19437. — URL: https://arxiv.org/abs/2412.19437 (дата обращения: 18.04.2025).
6. Zhao S., Yang Y., Wang Z., He Z., Qiu L. K., Qiu L. (2024) Retrieval-Augmented Generation (RAG) and Beyond: A Comprehensive Survey on How to Make Your LLMs Use External Data More Wisely. arXiv preprint arXiv:2409.14924. — URL: https://arxiv.org/abs/2409.14924 (дата обращения: 18.04.2025).
7. Valdez K. (2024) Leveraging the Power of Large Language Models (LLMs) with Specialized AI Agents // Dragonscale, 2024. — URL: https://clck.ru/3LX7hE (дата обращения: 18.04.2025).
8. Ramlochan S. (2024) The Power of Concise Prompts in Large Language Models // Prompt Engineering & AI Institute, 2024. — URL: https://clck.ru/3LX7o8 (дата обращения: 18.04.2025).
9. Rakin S., Shibly M.A.R., Hossain Z.M., Khan Z. (2024) Leveraging the Domain Adaptation of Retrieval Augmented Generation Models for Question Answering and Reducing Hallucination. arXiv preprint arXiv:2410.17783, 2024. — URL: https://arxiv.org/abs/2410.17783 (дата обращения: 18.04.2025).

© Подопригора Владимир Николаевич (Podoprigora.VN@rea.ru); Соболев Денис Вячеславович (denis04012006sobolev@gmail.com);
Папко Арсений Максимович (arseniy.papko@gmail.com); Александров Данила Александрович (danila.alexandr0ff@yandex.ru);
Попов Дмитрий Александрович (awec0m@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.32

ИНТЕГРАЦИЯ ЭМОЦИОНАЛЬНЫХ И ПОВЕДЕНЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПСИХОЛОГИЧЕСКОГО ПОРТРЕТА СОТРУДНИКОВ IT-КОМПАНИИ

INTEGRATION OF EMOTIONAL AND BEHAVIORAL DATA FOR BUILDING THE PSYCHOLOGICAL PROFILE OF IT COMPANY EMPLOYEES

S. Popkov

Summary. The article examines an approach to integrating quantitative indicators of digital activity and qualitative characteristics of employees' emotional background. Text and voice messages are analyzed, based on which a model for constructing a psychological profile has been developed. The model aggregates metrics from various sources, which makes it possible to identify the dynamics of changes in work activity and link them to communication patterns. Moving averages, normalization, and threshold analysis are applied to provide both retrospective evaluation and short-term forecasting. The results demonstrate the practical significance of this approach for HR analytics and managerial decision-making in the context of digital transformation.

Keywords: psychological profile, emotions, digital activity, moving averages, normalization, forecasting.

Попков Сергей Сергеевич
главный специалист отдела разработки ПО ООО «Вебби»;
Государственный университет «Дубна»
sspopkov@list.ru

Аннотация. В статье рассмотрен подход к интеграции количественных показателей трудовой активности сотрудников IT-предприятия и качественных характеристик эмоционального фона сотрудников. Выполнен анализ текстовых и голосовых сообщений, на основе которых разработана модель формирования психологического портрета. В модели агрегированы метрики из разных источников, что позволило выявить динамику изменений трудовой активности и связать её с особенностями коммуникации. Для расчётов применены методы скользящих средних, нормализации и порогового анализа, обеспечивающие как ретроспективную оценку, так и краткосрочное прогнозирование. Сделан вывод о практической значимости такого подхода для HR-аналитики и управленческих решений в условиях цифровой трансформации.

Ключевые слова: психологический портрет, эмоции, цифровая активность, скользящие средние, нормализация, прогнозирование.

Введение

Современные IT-компании функционируют в условиях высокой динамики и постоянных изменений, что неизбежно отражается на психологическом состоянии сотрудников. Увеличение темпов цифровых коммуникаций, рост объёмов информации и необходимость постоянного взаимодействия внутри распределённых команд приводят к тому, что эмоциональный фон коллектива становится ключевым фактором продуктивности. Невнимание к психологическому климату повышает вероятность снижения мотивации, роста текучести кадров и ухудшения качества выполняемых задач.

Традиционные HR-методы оценки трудовой активности сотрудников (опросы удовлетворённости, интервью, разбор индивидуальных кейсов) дают лишь частичное представление о ситуации, так как основаны на ретроспективных данных и зависят от готовности сотрудника открыто делиться эмоциями. Однако развитие цифровой аналитики позволяет перейти к более комплексному подходу — анализу эмоций и динамики цифровой активности в рабочих пространствах. Такой подход открывает возможность формировать **психологический портрет сотрудника**, интегрируя различные типы данных в единую модель.

Среди наиболее значимых индикаторов выделяются:

- **эмоции**, выраженные в текстовых и голосовых коммуникациях;
- **цифровая активность**, отражающая действия в корпоративных системах;
- **результаты пульс-опросов** и показателей вовлечённости.

Комбинация этих источников данных формирует базу для построения метрик, которые позволяют отслеживать динамику трудовой активности не только отдельного сотрудника, но и всего подразделения. Такой аналитический подход создаёт основу для принятия обоснованных управленческих решений: от раннего выявления признаков снижения вовлечённости до разработки стратегий по укреплению психологического климата в коллективе.

Цель статьи — показать, как современные методы анализа эмоций и оценки цифровой активности позво-

ляют формировать психологический портрет сотрудника, оценивать психологический климат в коллективе IT-компании и использовать полученные результаты для повышения качества управления персоналом.

Основные эмоции как индикаторы в оценке трудовой активности

Концептуальная рамка

Эмоции описывают через устойчивые модели, которые помогают интерпретировать цифровые следы коммуникаций в рабочих средах. Так, Дж. Рассел предложил рассматривать эмоции в координатах «приятно — неприятно» и «высокая — низкая активность», что помогает структурировать разные эмоциональные проявления [1]. П. Экман выделил базовые эмоции, среди которых радость, грусть и гнев — наиболее часто встречающиеся в рабочем контексте [2]. В рамках теории аффективных событий (Affective Events Theory) показано, что конкретные эпизоды на работе вызывают эмоциональные реакции, а они, в свою очередь, влияют на решения, поведение и результативность [3]. Эмоции распространяются внутри коллектива: положительные или отрицательные настроения передаются от одного человека к другому и формируют общий эмоциональный климат [4].

Использование эмоций в качестве входных данных

Исследования показывают: положительные эмоции связаны с ростом продуктивности и инициативности, отрицательные — с рисками конфликтов и снижением качества работы. Метаанализы подтверждают, что радость и удовлетворённость часто предсказывают высокие оценки работы, а негативные эмоции коррелируют с контрпродуктивным поведением [5]. На уровне команды эмоции усиливаются за счёт эффекта «эмоциональной заразительности», когда общий настрой быстро подхватывается другими сотрудниками [6].

Ключевые показатели

Для практического анализа выделяют три базовые эмоции: **радость**, **грусть** и **гнев**. К ним добавляется интегральная метрика — **уровень удовлетворённости**, которая рассчитывается как разница между радостью и суммой негативных эмоций (грусти и гнева). Такая свёртка помогает отследить общий баланс между позитивом и негативом и быстрее понять, куда движется эмоциональный фон.

Каналы измерения

- **Текстовые сообщения.** Эмоции можно выявить по словам и выражениям. Для этого применяются словари эмоций (например, NRC Emotion Lexicon) и лингвистические инструменты (LIWC2015) [7].
- **Голосовые каналы.** Характеристики речи (тембр, громкость, скорость) дают дополнительные сигналы о радости, грусти или раздражении. Современные нейросетевые модели обрабатывают такие признаки и выявляют эмоции даже при шуме и коротких высказываниях.
- **Пульс-опросы.** Короткие регулярные анкеты позволяют уточнять данные автоматического анализа и сопоставлять их с самооценкой сотрудников. Они базируются на валидированных шкалах, например PANAS [8].

Интерпретация данных

- **Радость** — индикатор позитивного настроя и готовности к активной работе.
- **Грусть** — сигнал снижения вовлечённости и возможного замедления деятельности.
- **Гнев** — показатель напряжения, конфликтности или недовольства.
- **Удовлетворённость (баланс аффекта)** — общий итоговый показатель, который отражает, какой эмоциональный тон преобладает.

Ограничения

Важно учитывать, что эмоции не всегда выражаются одинаково: культура, язык и особенности общения влияют на то, как их можно интерпретировать. Поэтому автоматический анализ стоит дополнять опросами и адаптировать модели под конкретный коллектив.

Психологический портрет сотрудника

Понятие и назначение

Психологический портрет сотрудника — это интегральный индикатор, который объединяет эмоциональные проявления в коммуникациях, поведенческие шаблоны цифровой активности и данные опросов с целью **оценки трудовой активности сотрудников.** Теоретическая основа включает две линии исследований. Первая — **теория аффективных событий**, согласно которой рабочие эпизоды вызывают эмоции, а те напрямую влияют на решения и продуктивность [9]. Вторая — **модель требований и ресурсов работы (JD-R)**, объясняющая, как баланс нагрузки и ресурсов формирует вовлечённость и эффективность [10]. В коллективной среде эмоции распространяются «волной» и усиливают управленческую ценность такого интегрального показателя.

Практический смысл. Психологический портрет превращает разрозненные данные в целостную картину: как сотрудник взаимодействует с задачами, какие эмоции сопровождают это взаимодействие, как меняется ритм работы во времени. Этот подход делает **оценку**

трудовой активности сотрудников регулярной и сопоставимой между разными сотрудниками.

Традиционные HR-опросы

Классический инструмент — анкеты удовлетворённости и **шкалы вовлечённости**. Наиболее известна **Utrecht Work Engagement Scale (UWES)**, оценивающая энергию, преданность и погружённость [11]. Преимущество опросов — контекст и субъективная мотивация. Ограничения — редкая периодичность и зависимость от настроения при заполнении. Также в психологии описаны систематические искажения самоотчётов: социальная желательность, общий методический фактор, «эффект согласованности» [12].

Автоматизированный анализ цифровых следов

Современные системы используют данные, которые собираются автоматически и непрерывно:

- **Текст и голос.** Лингвистические инструменты (например, LIWC2015) и словари эмоций (NRC) дают проверенные категории для радости, грусти и гнева [13]. Голосовые признаки позволяют уловить оттенки эмоций, которые не всегда выражаются словами.
- **Трудовая активность.** Логи профессиональной деятельности в корпоративных системах фиксируют ритм работы и структуру взаимодействий.

Сопоставление. Опросы дают смысл и субъективные оценки, но редки и подвержены искажениям; цифровые следы дают объективность и динамику, но требуют калибровки и учёта контекста. Наиболее надёжный подход — **комбинация методов**, когда опросы дополняются данными речи и активности, а результаты интегрируются в единую модель.

Объединение эмоциональных и поведенческих индикаторов

Эмоции показывают общий тон, а цифровое поведение отражает ритм, продуктивность и стиль работы. В совокупности они формируют **динамическую картину** трудовой активности. Эмоциональные всплески объясняют краткосрочные решения, JD-R указывает на долгосрочный баланс ресурсов и нагрузок. Объединение каналов повышает точность прогноза и даёт возможность заметить скрытые изменения раньше, чем они проявятся в результатах. На уровне команды действует эффект «эмоциональной заразительности», который показывает, как общий настрой влияет на коллективные **оценки трудовой активности сотрудников**.

Концептуальная схема портрета

- **Эмоции из текста и голоса:** средние значения по радости, грусти, гневу с окнами сглаживания (5–7 дней).
- **Цифровая активность:** нормированные показатели ежедневной активности.
- **Пульс-опросы:** короткие самооценки для уточнения автоматического анализа.
- **Интеграция:** взвешенная модель, где доли эмоциональных и поведенческих сигналов зависят от качества данных и управленческих задач.

Методы оценки психологического климата

Динамика эмоций (средние значения за периоды)

Цель. Вычислить тренды эмоционального тона и рассчитать, как они соотносятся с оценками трудовой активности сотрудников.

Вычисление

- Источники: текст и голос. Для текста — валидированные лексиконы и лингвистические счётчики (например, LIWC); для голоса — акценты речи и интонации.
- Для каждой эмоции $E \in \{$радость, грусть, гнев$\}$ ведём скользящие средние: E_7 (7 дней) и E_{30} (30 дней).
- Интегральный баланс аффекта: S = радость — грусть – гнев в диапазоне $[-1,1]$.
- Сезонность по дням недели корректируем нормировкой к персональной базе: сравниваем текущие значения с «обычным» профилем сотрудника и его референтной группы.

Интерпретация

- Рост S и устойчивый подъём E_7 относительно E_{30} — сигнал проактивности и снижения рисков сбоев в координации.
- Устойчивое снижение S с одновременным ростом грусти или гнева — индикатор возможных затруднений во взаимодействии и концентрации.

Практика: на графике показываются обе кривые — «быстрое окно» (7 дней) и «медленное» (30 дней), чтобы отделять краткосрочные всплески от сдвига базовой линии [14] (см. рис. 1).

Цифровая активность как индикатор перегрузки или снижения вовлечённости

Цель. Отследить отклонения от привычного ритма работы.

Вычисление

- Суточная активность $A_t \in [0,1]$, нормированная по персональной истории.
- Отклонение от нормы: $\Delta A_t = A_t - \bar{A}$, где $\bar{A}$ — скользящее среднее за прошлый месяц.

Интерпретация

- Длительный «пик» $\Delta A_t \gg 0$ без роста радости — возможная перегрузка.



Рис. 1. Динамика интегрального баланса аффекта (S)

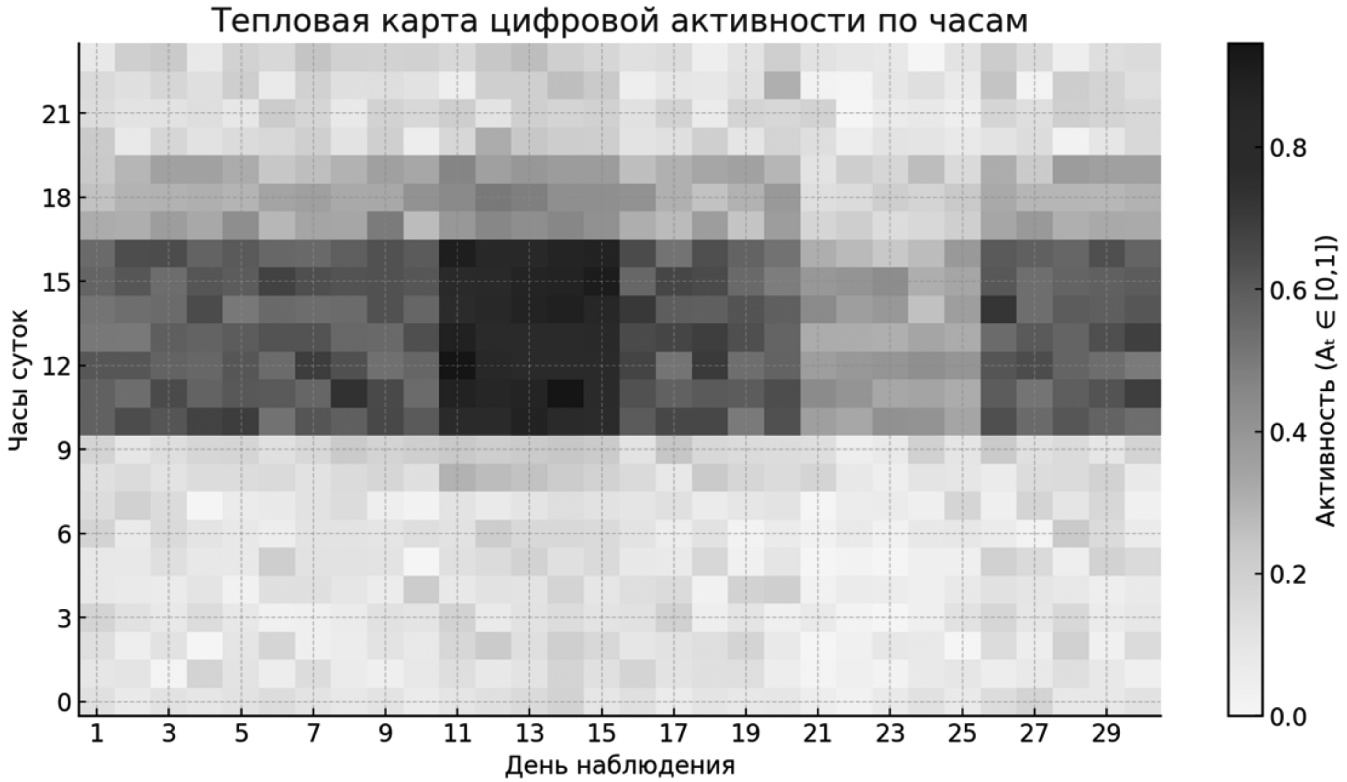


Рис. 2. Тепловая карта цифровой активности по часам

- Стойкое $\Delta A_t \ll 0$ вместе со снижением S — риск снижения вовлечённости.
- Профиль «в течение дня» (тепловая карта по часам) помогает увидеть смещения привычных «окон продуктивности» (см. рис. 2).

Коммуникативные паттерны через хордовые диаграммы

Задача. Понять, как сотрудники и отделы связаны между собой, и кто влияет на общий тон коммуникаций.

Построение

- Узлы по окружности — сотрудники или команды; толщина хорды между узлами — объём коммуникаций.
- Единица коммуникации — одно сообщение или одна голосовая запись в **5-минутном** интервале. В многопользовательском голосовом канале одна коммуникация делится на число слушателей (равные доли).
- На уровне отделов отображены агрегированные связи и доли участия (см. рис. 3).

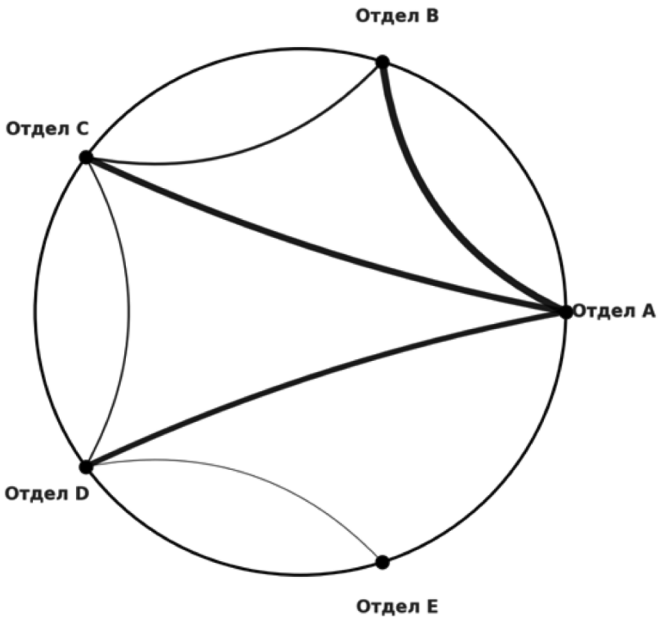


Рис. 3. Хордовая диаграмма

Интерпретация

- «Сильные мосты» между отделами, «узкие горлышки», изолированные участники.
- Лидеры взаимодействий и носители «эмоционального тона» (узлы с наибольшим вкладом в связи).
- Эффект «эмоциональной заразительности» легче замечать, когда плотные связи объединяют группы с похожим эмоциональным профилем.

Математическая модель интеграции данных

Формализация задачи

Чтобы объединить разные источники — эмоции, цифровую активность и результаты пульс-опросов — необходимо перейти к математической модели. В ней каждый параметр отражает определённый аспект оценок трудовой активности сотрудников:

- C_s — доля грусти (среднее значение за 5 дней);
- C_a — доля агрессии или гнева (среднее значение за 5 дней);
- C_h — доля радости (среднее значение за 5 дней);
- A — цифровая активность, нормированная в диапазоне [0, 1]
- d_s, d_a, d_h — значения самооценки эмоций по результатам пульс-опроса (шкала от 1 до 5);
- h — бинарный флаг прохождения опроса на радость ($h \in \{0, 1\}$).

Такое сочетание опирается на практику исследований в области анализа эмоций в коммуникации [14], психометрических опросов [15] и использования цифровых следов для мониторинга активности [16].

Исходная формула

В базовом варианте расчёт индикатора *z* предложен в виде:

$$z = b_e \cdot \left(C_s \cdot d_s + C_a \cdot d_a - C_h \cdot d_h\right) + \left(-1\right)^h \cdot b_A \cdot \frac{A+1}{2} \quad (1)$$

Здесь

- b_e отражает весовой вклад эмоциональной компоненты,
- b_A задаёт вес цифровой активности.

Такая форма уравнения аналогична конструкциям, применяемым в моделях интеграции опросных и поведенческих данных [17]. Она позволяет зафиксировать не только эмоциональный фон, но и рабочую нагрузку.

Предложенные изменения

Недостаток базовой формулы в том, что цифровая активность *A* учитывается только в относительном виде. В практике анализа рабочих процессов рекомендуется учитывать абсолютные значения активности и сравнивать их с историческим максимумом [18].

Обновлённая формула принимает вид:

$$z = b_e \cdot \left(C_s \cdot d_s + C_a \cdot d_a - C_h \cdot d_h\right) + \\ + \left(-1\right)^h \cdot b_A \cdot \left(1 + \frac{A_{abs}}{A_{max}}\right) \quad (2)$$

где

- A_{abs} — абсолютное значение активности,
- A_{max} — максимальное значение за месяц или иной длительный период.

Такой подход снижает риск смещения при сравнении сотрудников с разными стилями работы и позволяет учитывать исторический контекст [19].

Корректировка коэффициента b_A

Чтобы активность вносила в модель не только уровень, но и отклонения от привычной нормы, предлагается динамическая корректировка коэффициента:

$$b_A = m \cdot \Delta A, \Delta A = A_t - A_n \quad (3)$$

где

- A_t — текущая активность,
- A_n — среднее значение активности за референтный период (например, месяц),
- m — параметр, задающий чувствительность модели к изменениям.

Идея учитывать именно отклонение ΔA близка к практикам анализа временных рядов в задачах детекции аномалий [20].

Практическая интерпретация результатов

Рассчитанный интегральный показатель и его составляющие не являются самоцелью. Основная ценность модели заключается в том, что она позволяет переводить данные об эмоциях, цифровой активности и коммуникациях в понятные управленческие выводы.

Одним из ключевых сценариев использования становится **выявление изменений в эмоциональном фоне**. Если баланс аффекта S демонстрирует устойчивое снижение, это может быть сигналом снижения вовлечённости или напряжённости в коллективе. Такой результат особенно значим при сопоставлении с историческим профилем: важен не сам по себе низкий показатель, а его отличие от привычного уровня сотрудника или отдела.

Другой сценарий связан с анализом **отклонений в цифровой активности**. Резкое превышение индивидуальной нормы может означать перегрузку, а стойкое снижение — падение интереса к задачам или трудности с распределением нагрузки. Интерпретация усиливается, если одновременно фиксируется изменение эмоционального фона: например, рост активности при падении радости указывает на переработку, а падение активности вместе с ростом грусти — на снижение мотивации.

Третий сценарий касается **коммуникативных паттернов**. Хордовые диаграммы помогают заметить сотрудников, у которых резко уменьшается число связей. Недостаток коммуникаций у новичка может сигнализировать о проблемах адаптации, тогда как у опытного специалиста — о риске выпадения из командного взаимодействия. В противоположность этому, высокая плотность связей и активное участие в коммуникации позволяют выделить потенциальных лидеров мнений, влияющих на общий тон коллектива.

Практическая ценность таких интерпретаций заключается в возможности **перевести аналитические сигналы в управленческие действия**. Руководитель может перераспределить нагрузку между членами команды, если у одного фиксируется перегрузка, или поддержать нового сотрудника, если его уровень коммуникаций остаётся низким. HR-специалисты могут заранее заметить сотрудников в зоне риска и предложить индивидуальные меры поддержки. На уровне компании это помогает снижать текучесть кадров, укреплять лояльность и повышать эффективность командной работы.

Таким образом, интеграция эмоциональных, поведенческих и коммуникационных данных формирует инструмент, который соединяет аналитику и практику управления: от своевременного выявления проблем до системной работы с мотивацией и развитием персонала.

Заключение

В ходе исследования выполнено обоснование подхода к формированию психологического портрета сотрудников на основе анализа эмоций, цифровой активности и данных пульс-опросов. Проанализированы существующие методы оценки психологического климата и показано, что их интеграция в единую модель позволяет более полно отражать трудовую активность и выявлять изменения в профессиональной деятельности коллектива IT-предприятия.

Выполнено сравнение традиционных HR-методов, основанных на опросах, и автоматизированного анализа цифровых следов. Рассмотрено, каким образом объединение эмоциональных и поведенческих индикаторов повышает точность интерпретации результатов и делает возможным переход от статичных срезов к динамическому наблюдению.

Разработана формализованная модель интеграции данных, в которой эмоциональные показатели и показатели цифровой активности объединяются через систему коэффициентов, учитывающих индивидуальные отклонения от нормы. Показано, что предложенные изменения, включающие использование абсолютных значений активности и динамическую корректировку коэффициента b_a, повышают устойчивость и информативность модели.

Подчёркнуто, что использование научного подхода к анализу психологического климата обеспечивает новый уровень HR-практики в условиях цифровой трансформации. Полученные результаты демонстрируют перспективность дальнейшего развития направления: интеграция с инструментами прогнозирования, расширение набора метрик и применение разработанной модели в системах поддержки управленческих решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Russell J.A. A circumplex model of affect // Journal of Personality and Social Psychology. 1980. Vol. 39, No. 6. P. 1161–1178. DOI: 10.1037/h0077714
2. Ekman P. Basic Emotions // In: T. Dalgleish, M. Power (eds.) Handbook of Cognition and Emotion. New York: Wiley, 1999. P. 45–60. (доступно как обзорный PDF).
3. Weiss H.M., Cropanzano R. Affective Events Theory: A Theoretical Discussion of the Structure, Causes and Consequences of Affective Experiences at Work. 1996. Working paper / препринт. URL: https://web.mit.edu/... (дата обращения: 11.09.2025).
4. Barsade S.G. The Ripple Effect: Emotional Contagion and Its Influence on Group Behavior // Administrative Science Quarterly. 2002. Vol. 47, No. 4. P. 644–675.
5. Watson D., Clark L.A., Tellegen A. Development and Validation of Brief Measures of Positive and Negative Affect: The PANAS Scales // Journal of Personality and Social Psychology. 1988. Vol. 54, No. 6. P. 1063–1070. PMID: 3397865.
6. Judge T.A., Thoresen C.J., Bono J.E., Patton G.K. The Job Satisfaction–Job Performance Relationship: A Qualitative and Quantitative Review // Psychological Bulletin. 2001. Vol. 127, No. 3. P. 376–407. PMID: 11393302.
7. Kaplan S., Bradley J.C., Luchman J.N., Haynes D. On the Role of Positive and Negative Affectivity in Job Performance: A Meta-Analytic Investigation // Journal of Applied Psychology. 2009. Vol. 94, No. 1. P. 162–176.
8. Barsade S.G., Gibson D.E. Why Does Affect Matter in Organizations? // Academy of Management Perspectives. 2007. Vol. 21, No. 1. P. 36–59.
9. Pennebaker J.W., Booth R.J., Boyd R.L., Francis M.E. LIWC2015 Manual. Austin, TX: Pennebaker Conglomerates, 2015 (дата обращения: 11.09.2025).
10. Mohammad S., Turney P. Crowdsourcing a Word–Emotion Association Lexicon // Computational Intelligence. 2013. Vol. 29, No. 3. P. 436–465.
11. Demszky D. и др. GoEmotions: A Dataset of Fine-Grained Emotions // Proceedings of ACL. 2020. P. 4040–4054. DOI: 10.18653/v1/2020.acl-main.372.
12. Schuller B. и др. The INTERSPEECH 2009 Emotion Challenge // INTERSPEECH-2009 Proceedings. 2009. URL: https://www.isca-archive.org/... (дата обращения: 11.09.2025).
13. Trigeorgis G. и др. Adieu Features? End-to-End Speech Emotion Recognition using a Deep Convolutional Recurrent Network // ICASSP 2016. DOI: 10.1109/ICASSP.2016.7472669.
14. Abbaschian B.J., Sierra-Sosa D., Elmaghraby A. Deep Learning Techniques for Speech Emotion Recognition // Information. 2021. Vol. 12, No. 7. Article 270.
15. Gendron M., Barrett L.F. и соавт. Perceptions of Emotion from Facial Expressions Are Not Culturally Universal // Emotion. 2014. Vol. 14, No. 2. P. 251–262.
16. Bradburn N.M. The Structure of Psychological Well-Being. Chicago: Aldine, 1969. (см. материалы по Affect Balance Scale).
17. Weiss H.M., Cropanzano R. Affective Events Theory: A Theoretical Discussion of the Structure, Causes and Consequences of Affective Experiences at Work. 1996. Рабочая версия.
18. Bakker A.B., Demerouti E. The Job Demands–Resources model: State of the art // Journal of Managerial Psychology. 2007. Vol. 22(3). P. 309–328.
19. Barsade S.G. The Ripple Effect: Emotional Contagion and Its Influence on Group Behavior // Administrative Science Quarterly. 2002. Vol. 47(4). P. 644–675.
20. Schaufeli W.B. Applying the Job Demands–Resources model // Organizational Dynamics. 2017. Vol. 46(2). P. 120–132.

© Попков Сергей Сергеевич (sspopkov@list.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.33

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПОМПАЖНЫХ ТЕСТОВ НАГНЕТАТЕЛЕЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА Н-370-18-1

INVESTIGATION OF THE FREQUENCY SPECTRUM OF ACOUSTIC SIGNALS OBTAINED DURING SURGE TESTING OF H-380 NATURAL GAS COMPRESSORS

D. Popov
A. Soldatov

Summary. The paper presents an analysis of audio recordings captured during surge testing of a natural gas compressor. The recordings were processed using an algorithm based on the Fast Fourier Transform (FFT) method to evaluate the spectral characteristics of the sound waves. The experiment aimed to identify characteristic frequencies of specific signals occurring in pre-surge operating conditions of the compressor using a recording microphone. This study may contribute to the detection of pre-surge states of the compressor through acoustic signal analysis.

Keywords: compressor surge, early fault detection, acoustic sensor, Fourier transform, signal frequency spectrum.

Попов Дмитрий Анатольевич
Аспирант, Сургутский государственный университет
ppopovda@yandex.ru
Солдатов Алексей Иванович
доктор технических наук, профессор,
Томский политехнический университет;
профессор, Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
asoldatof@mail.ru

Аннотация. В статье представлен анализ звукозаписи во время проведения помпажных тестов нагнетателя природного газа, которая обрабатывалась алгоритмом на основе метода быстрого преобразования Фурье для анализа спектральной характеристики звуковых волн. Эксперимент направлен на выявление характерных частот определенных сигналов, возникающих на предпомпажных режимах работы нагнетателя с использованием звукозаписывающего микрофона. Данное исследование может помочь в выявлении предпомпажного состояния нагнетателя на основе звукоанализа.

Ключевые слова: помпаж нагнетателя, раннее обнаружение неисправностей, акустический датчик, преобразование Фурье, частотный спектр сигнала.

Введение

Центробежные одноступенчатые компрессоры широко используются на компрессорных станциях природного газа. Одним из ключевых рисков при их эксплуатации является явление помпажа — нестабильного гидродинамического режима, сопровождающегося большими колебаниями расхода и давления, резким увеличением шума, вибраций и вероятностью повреждения оборудования. Помпаж может привести к аварийному останову агрегата, снижению срока службы компонентов и значительным экономическим потерям [1].

Традиционная диагностика помпажа базируется на датчиках давления, расхода и вибрационных датчиках, а также на антипомпажных клапанах и системах управления [2]. Однако последние исследования продемонстрировали, что акустические методы мониторинга с применением спектральных методов (БПФ) позволяют обнаруживать предвестники помпажа на ранней стадии по характерным пиковым изменениям в акустическом спектре [3–5]. В частности, в серии опытов на одноступенчатом центробежном компрессоре, сопряжённом с SOFC-установкой, спектральный анализ давления и вибраций выявил предельные частоты, свидетельствующие о начале нестабильности [3].

Тем не менее, большинство подобных исследований выполнялось на лабораторных стендах, и пока недостаточно доказательств в отношении промышленной эксплуатации компрессоров. Это создаёт актуальную задачу создания применимых на практике, неинвазивных систем акустического мониторинга для раннего выявления предпомпажного состояния промышленных установок.

Постановка задачи

Авторы предлагают использовать частотный спектр акустических сигналов для идентификации возникновения предпомпажного состояния нагнетателй природного газа. Для определения частотного спектра акустического сигнала можно использовать преобразование Фурье [6–8]. Эту процедуру выполним в программном обеспечении MATLAB. Такое исследование позволит

определить характерные частоты, по которым станет возможным идентифицировать предпомпажное состояния до наступления самого помпажа нагнетателя.

К записанным акустическим сигналам была применена спектральная обработка, основанная на методе быстрого преобразования Фурье, так как данный метод характеризуется своим быстродействием ввиду меньшего числа операций по умножению и суммированию всех коэффициентов.

Быстрое преобразование Фурье — это алгоритм, вычисляющий дискретное преобразование Фурье последовательности. В геометрической интерпретации это намотка сигнала на комплексную плоскость и вычисление центра масс. Вывод алгоритма БПФ представлен в [9] (в том числе с реализацией на Free Pascal) и основан на ДПФ, описываемым формулой 1.

$$F(u) = \frac{1}{M}\sum_{x=0}^{M-1} f(x) e^{-\frac{2\pi i u x}{M}}, u = 0, 1, \ldots, M-1 \quad (1)$$

Быстрое преобразование Фурье осуществлялось применением функции FFT в аналитическом программном обеспечении MATLAB 2021 основываясь на документации [10].

Описание эксперимента

Было проведено 2 независимых эксперимента. В каждом эксперименте использовалось разное звукозаписывающее оборудование и разные образцы труб. При этом методы обработки и сравнения сигналов были одинаковы.

В табл. 1 представлены параметры и условия при проведении эксперимента.

Таблица 1.

Характеристики эксперимента

Параметр \ Эксперимент	Эксперимент 1	Эксперимент 2
Звукозаписывающее оборудование	Микрофон от гарнитуры A4tech Bloody G501 с интегрированной звуковой картой	Микрофон от гарнитуры A4tech Bloody G501 с интегрированной звуковой картой
ПО при записи сигналов с минимизацией шумов	Adobe Audition 2022	Adobe Audition 2022
ПО для обработки звуковых сигналов	MATLAB R2018b	MATLAB R2018b
Нагнетатель	370-18-1	370-18-1
Обороты при помпаже	3500	4300

В каждом из 2-х экспериментов с записью данного сигнала были записаны звуковые дорожки по 30 секунд с содержанием предпомпажного состояния нагнетателя, самого помпажа и состояния стабильной работы после открытия антипомпажного клапана.

В данном случае мы рассматриваем частоты от 0 до 300 Гц (от средне-средних до верхнесредних частот). Так как выше отметки 300 Гц располагаются высокие частоты с малой звуковой мощностью и с учетом нашей аппаратуры после первичного анализа всего спектра такой диапазон нам мало интересен.

Методика проведения анализа спектров частот

Первым рассмотренным сигналом является запись появления помпажа при оборотах нагнетателя на значениях 3500 оборотов в минуту. При проведении анализа в ПО Matlab производились следующие действия:

1) Определялась точка начала помпажа по характерным признакам (плавающие обороты, хлопки, высокая вибрация и шум). На записи с оборотами нагнетателя 3500 данный момент настал на пятой секунде записи, на записи помпажа при оборотах 4300 настал на 7-й секунде;
2) Затем определялся диапазон нормальной работы;
3) В последнюю очередь определись диапазоны предпомпажного режима работы со сдвигом в 1 секунду до наступления помпажа;
4) Выводились и рассчитывались графики следующих типов, диапазоны выбирались одинаковой продолжительности для корректного сравнения:

a) Тип 1 — содержит график спектра нормальной работы и предпомпажа с запасом 2 секунды до помпажа
b) Тип 2 — содержит график спектра нормальной работы и предпомпажа с запасом 1 секунду до помпажа
c) Тип 3 — содержит график спектра нормальной работы и помпажа
d) Тип 4 — содержит вычитание графика спектра нормальной работы из графика спектра предпомпажа с запасом 2 секунды до помпажа
e) Тип 5 — содержит вычитание графика спектра нормальной работы из графика спектра предпомпажа с запасом 1 секунду до помпажа
f) Тип 6 — содержит вычитание графика спектра нормальной работы из графика спектра помпажа.

Данные по выбранным диапазонам представлены в табл. 2.

По результатам первого приближения было видно как в зависимости от приближения к помпажу мощность частот растёт в области низких частот в районе 50–60 герц, где по мере приближения к помпажу растет мощность

Таблица 2.

Данные по выбранным диапазонам

Номер эксперимента	Запись при 3500 об/мин.		Запись при 4300 об/мин.	
Диапазон	Начало диапазона сек.	Конец диапазона сек.	Начало диапазона сек.	Конец диапазона сек.
Нормальная работа	19	23	0	4
Предпомпаж с запасом 2 сек.	0	4	2	6
Предпомпаж с запасом 1 сек.	1	5	3	7
Помпаж	5	9	7	11

в районе 52–54 Гц, как на первой, так и на второй записи. Ограничение диапазона в области до 70 Гц не потребуют высокой частоты дискретизации от анализирующих устройств согласно теореме Котельникова. На следующих рисунках представлены отображения спектров после быстрого преобразования Фурье с нормализацией относительно самого мощного сигнала частоты в спектре. Красной прерывистой линией отображается спектр взятый как «Нормальный режим работы», синей линией отображен сравниваемый с нормой график. Исключение составляет график с вычитанием «нормальной работы» из анализируемого спектра, чтобы увидеть разницу, какие сигналы относительно нормы начинают расти, а какие, наоборот, падать.

На участке записи эксперимента за 2 секунды от установленной отметки начала помпажа на оборотах 3500 относительно нормальной работы нагнетателя на рисунке 1 и рисунке 2, видно заметное увеличение относительной мощности частот в области 52–54 Гц и одновременное уменьшение относительной мощности частот в свыше 60 Гц.

По мере приближения анализируемого участка записи к помпажу за 1 секунду от установленной отметки начала помпажа на оборотах 3500 относительно нормальной работы нагнетателя на рисунке 3 и рисунке 4, видим сохраняющуюся тенденцию увеличения относительной мощности частот в области 52–54 Гц и одновременное уменьшение относительной мощности частот в свыше 60 Гц.

На участке записи эксперимента за 2 секунды от установленной отметки начала помпажа на оборотах 4300 относительно нормальной работы нагнетателя на рисунке 5 и рисунке 6 можно отметить похожее на 1й эксперимент увеличение относительной мощности частот в точках 53 Гц и 58 Гц однако одновременного уменьшения относительной мощности частот в свыше 60 Гц выделить не удалось.

По мере приближения анализируемого участка записи к помпажу за 1 секунду от установленной отметки начала помпажа на оборотах 4300 относительно нормальной работы нагнетателя на рисунке 7 и рисунке 8, видим сохраняющуюся тенденцию увеличения относительной мощности частот в точках 53 Гц и 58 Гц и одновременное уменьшение относительной мощности частот в свыше 60 Гц прослеживается.

Анализ результатов

Обращая внимание на спектральный анализ после быстрого преобразования Фурье, можно выделить ха-

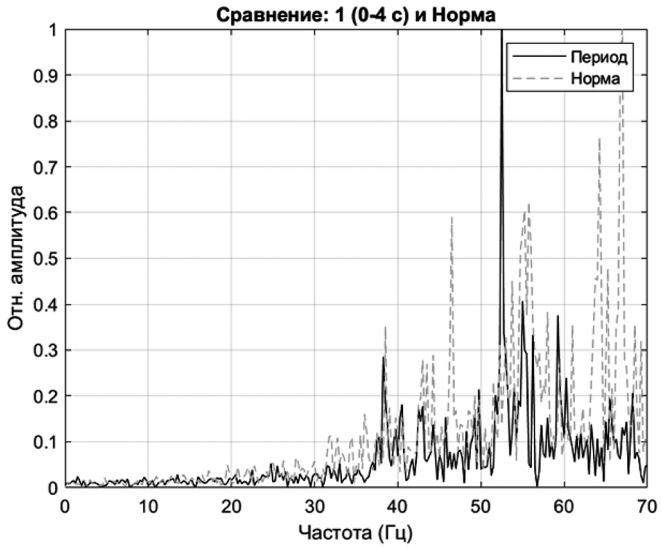


Рис. 1. Сравнение частотных спектров нормального режима работы и предпомпажного с запасом 2 секунды с нормализацией (3500 об/мин.)

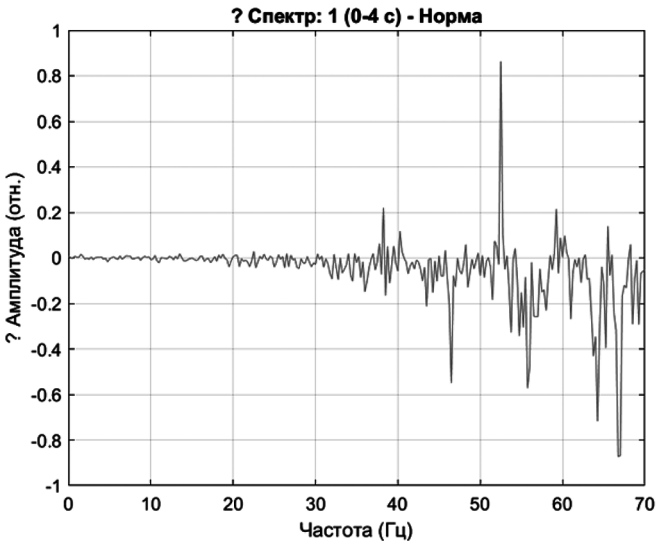


Рис. 2. Вычитание частотного спектра нормального режима работы из предпомпажного с запасом 2 сек. (3500 об/мин.)

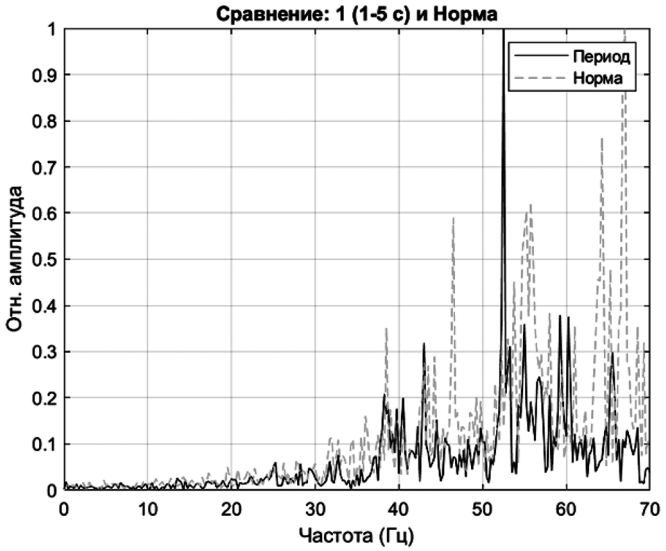


Рис. 3. Сравнение частотных спектров нормального режима работы и предпомпажного с запасом 1 секунду с нормализацией (3500 об/мин.)

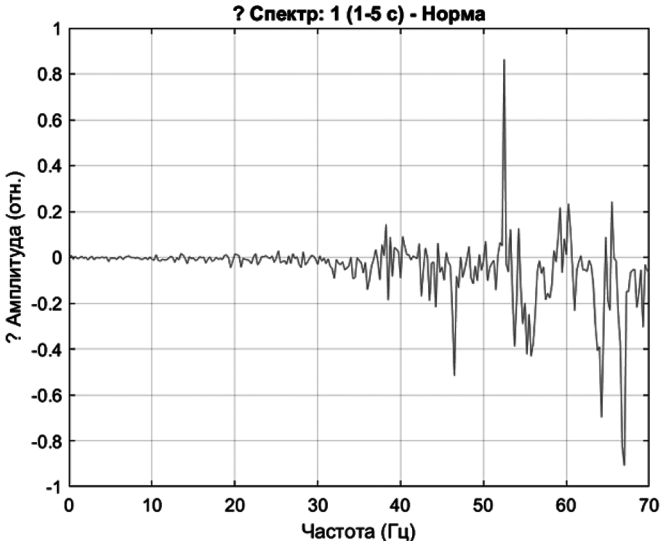


Рис. 4. Вычитание частотного спектра нормального режима работы из предпомпажного с запасом 1 сек. (3500 об/мин.)

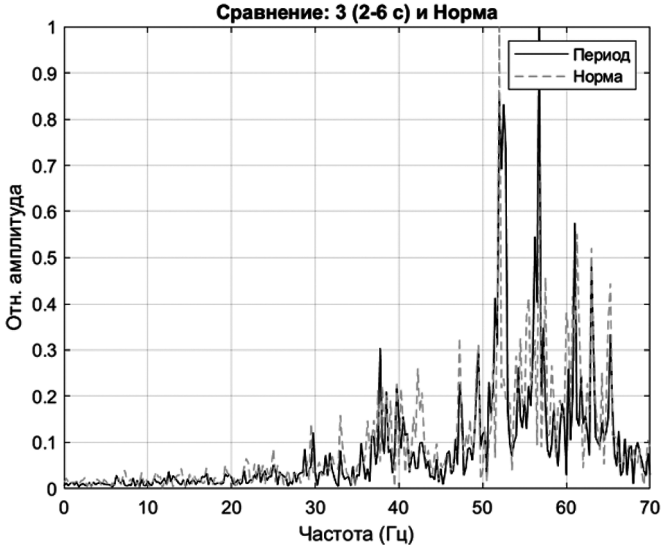


Рис. 5. Сравнение частотных спектров нормального режима работы и предпомпажного с запасом 2 секунды с нормализацией (4300 об/мин.)

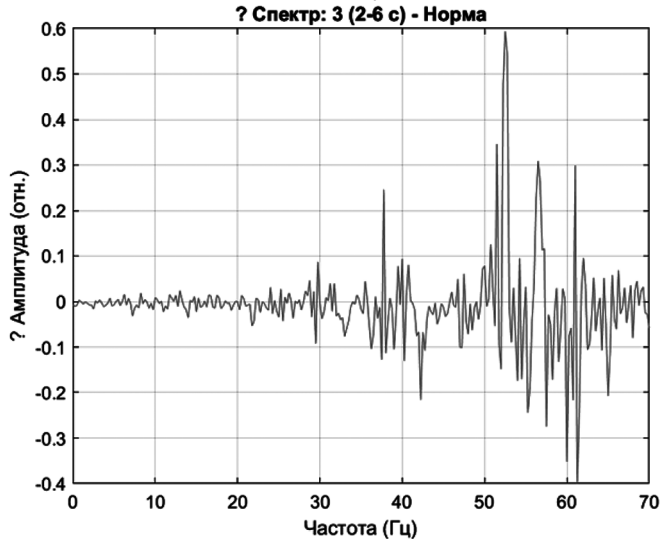


Рис. 6. Вычитание частотного спектра нормального режима работы из предпомпажного с запасом 2 сек. (4300 об/мин.)

рактерное увеличение амплитуды сигнала на частотах 52–54 Гц и 57–58 Гц по мере приближения к началу помпажа агрегата. Это согласуется с данными недавно опубликованного исследования, где авторы отмечают появление акустических признаков в диапазоне 30–85 Гц, предшествующих помпажу, хотя они не всегда отражаются в сигнале давления [11]. Наблюдаемое повышение амплитуд на указанных частотах, вероятно, связано с возбуждением субсинхронных осцилляций в системе — таких явлений прежде также связывали с предвестниками нестабильности потоков в центробежных компрессорах [12].

Дальнейший анализ с использованием параллельной записи давления на конфузоре и вибраций вала и корпуса нагнетателя с использованием тех же методов может уточнить природу этих сигналов, а в перспективе — связать их с конкретными физическими механизмами: будь то роторно-полостные колебания, структурные резонансы трубопроводов или акустические резонансы элементов конструкции. Важно проверить, являются ли пики устойчиво воспроизводимыми при повторных заходах на помпаж, и как они изменяются с вариацией массового расхода или режима работы.

Следующим шагом предлагается:

Статистический анализ амплитудного роста на этих частотах при серии проходов режимов;

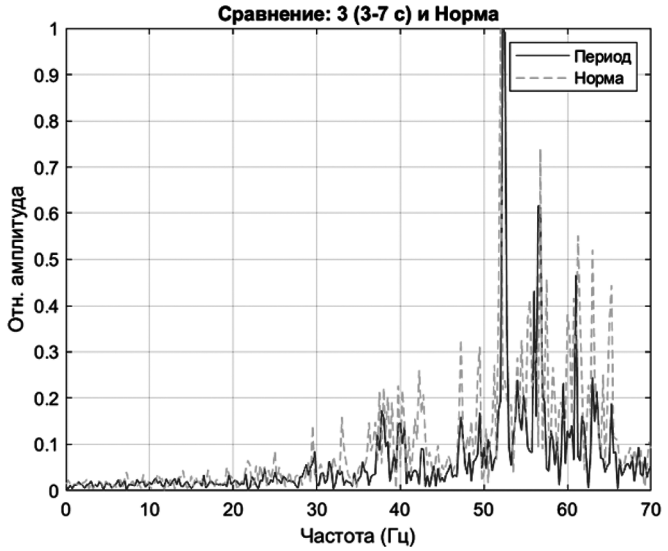


Рис. 7. Сравнение частотных спектров нормального режима работы и предпомпажного с запасом 1 секунду с нормализацией (4300 об/мин.)

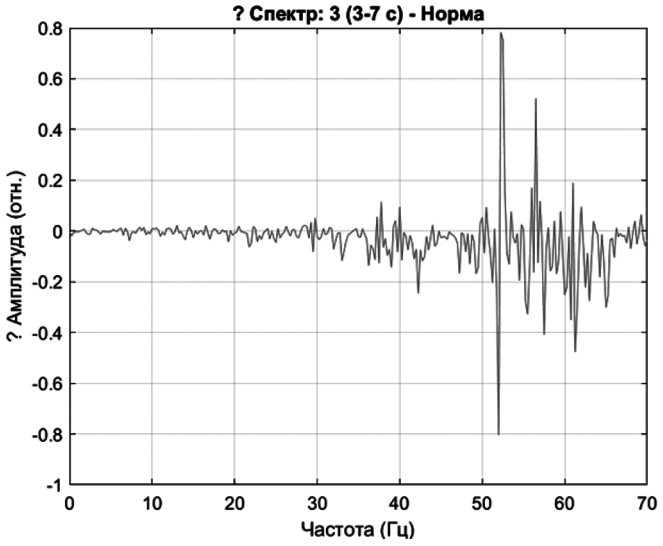


Рис. 8. Вычитание частотного спектра нормального режима работы из предпомпажного с запасом 1 сек. (4300 об/мин.)

Выделение относительных изменений амплитудного отношения сигнал / фон;

Сопоставление с сигналами давления и вибрации, записанными параллельно, для выделения комплексной картины предвестников помпажа.

Заключение

Проведённое исследование спектрального анализа акустических сигналов, записанных вблизи промышленного одноступенчатого центробежного нагнетателя в процессе контролируемого перехода к помпажу, подтвердило эффективность метода быстрого преобразования Фурье для раннего выявления нестабильности. Выделены характерные частотные пики на 52–54 Гц и 57–58 Гц с выраженным увеличением амплитуды при приближении к помпажному режиму, что согласуется с описанием акустических предвестников в диапазоне до 85 Гц в центробежных установках [11].

Результаты исследования показали:

- Низкочастотные пики как индикатора приближения к помпажу, согласующиеся с описанными ранее акустическими признаками предвестников [13, 14].
- Высокая чувствительность метода к субсинхронным колебаниям, связанным с гидродинамическими изменениями в тракте.
- Практическая применимость FFT-анализа в условиях промышленной работы оборудования, что значительно расширяет возможности мониторинга.

При этом отмечены факторы, влияющие на точность диагностики:

- Инструментальная калибровка микрофонных сенсоров и вариации акустики корпуса;
- Окружающий фон и режим эксплуатации, влияющие на амплитудные характеристики спектра;
- Необходимость верификации стабильности частотных индикаторов при повторных циклах приближения к помпажу.

На основании выводов сформулирована стратегия дальнейшей работы:

- Разработка автоматизированного поиска пиков и пороговых значений амплитуды;
- Внедрение совместного анализа акустических, вибрационных и сигналов давления;
- Формирование базы эталонных спектров для последующего сравнения;
- Адаптация к различным условиям (температура, давление, конструктивные изменения) реальных установок.

В целом, проведённый эксперимент представляет собой весомый вклад в область неинвазивного акустического мониторинга центробежных компрессоров. FFT-анализ демонстрирует потенциал для создания системы предупреждения помпажа. Следующие этапы — верификация алгоритмов в реальном времени, использование усовершенствованных сигналов обработки (вейвлет-анализ), и тестирование на оборудовании с различной конструкцией корпуса и условиями эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грапов Ф., Лискивиц Г. Моделирование компрессора на основе модели Гритцера с верификацией по колебаниям давления // Труды Института гидродинамики Флоумашини № 133, 2016. С. 69–89.
2. Братек В., Ботрос К. Динамический анализ регулирования перенапряжений в системах центробежных компрессоров. Анализ оборудования Beta, 2013.
3. Сильвестри П., Марелли С., Usai B. Экспериментальное исследование вибрационного и гидродинамического поведения турбокомпрессора при переходе в режим помпажа // E3S Web of Conferences. 2023.
4. Сильвестри П. и др. Виброакустические характеристики и анализ сигналов давления для раннего обнаружения помпажа в компрессоре с турбонаддувом // J. Eng. Мощность газовых турбин. 2023. Т. 145, № 10. С. 101012.
5. Краверо А., Марсано Д. Обнаружение неустойчивости центробежных компрессоров путем акустических измерений // Rev. Feb 2024.
6. Шамсыев Э.Х., Павлов А.Д. Методы идентификации голоса человека // Сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции. СПб.: Scythia-Print, 2022. 3 с. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_49432585_89798867.pdf
7. Кандидов В.П., Чесноков С.С., Шленов С.А. Дискретное преобразование Фурье: учебно-методическое пособие. М.: МГУ, 2019. 88 с. ISBN 978-5-8279-0179-2
8. Воропаева Н.В., Новиков С.Я., Федина М.Е. Дискретное преобразование Фурье в обработке сигналов: учебное пособие. Самара: Самарский университет, 2015. 48 с. ISBN 978-5-86465-683-9
9. Койнов С. Быстрое преобразование Фурье (реализация на языке Free Pascal) [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.freepascal.ru/download/text/20110816221600/fft.pdf
10. Фурье преобразование (scipy.fft) [Electronic resource]. Режим доступа: https://docs.scipy.org/doc/scipy/tutorial/fft.html
11. Zhao B., Zhou T., Yang C. Экспериментальное исследование шума при помпаже центробежного компрессора // Journal of Turbomachinery. — 2023. — Т. 145, № 8. — С. 081014. — DOI: https://doi.org/10.1115/1.4062244.
12. Reggio F., Ferrari M., Silvestri P., Massardo A.F. Вибрационный анализ для определения предвестников помпажа в газотурбинных установках // Meccanica. — 2019. — Т. 54, № 9. — С. 2239–2254. — DOI: 10.1007/s11012-019-01016-0.
13. Cabrera K., Pezzini P., Shadle L., Bryden K.M. Обнаружение помпажа и срыва потока с использованием акустического анализа в гибридных газотурбинных циклах // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. — 2019. — Т. 142, № 4. — Ст. 041026. — DOI: 10.1115/1.4045218.
14. Bie F., Chen S., Lyu F., Zhu H., Li Q., Miao X. Исследование метода диагностики неисправностей клапана поршневого компрессора на основе модели IVMD-CMS // Journal of Mechanical Science and Technology. — 2023. — Т. 37. — С. 3931–3943. — DOI: 10.1007/s12206-023-0716-5.

© Попов Дмитрий Анатольевич (ppopovda@yandex.ru); Солдатов Алексей Иванович (asoldatof@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.35

ШАБЛОН РАЗВЕРТЫВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ КЭШЕЙ ВТОРОГО УРОВНЯ (L2) В KUBERNETES-КЛАСТЕРАХ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ZERO-DOWNTIME ОПЕРАЦИЙ

DEPLOYMENT AND STATE MANAGEMENT TEMPLATE FOR SECOND-LEVEL DISTRIBUTED CACHES (L2) IN KUBERNETES CLUSTERS, IN ORDER TO ENSURE ZERO-DOWNTIME OPERATIONS

P. Romanovsky
V. Smetanin
A. Kapliyenko
E. Samborenko
A. Rusakov

Summary. Within the framework of this scientific work, the current problem of ensuring high availability and fault tolerance of distributed second-level (L2) caching systems in the Kubernetes container orchestration environment is investigated. The author conducts an in-depth analysis of the limitations of standard controllers (Deployment), revealing their unsuitability for servicing stateful applications with strict requirements for maintaining the state and stability of network identification. The article proposes and practically implements a specialized deployment template based on the Redis Cluster and the StatefulSet controller, which integrates Headless service mechanisms to provide deterministic addressing and Persistent Volume Claims to save data on local node storage. The practical significance of the work is confirmed by a series of experiments in the K3s cluster, including simulation of emergency failures and scheduled updates. The test results (verified by data write and read operations after node restart) prove the possibility of providing zero-downtime operations and significantly reducing cache recovery time, which prevents degradation of the performance of underlying databases in highly loaded systems.

Keywords: Kubernetes, orchestration, Redis Cluster, L2 cache, StatefulSet, fault tolerance, zero-downtime, cloud computing, Persistent Volume, Headless Service, K3s, High Availability, High Availability, Stateful storage, data sharding.

Романовский Петр Юрьевич
Российский технологический университет МИРЭА
Сметанин Виктор Максимович
Российский технологический университет МИРЭА
Каплиенко Александра Михайловна
Российский технологический университет МИРЭА
Самборенко Евгений Алексеевич
Российский технологический университет МИРЭА
mduejej@gmail.com
Русаков Алексей Михайлович
Кандидат технических наук, старший преподаватель, Российский технологический университет МИРЭА

Аннотация. В рамках данной научной работы исследуется актуальная проблема обеспечения высокой доступности и отказоустойчивости распределенных систем кэширования второго уровня (L2) в среде контейнерной оркестрации Kubernetes. Проводится глубокий анализ ограничений стандартных контроллеров (Deployment), выявляя их непригодность для обслуживания stateful-приложений с жесткими требованиями к сохранению состояния и стабильности сетевой идентификации. В статье предложен и практически реализован специализированный шаблон развертывания на базе Redis Cluster и контроллера StatefulSet, интегрирующий механизмы Headless-сервисов для обеспечения детерминированной адресации и Persistent Volume Claims для сохранения данных на локальных накопителях узлов. Практическая значимость работы подтверждена серией экспериментов в кластере K3s, включающих имитацию аварийных сбоев и плановых обновлений. Результаты тестирования (верифицированные операциями записи и чтения данных после рестарта узлов) доказывают возможность обеспечения zero-downtime операций и существенного сокращения времени восстановления кэша, что предотвращает деградацию производительности нижележащих баз данных в высоконагруженных системах.

Ключевые слова: Kubernetes, оркестрация, Redis Cluster, L2-кэш, StatefulSet, отказоустойчивость, zero-downtime, облачные вычисления, Persistent Volume, Headless Service, K3s, высокая доступность, High Availability, сохранение состояния, шардирование данных.

Введение

Развитие современной микросервисной архитектуры и рост популярности высоконагруженных платформ (онлайн-кинотеатры, маркетплейсы, игровые сервисы) предъявляют беспрецедентные требования к скорости обработки запросов [1]. В этих условиях кэширование данных второго уровня (L2) становится критически важным звеном инфраструктуры, напрямую влияющим на пользовательский опыт (latency) и стабильность систем [2]. Однако перенос таких stateful-сервисов в динамическую среду Kubernetes сопряжен с серьезными технологическими вызовами.

Стандартные методы оркестрации, ориентированные на эфемерность контейнеров, не учитывают специфику распределенных кэшей, где потеря состояния одного узла или изменение его сетевого адреса может привести к «кэш-шторму» (cache miss storm) — лавинообразному росту нагрузки на основную базу данных [3]. Отсутствие формализованных, отказоустойчивых шаблонов эксплуатации приводит к вынужденным простоям при плановых обновлениях и увеличивает время восстановления сервиса после аварий. Данная работа направлена на решение задачи непрерывного функционирования L2-кэша путем разработки архитектурного шаблона, гарантирующего сохранность данных и связность кластера в любых операционных сценариях [4, 5].

Цель исследования: Разработка и экспериментальная верификация шаблона управления распределенным кэшем второго уровня в Kubernetes (на примере Redis Cluster), обеспечивающего выполнение технологических операций с нулевым простоем (zero-downtime) и гарантированное сохранение состояния данных при отказах узлов.

В ходе выполнения исследования были определены и решены следующие задачи:

1. Проанализировать недостатки стандартных средств оркестрации (Deployment, ReplicaSet) при работе с распределенными системами хранения данных. Спроектировать архитектуру шаблона, интегрирующую механизмы стабильной сетевой идентификации и персистентного хранения данных для обеспечения жизненного цикла узлов кэша.
2. Спроектировать архитектуру шаблона, базирующуюся на использовании StatefulSet, Headless Service и динамических Persistent Volumes для обеспечения жизненного цикла узлов.
3. Развернуть экспериментальный стенд в инфраструктуре K3s, сконфигурировав отказоустойчивый Redis Cluster из шести узлов (мастер-узлы и реплики).
4. Апробировать механизм безопасного обновления кластера (rollout), исключающий потерю кворума и доступности сегментов данных.
5. Экспериментально подтвердить эффективность сохранения состояния данных («Alice/Bob» test) при имитации аварийного удаления подов.
6. Верифицировать стабильность сетевой связности кластера при использовании FQDN-идентификаторов вместо динамических IP-адресов.

Анализ недостатков стандартных средств оркестрации Kubernetes

Стандартная парадигма оркестрации в Kubernetes строится на принципах эфемерности и взаимозаменяемости компонентов (подход «cattle, not pets»). Это идеально подходит для приложений без сохранения состояния (stateless), однако создает фундаментальный технологический барьер при развертывании распределенных L2-кэшей. Основная проблема заключается в «конфликте жизненных циклов»: контроллер Kubernetes стремится к динамическому перераспределению ресурсов, в то время как распределенный кэш (например, Redis Cluster) требует жесткой детерминированности сетевой идентификации и топологической связности данных [6].

При использовании стандартных контроллеров типа Deployment или ReplicaSet возникают критические риски, связанные с нарушением консистентности кластера [7]. Поскольку данные в L2-кэше шардированы (распределены по сегментам), потеря одного узла без сохранения его состояния приводит к выпадению значительной части хеш-слотов. Стандартный механизм RollingUpdate не учитывает роли узлов (Master/Slave), что в условиях высоконагруженных систем неизбежно ведет к деградации производительности.

Для систематизации выявленных проблем проведем сравнительный анализ эксплуатационных характеристик стандартных средств оркестрации и специфических требований распределенных систем кэширования (Таблица 1).

Дополнительным фактором риска является стандартный механизм проверок готовности (Health Checks). В классических сценариях проверка порта 6379 является достаточной, однако для распределенного кэша этого мало. Узел может иметь открытый порт, но находиться в состоянии изоляции от кластера или в процессе долгой загрузки данных с диска. Стандартные средства оркестрации не позволяют «из коробки» учитывать внутренний статус готовности распределенной системы, что приводит к преждевременному направлению клиентского трафика на несинхронизированный узел.

Таким образом, для обеспечения операций уровня zero-downtime необходимо отойти от использования базовых контроллеров в пользу шаблона на базе StatefulSet [8]. Этот контроллер обеспечивает стабильный сетевой идентификатор (например, redis-cluster-0), упорядоченное развертывание и, что наиболее важно, сохранение связи между конкретным экземпляром приложения и его томом данных Persistent Volume (PV). Это создает необходимый фундамент для реализации механизмов автоматического восстановления и бесшовного обновления конфигурации [9].

Проектирование архитектуры и реализация стенда

Для реализации и верификации отказоустойчивого шаблона был спроектирован экспериментальный стенд на базе облегченного дистрибутива Kubernetes — K3s.

Таблица 1.

Сравнительный анализ ограничений стандартных абстракций Kubernetes для stateful-сервисов

Критерий эксплуатации	Поведение контроллера Deployment	Требование распределенного L2-кэша	Риски для стабильности системы
Сетевая идентификация	Динамическое назначение IP-адресов и случайных имен подов	Необходимость фиксированных FQDN-имен для поддержания Gossip-протокола	Нарушение топологии кластера и невозможность автоматического повторного присоединения (rejoin) узла
Управление хранилищем	Использование временных хранилищ (EmptyDir), полностью очищаемых при рестарте контейнера	Персистентность дискового кэша (AOF/RDB) для минимизации времени «прогрева» системы	Возникновение кэш-штормов (cache miss) и лавинообразная нагрузка на основную базу данных
Порядок жизненного цикла	Параллельный и произвольный порядок запуска и остановки реплик в группе	Строгая последовательность операций для обеспечения кворума и корректной синхронизации данных	Конфликты при записи и высокий риск расслоения данных (состояние split-brain)
Стратегия ротации	Ротация подов на основе общих лимитов доступности (maxUnavailable) без учета логики приложения	Приоритетный учет ролей узлов для предотвращения одновременного отключения мастера и его реплики	Частичная потеря доступности сегментов (слотов) данных и переход всего кластера в статус Fail
Связывание ресурсов	Отсутствие гарантии возврата пересозданного пода к конкретному ранее выделенному тому данных	Детерминированная привязка пары «узел-том» через механизм шаблонов VolumeClaimTemplates	Необходимость проведения ресурсоемкой полной ресинхронизации данных по сети (Full Snapshot)

Выбор данной платформы обусловлен её полной совместимостью с API Kubernetes при минимальных накладных расходах на ресурсы управляющего узла, что позволяет сфокусироваться на исследовании механизмов оркестрации stateful-приложений. Инфраструктурный слой стенда (Рисунок 1) включает в себя один управляющий узел (control-plane) и два рабочих узла (worker-nodes), что является минимально достаточным условием для проверки политик распределения подов (Pod Anti-Affinity) и отказоустойчивости кластера.

Центральным элементом архитектуры является шаблон развертывания, основанный на контроллере StatefulSet. В отличие от стандартных решений, данный шаблон реализует «жесткую» связку между логическим узлом кэша, его сетевым именем и дисковым пространством. Для обеспечения распределенного хранения данных в режиме L2-кэша используется связка из шести инстансов Redis, сконфигурированных в режиме Cluster (3 мастера и 3 реплики) [10, 11]. Сетевая связность обеспечивается через Headless Service, который создает в DNS кластера записи для каждого пода, позволяя узлам Redis взаимодействовать по стабильным именам (например, redis-cluster-0. redis-service), независимо от смены их внутренних IP-адресов.

Особое внимание в архитектуре уделено подсистеме хранения данных. Для каждого пода через механизм volumeClaimTemplates динамически резервируется персональный том Persistent Volume на базе локального хранилища (local-path storage). Это гарантирует, что при перезапуске любого узла кэша (вследствие аварии или планового обновления) данные оперативной памяти будут оперативно восстановлены из снимков на диске (RDB/AOF), предотвращая потерю состояния L2-слоя и исключая избыточную нагрузку на сеть кластера для полной ресинхронизации.

Для реализации отказоустойчивого шаблона был спроектирован стенд на базе облегченного дистрибутива Kubernetes — K3s (Рисунок 1).

На Рисунке 1 представлена спроектированная логическая архитектура стенда. В рамках кластера K3s развернуто три рабочих узла, на которых равномерно распределены шесть инстансов Redis. Мастер-узлы (Master) оперируют конкретными диапазонами хеш-слотов (от 0 до 16383), обеспечивая горизонтальное шардирование данных. Каждому мастеру соответствует реплика (Replica), расположенная на том же узле (согласно базовой конфигурации стенда), что позволяет верифицировать механизмы отказоустойчивости при сбое конкретных процессов. Важной особенностью является интеграция каждого пода с персональным томом Persistent Volume Claim (PVC), что гарантирует сохранность данных конкретного сегмента кэша при перезагрузке контейнеров.

Выбор технологического стека для реализации стенда обусловлен необходимостью моделирования реальных условий высоконагруженной среды при сохранении прозрачности управления. В качестве базовой инфраструктуры использован дистрибутив K3s, который, обладая полной совместимостью с API Kubernetes [12], оптимизирован для работы в условиях ограниченных ресурсов. Архитектура стенда предполагает разделение

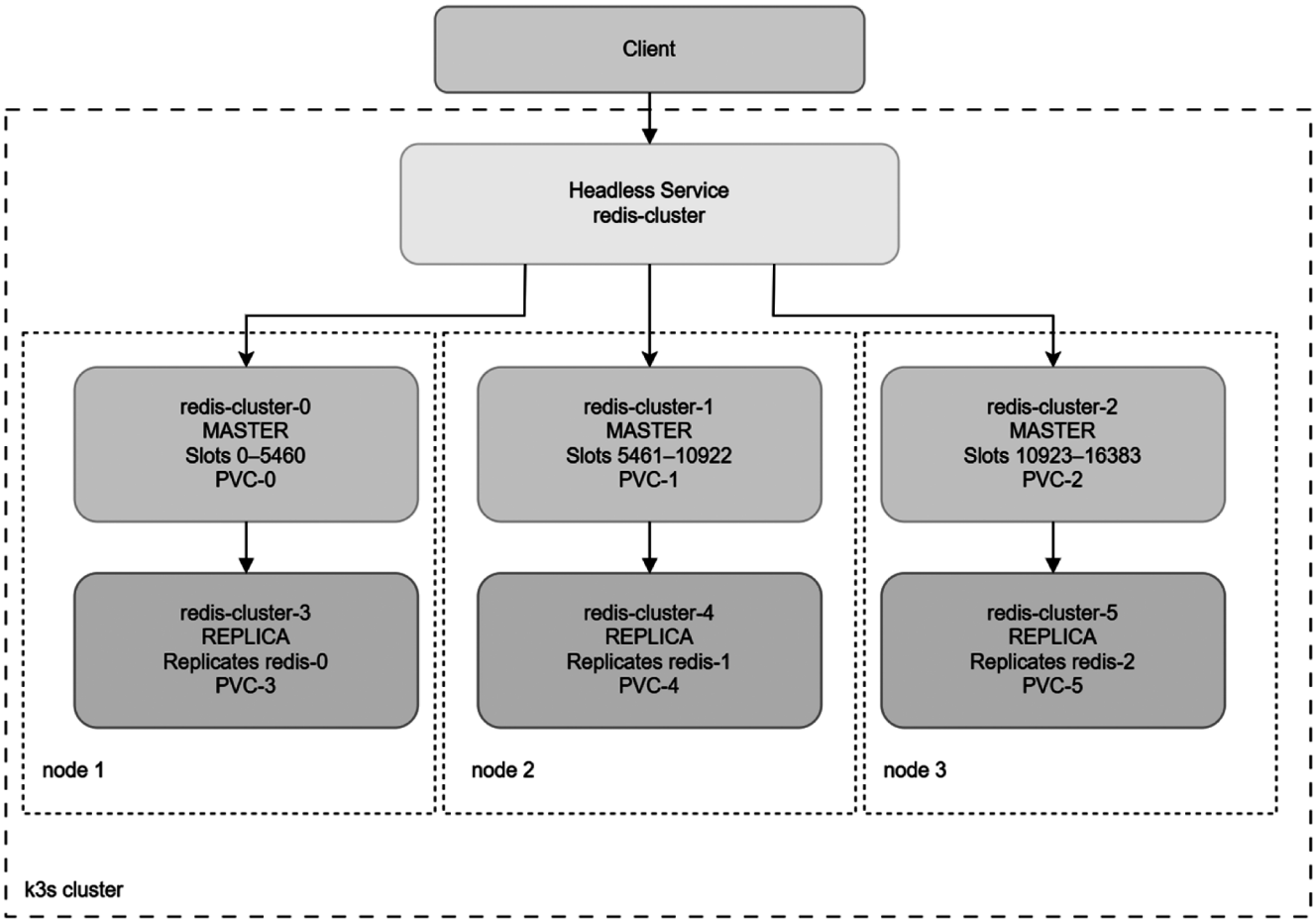


Рис. 1. Проектирование архитектуры и реализация стенда

ролей на управляющий узел (control-plane) и группу рабочих узлов (workers). Такое физическое или логическое разнесение критически важно для проверки политик Pod Anti-Affinity, которые гарантируют, что мастер-узел кэша и его соответствующая реплика не будут запущены на одном и том же физическом хосте, исключая единую точку отказа на уровне инфраструктуры [13]. Это позволяет минимизировать накладные расходы на управление кластером при сохранении полной совместимости с API Kubernetes (Рисунок 2).

Фундаментальной особенностью разработанного шаблона является использование контроллера StatefulSet в связке с Headless Service. В отличие от стандартных методов развертывания, данная связка обеспечивает каждому узлу Redis стабильный сетевой идентификатор (FQDN), который сохраняется на протяжении всего жизненного цикла кластера. Это решает проблему динамической адресации: в режиме Redis Cluster узлы должны обмениваться информацией о топологии и распределении хеш-слотов, используя фиксированные адреса [14]. Применение Headless-сервиса позволяет подам напрямую взаимодействовать друг с другом по именам вида redis-cluster-0. redis-service, что является необходимым условием для корректной работы механизмов автоматического переизбрания мастера (failover) без участия

```
user@k3s-master:~/redis-project$ kubectl get nodes
NAME          STATUS   ROLES                  AGE   VERSION
k3s-master    Ready    control-plane,master   26d   v1.33.6+k3s1
k3s-worker1   Ready    <none>                 26d   v1.33.6+k3s1
k3s-worker2   Ready    <none>                 26d   v1.33.6+k3s1
```

Рис. 2. Инфраструктурная база: кластер K3s в составе master-узла и двух рабочих узлов

```
user@k3s-master:~/redis-project$ kubectl get statefulset -n redis
NAME            READY   AGE
redis-cluster   6/6     10m
```

Рис. 3. Контроллер StatefulSet, управляющий шестью репликами Redis.

внешних балансировщиков. StatefulSet обеспечивает стабильные сетевые идентификаторы (redis-cluster-0, redis-cluster-1 и т.д.), упорядочивая развертывание и масштабирование. Связь каждого пода с персональным томом данных (Persistent Volume) закрепляется (Рисунок 3).

Управление состоянием данных в шаблоне реализовано через абстракцию VolumeClaimTemplates. Это позволяет динамически создавать индивидуальные тома Persistent Volume (PV) для каждого пода в кластере, что обеспечивает сохранность данных после сбоев или плановых обновлений (задача автоматического восстановления) (Рисунок 4) [15]. Теоретическая значимость такого подхода заключается в обеспечении «живучести» данных L2-кэша: при плановом обновлении образа (Rolling Update) или аварийном перезапуске пода, новый экземпляр автоматически монтирует тот же самый объем памяти (дисковый кэш), где сохранен файл конфигурации nodes.conf и снимки данных (AOF/RDB) [16]. Таким образом, процедура восстановления сокращается до времени старта процесса Redis, исключая длительный этап полной ресинхронизации данных по сети, что критически важно для минимизации задержек в системах с большими объемами кэшируемой информации.

Для zero-downtime операций кэш развернут в режиме Cluster. Данные шардируются между мастер-узлами, а каждый мастер имеет свою реплику (slave) (Рисунок 5).

Тестирование и практические результаты

Проверка работоспособности шаблона осуществляется путем комплексного тестирования, включающего имитацию плановых обновлений и аварийных сценариев. Основная цель — подтвердить сохранение доступности данных и работоспособности кластера в условиях ротации узлов.

На первом этапе проверялась стабильность кластера при выполнении команды kubectl rollout restart. Благодаря использованию StatefulSet, обновление узлов происходит последовательно. После перезапуска каждый под автоматически подхватывает файл конфигурации nodes.conf, что позволяет ему мгновенно восстановить свою роль в кластере без ручного вмешательства (Рисунок 6).

На Рисунке 6 видно, что каждый мастер-узел (master) имеет связанную реплику (slave), находящуюся на другом физическом или виртуальном узле (согласно affinity rules, настроенным в шаблоне).

Для обеспечения zero-downtime операций критически важна работа через Headless-сервис. В ходе тестирования было подтверждено, что узлы идентифицируют друг друга по полным доменным именам (FQDN), что гарантирует неизменность топологии при смене вну-

```
user@k3s-master:~/redis-project$ kubectl get pvc -n redis
NAME                        STATUS   VOLUME                                     CAPACITY   ACCESS MODES   STORAGECLASS
  VOLUMEATTRIBUTESCLASS   AGE
redis-data-redis-cluster-0   Bound    pvc-44c98e6e-2d2b-4466-85f4-d46b7c77e03a   2Gi        RWO            local-path
  <unset>                 9m41s
redis-data-redis-cluster-1   Bound    pvc-38530380-b425-4b1e-a2ee-d049949be899   2Gi        RWO            local-path
  <unset>                 9m41s
redis-data-redis-cluster-2   Bound    pvc-2b75088c-b789-4060-96a5-4504e6cfb8d6   2Gi        RWO            local-path
  <unset>                 9m41s
redis-data-redis-cluster-3   Bound    pvc-a48622ad-aa8c-408d-ab7a-33d8497d52cc   2Gi        RWO            local-path
  <unset>                 9m41s
redis-data-redis-cluster-4   Bound    pvc-48ae014b-9fb0-4e5a-8e5a-99e4e806653b   2Gi        RWO            local-path
  <unset>                 9m41s
redis-data-redis-cluster-5   Bound    pvc-8f61595e-675b-4449-9e7d-d085aec23428   2Gi        RWO            local-path
  <unset>                 9m41s
```

Рис. 4. Использование локальных томов (local-path) для хранения состояния каждого узла кэша

```
user@k3s-master:~/redis-project$ kubectl get pods -n redis
NAME                READY   STATUS    RESTARTS   AGE
redis-cluster-0     1/1     Running   0          9m4s
redis-cluster-1     1/1     Running   0          9m4s
redis-cluster-2     1/1     Running   0          9m4s
redis-cluster-3     1/1     Running   0          9m4s
redis-cluster-4     1/1     Running   0          9m4s
redis-cluster-5     1/1     Running   0          9m4s
```

Рис. 5. Состояние подов распределенного кэша: запущены 3 мастера и 3 реплики

```
user@k3s-master:~/redis-project$ kubectl -n redis exec redis-cluster-0 -- redis-cli cluster nodes
150089f33cf2bcce3bd74fd6f527cf5069d29c62 10.42.2.33:6379@16379 master - 0 1768336387483 2 connected 5461-10922
8e17deac27b22111fbc5f0b4bb84cb44ff8ec704 10.42.2.34:6379@16379 slave b64ffb44f3068a38df269fff6db6e32ac3b7844e 0 17683363
86581 3 connected
596f04b01abcda81efcf0691d8f4fbf97444b93d 10.42.0.36:6379@16379 slave fee2cc5968a66f0093d8cfc45a6e7d8fe12f79a2 0 17683363
87986 1 connected
fee2cc5968a66f0093d8cfc45a6e7d8fe12f79a2 10.42.1.35:6379@16379 myself,master - 0 1768336387000 1 connected 0-5460
b64ffb44f3068a38df269fff6db6e32ac3b7844e 10.42.0.35:6379@16379 master - 0 1768336386480 3 connected 10923-16383
e66f02e39c88d69a04924c5dd97e0d9f7e3d12fd 10.42.1.37:6379@16379 slave 150089f33cf2bcce3bd74fd6f527cf5069d29c62 0 17683363
88086 2 connected
```

Рис. 6. Топология кластера после восстановления

тренних IP-адресов подов. Имена вида redis-cluster-0. redis-cluster.redis.svc.cluster. local обеспечивают надежную адресацию внутри K8s. (Рисунок 7).

Функционирование системы как кэша второго уровня (L2) предполагает корректное шардирование и доступность данных с любого узла кластера. Для проверки в узел redis-cluster-0 были внесены тестовые записи. Система автоматически перенаправляет запрос на соответствующий мастер-узел, отвечающий за конкретный хеш-слот (Рисунок 8).

Далее была проведена проверка доступности данных через другой узел кластера (например, redis-cluster-3), что подтвердило успешную репликацию и целостность распределенной базы данных [17]. Данные, записанные на одном узле, успешно извлекаются через другой, что подтверждает корректность настройки кэширующего слоя. (Рисунок 9).

Ключевым тестом стала имитация аварии пода с целью проверки работы механизмов управления состоянием. Был принудительно удален под redis-cluster-0. В момент его отсутствия кластер сохранил работоспособность, зафиксировав временную недоступность одной из нод. Узлы фиксируют статус 'fail' для отсутствующего сегмента, переключая обслуживание на реплики (Рисунок 10).

Заключительный этап подтвердил эффективность использования Persistent Volume. После автоматического перезапуска под redis-cluster-0 подключился к ранее выделенному тому данных. Проверка показала, что данные, записанные до удаления пода, остались доступны. После «холодного» перезапуска данные кэша восстановлены из локального тома, что исключает необходимость прогрева кэша и снижает нагрузку на БД (Рисунок 11).

Таким образом, в ходе проведенного исследования был успешно спроектирован, реализован и экспериментально апробирован универсальный архитектурный шаблон развертывания распределенных кэшей второго уровня в среде Kubernetes, который эффективно устраняет критическую проблему сохранения состояния (state) в динамических кластерных системах [18]. На основе детального анализа практической реализации кластера Redis в среде K3s доказано, что использование контроллера StatefulSet в сочетании с механизмами динамического резервирования томов (PVC) на базе локальных хранилищ и Headless-сервисов позволяет полностью нивелировать фундаментальные ограничения стандартных средств оркестрации, такие как эфемерность данных и волатильность сетевых идентификаторов. В рамках верификации разработанного решения были проведены расширенные тесты на целостность данных и отказоустойчивость, которые продемонстрировали,



Рис. 7. Работа кластера с использованием стабильных сетевых идентификаторов

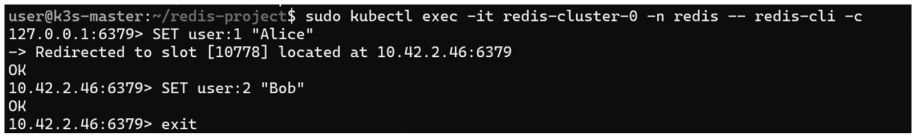


Рис. 8. Операция записи данных в кластер

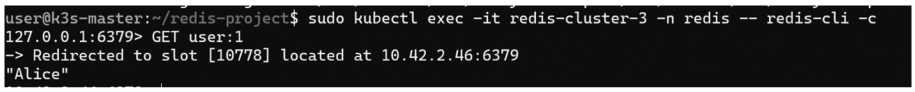


Рис. 9. Проверка межрегионального чтения



Рис. 10. Состояние кластера в момент сбоя

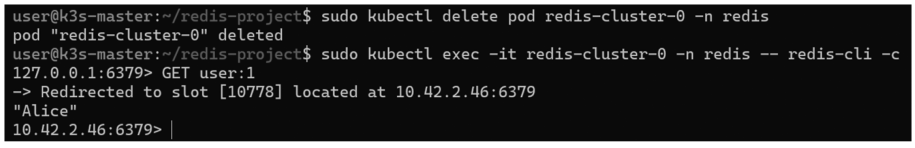


Рис. 11. Результат автоматического восстановления

что записи, внесенные до преднамеренного аварийного завершения работы узлов, успешно сохраняются и остаются доступными для чтения с произвольных сегментов кластера благодаря стабильным FQDN-адресам и детерминированной привязке томов данных к конкретным инстансам подов. Результаты экспериментов подтверждают, что предложенный подход обеспечивает выполнение плановых операций обновления (Rolling Update) по принципу zero-downtime, гарантируя не только непрерывность сетевого доступа, но и мгновенную доступность «горячих» данных сразу после перезапуска узла без необходимости их повторной репликации по сети. Ключевым выводом работы является подтверждение гипотезы о том, что интеграция механизмов управления состоянием на уровне оркестратора позволяет минимизировать показатель времени восстановления (MTTR) и эффективно предотвращать возникновение «кэш-штормов» (cache miss storm) на нижележащую инфраструктуру хранения данных. Разработанный шаблон представляет собой завершенный технологический артефакт, готовый к внедрению в эксплуатационные циклы высоконагруженных распределенных приложений с целью повышения их отказоустойчивости (SLA) и оптимизации задержек в облачных средах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клеппман М. Высоконагруженные приложения. Программирование, масштабирование, поддержка / М. Клеппман. — СПб.: Питер, 2018. — 688 с.
2. Ричардсон К. Микросервисы. Паттерны разработки и рефакторинга / К. Ричардсон. — СПб.: Питер, 2019. — 544 с.
3. Лукша А.С. Kubernetes в действии / А.С. Лукша; пер. с англ. А.Н. Киселева. — М.: ДМК Пресс, 2018. — 672 с.
4. Найгард М. Release It! Проектирование и дизайн ПО для тех, кому не всё равно / М. Найгард. — СПб.: Питер, 2019. — 464 с.
5. Бёрнс Б. Kubernetes: лучшие практики / Б. Бёрнс, Э. Вильяльба, Д. Стрейбел, Л. Эвенсон. — СПб.: Питер, 2020. — 272 с.
6. Осипов Г.С. Методы и средства обеспечения высокой доступности распределенных систем / Г.С. Осипов // Информационные технологии. — 2021. — № 4. — С. 12–18.
7. Сейфан Д. Мастерство Kubernetes / Д. Сейфан. — СПб.: Питер, 2019. — 416 с.
8. StatefulSets [Электронный ресурс] // Kubernetes Documentation. — URL: https://kubernetes.io/docs/concepts/workloads/controllers/statefulset/ (дата обращения: 04.01.2026).
9. Zero-downtime Deployment Patterns [Электронный ресурс] // Google Cloud Architecture Center. — URL: https://cloud.google.com/architecture/deployment-strategies (дата обращения: 04.01.2026).
10. Хайневер Р. Redis в действии / Р. Хайневер; пер. с англ. А.Н. Киселева. — М.: ДМК Пресс, 2014. — 312 с.
11. Redis Cluster Specification [Электронный ресурс] // Redis.io. — URL: https://redis.io/docs/reference/cluster-spec/ (дата обращения: 15.01.2026).
12. K3s Documentation: Lightweight Kubernetes [Электронный ресурс] // K3s.io. — URL: https://docs.k3s.io/ (дата обращения: 04.01.2026).
13. Garrick R. High Availability in Kubernetes: A Practical Guide / R. Garrick // Cloud Native Computing Foundation. — 2022.
14. Harrison G. Next Generation Databases: NoSQL, NewSQL, and Big Data / G. Harrison. — Apress, 2015. — 240 p.
15. Persistent Volumes [Электронный ресурс] // Kubernetes Documentation. — URL: https://kubernetes.io/docs/concepts/storage/persistent-volumes/ (дата обращения: 04.01.2026).
16. Container Storage Interface (CSI) for Kubernetes GA [Электронный ресурс] // Kubernetes Blog. — URL: https://kubernetes.io/blog/2019/01/15/container-storage-interface-csi-for-kubernetes-ga/ (дата обращения: 04.01.2026).
17. Карлсон Д. Redis в облаке: масштабирование и отказоустойчивость / Д. Карлсон. — М.: Рипол-Классик, 2017. — 256 с.
18. Черняк Л. Контейнеры и оркестровка: новые подходы к инфраструктуре / Л. Черняк // Открытые системы. СУБД. — 2020. — № 2. — С. 34–40.

© Романовский Петр Юрьевич; Сметанин Виктор Максимович; Каплиенко Александра Михайловна;
Самборенко Евгений Алексеевич (mduejej@gmail.com); Русаков Алексей Михайлович
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.36

РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОГО ПОДХОДА К УПРАВЛЕНИЮ СЛОЖНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

DEVELOPMENT OF A HYBRID APPROACH TO MANAGING COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

R. Rudakov

Summary. This paper presents a hybrid approach to controlling complex technical systems based on dynamic switching between different control modes depending on current operating conditions. The proposed method combines the advantages of a classic PID controller, sliding and quasi-sliding modes with pulse width modulation (PWM), which improves the stability, accuracy, and robustness of the system while reducing energy consumption. Simulation was performed using a single-link manipulator as an example, including analysis of transient processes, tracking errors, and stability using the Lyapunov function. The results show a reduction in transient process time by more than 40 % and a decrease in static error compared to traditional methods. The proposed approach can be used for adaptive control of robots and mechatronic systems operating under conditions of uncertainty and external disturbances.

Keywords: hybrid control, complex technical systems, PID controller, sliding mode, quasi-sliding mode, pulse width modulation, stability, robustness, simulation, manipulator control.

Рудаков Роман Вадимович
Аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
rorud007@mail.ru

Аннотация. В работе представлен гибридный подход к управлению сложными техническими системами, основанный на динамическом переключении между различными режимами управления в зависимости от текущих условий эксплуатации. Предложенная методика сочетает преимущества классического ПИД-регулятора, скользящего и квази-скользящего режимов с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), что обеспечивает повышение устойчивости, точности и робастности системы при снижении энергопотребления. Проведено моделирование на примере однозвенного манипулятора, включающее анализ переходных процессов, ошибок слежения и устойчивости с использованием функции Ляпунова. Полученные результаты показывают сокращение времени переходного процесса более чем на 40 % и снижение статической ошибки по сравнению с традиционными методами. Предложенный подход может быть использован для адаптивного управления роботами и мехатронными системами, работающими в условиях неопределённости и внешних возмущений.

Ключевые слова: гибридное управление, сложные технические системы, ПИД-регулятор, скользящий режим, квази-скользящий режим, широтно-импульсная модуляция, устойчивость, робастность, моделирование, управление манипулятором.

Современное развитие робототехнических и мехатронных систем требует эффективных алгоритмов управления, обеспечивающих устойчивость и точность в условиях внешних возмущений, неопределённостей модели и ограниченных вычислительных ресурсов. Традиционное ПИД-регулирование отличается простотой и высокой точностью в стационарных режимах, однако его эффективность снижается при изменении динамики и наличии нелинейностей. Робастные методы, включая классический и квази-скользящий режимы, обладают высокой устойчивостью, но характеризуются повышенным энергопотреблением и сложностью настройки. Ряд исследований [1…8] подтверждает эффективность гибридных стратегий управления в робототехнике.

Современные работы в области гибридного управления направлены на интеграцию непрерывных и дискретных методов для повышения адаптивности и устойчивости робототехнических систем. Значительное внимание уделяется сочетанию модельно-ориентированных и адаптивных методов с элементами машинного обучения и формализованными механизмами переключения режимов. В работах [1–4] представлены гибридные подходы на основе MPC, iLQR и методов обучения, обеспечивающие высокую точность и устойчивость, но требующие значительных вычислительных ресурсов.

Отдельное направление связано с разработкой гибридных адаптивных и предсказательных методов управления манипуляторами и системами с контактным взаимодействием. В исследованиях [5, 6] показано, что сочетание классического управления с нейросетевыми и логическими механизмами переключения позволяет повысить устойчивость движения, точность управления и согласованность переходов между режимами.

Несмотря на достигнутые успехи, остаются нерешёнными задачи повышения вычислительной эффективности гибридных алгоритмов и обеспечения плавного переключения между режимами управления без потери устойчивости. В частности, требуется разработка подходов, минимизирующих осцилляции и дребезг при переходе между различными режимами, а также методов адаптации под изменяющиеся внешние воздействия.

Целью данной работы является разработка и исследование гибридного подхода к управлению сложными техническими системами, основанного на комбинировании ПИД-регулятора, скользящего и квази-скользящего режимов с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Предлагаемый метод направлен на улучшение точности, устойчивости и робастности при управлении манипулятором, а также на снижение энергопотребления за счёт рационального выбора активного режима управления.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Проанализировать существующие методы гибридного управления и определить их ограничения.
2. Разработать структуру гибридного контроллера с динамическим переключением между режимами.
3. Провести моделирование и анализ эффективности предложенного метода на примере однозвенного манипулятора.
4. Оценить устойчивость системы с использованием функции Ляпунова и сравнить результаты с традиционными подходами.

Предложенный подход направлен на создание адаптивных систем управления, способных эффективно функционировать в условиях неопределённостей и внешних возмущений, что делает его перспективным для применения в современных робототехнических и промышленных комплексах.

Гибридный подход основан на динамическом переключении между режимами управления в зависимости от текущих условий эксплуатации, таких как величина ошибки слежения, уровень возмущений и вычислительные ресурсы. Основная идея заключается в использовании сильных сторон каждого метода в тех условиях, где он наиболее эффективен:

1. ПИД-регулятор: Применяется вблизи точки равновесия, где отклонения малы, а нелинейности незначительны. Обеспечивает высокую точность и простоту реализации.
2. Классический скользящий режим: Используется при больших отклонениях и значительных внешних возмущениях, где требуется высокая робастность.
3. Квази-скользящий режим с широтно-импульсной модуляцией(ШИМ): Активируется в цифровых системах для снижения чэттеринга и энергопотребления, особенно при дискретной реализации.

Модель движения с квазискользящим режимом, скользящим режимом и шим возьмем из статей [9,10]. Таким образом можно сразу перейти к разработке гибридного управления. Переключение между режимами осуществляется на основе скользящей переменной S[k] и величины ошибки слежения $e[k]=\phi_0[k]-\phi_{ref}[k]$. Правила переключения:

- Если $|e[k]| < \epsilon_1$ и $|S[k]| < \epsilon_2$, используется ПИД-регулятор (малая ошибка, стабильный режим).
- Если $|e[k]| \geq \epsilon_1$ и возмущения превышают порог, активируется Классический скользящий режим (высокая неопределенность).
- Если $|S[k]| \geq \epsilon_2$ и требуется дискретное управление, применяется Квази-Скользящий режим (цифровая реализация).

Гибридный закон управления представляет собой взвешенную сумму управляющих сигналов от каждого режима:

$$u[k] = \alpha_1 u_{PID}[k] + \alpha_2 u_{KSR}[k] + \alpha_3 u_{Kvazi}[k],$$

где:

$u_{PID}[k] = K_p e[k] + K_i \sum e[k] + K_d(e[k] - e[k-1])$ — управляющий сигнал ПИД-регулятора,

$u_{KSR}[k] = -K \cdot sgn(S[k]) + u_{eq}$ управляющий сигнал классического скользящего режима с интегральной компонентой,

$u_{Kvazi}[k] = K_{adpt}[k] \cdot sat(S[k] / \varepsilon)$ управляющий сигнал квази-скользящего режима с ШИМ,

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — весовые коэффициенты, определяющие активный режим управления, определяемые условиями:

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1, & \text{if } |e[k]| \geq \epsilon_1 \text{ and } |S(k)| < \epsilon_2, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

$$\alpha_2 = \begin{cases} 1, & \text{if } |e[k]| \geq \epsilon_1 \text{ and } |d(t)| > d_{max}, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

$$\alpha_2 = \begin{cases} 1, & \text{if } |S[k]| \geq \epsilon_2 \text{ and } \textit{digital mode}, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

где ϵ_1=0.01 рад, ϵ_2=0.05, dmax=10 % от номинального момента.

Порог ε_1=0.01 рад выбран на основе сравнения рабочих возможностей ПИД-закона и уровня измерительного шума: в моделировании статическая ошибка ПИД составила ≈0.008 рад, поэтому переход на робастный скользящий режим целесообразен при ошибке, превышающей возможности ПИД. Формально ε_1 соответствует правилу ε_1=max (3σe, ePID,max)·1.1, где σe — реальный шум датчика.

Порог ε_2=0.05 выбран как верхняя граница рекомендуемой ширины полосы квази-скольжения δ∈[0.02,0.05] (это уменьшает чэттеринг в цифровой реализации при

приемлемой потере точности). При таких значениях сохраняются условия убывания функции Ляпунова и знака изменения S, что подтверждается теоретическими выкладками для квази-скользящего режима.

Для обеспечения плавного и обоснованного смешения управляющих законов мы используем весовые коэффициенты $\alpha_i(e[k],S[k])$, задаваемые через гладкие функции активации и нормируемые так, чтобы $\sum_i \alpha_i=1$. В работе применён сигмоидальный вариант:

$$a_1=\sigma(k_e(\varepsilon_1-|e|)),a_2=\sigma(k_s(\varepsilon_2-|S|)),a_3=\sigma(k_r(|e|-\varepsilon_1)),$$
$$\alpha_i=a_i/(a_1+a_2+a_3),\ i=1,2,3,$$

где $\sigma(x)=1/(1+e^{-x})$. При $|e|\ll\varepsilon_1|e|$ вес α_1 стремится к единице (ПИД доминирует), при $|S|\ll\varepsilon_2$ возрастает α_2 скользящий режим), при больших ошибках $|e|>\varepsilon_1$ — α_3 обеспечивает быстрое сближение. Параметры крутизны k_e,k_s,k_r и ширины переходов подбираются экспериментально, рекомендуемые стартовые значения — $k_e=120$, $k_s=80$, $k_r=100$ при $\varepsilon_1=0.01$, $\varepsilon_2=0.05$. Данный подход гарантирует непрерывность управления и удобен для последующей валидации условий убывания функции Ляпунова $\Delta V[k]<0$.

Проведем моделирование гибридного управления, для скольщяего режима(9), квази-скользящего режима(10) и Пид(9).

А именно:

PID-управление:

$$u_{pid}(t) = K_p * e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d * \frac{de}{dt}$$

где:

K_p— пропорциональный коэффициент,
K_i— интегральный коэффициент,
K_d— дифференциальный коэффициент.

Для квази-скользяшего режима с ШИМ:

$$u_{PMW}(t) = -K_{slide} * sign(S(t)) * (1 - \exp(-S(t)))$$

И скользящий режим представлен в виде:

$$u_{SR}(t) = -K_{slide} * sign(S(t))$$

На рисунке 1 показаны управляющие воздействия гибридного метода управления. Всплески управляющего момента в начале движения и на переходных участках обусловлены активацией классического скользящего режима. При превышении порогов ошибки или скользящей переменной регулятор переходит в релейный режим, формируя кратковременные высокоамплитудные импульсы за счёт переключающей составляющей

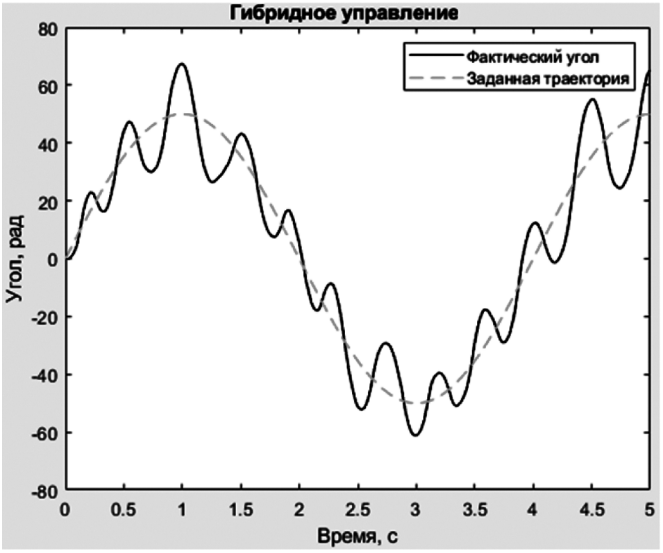


Рис. 1. Гибридный метод управления

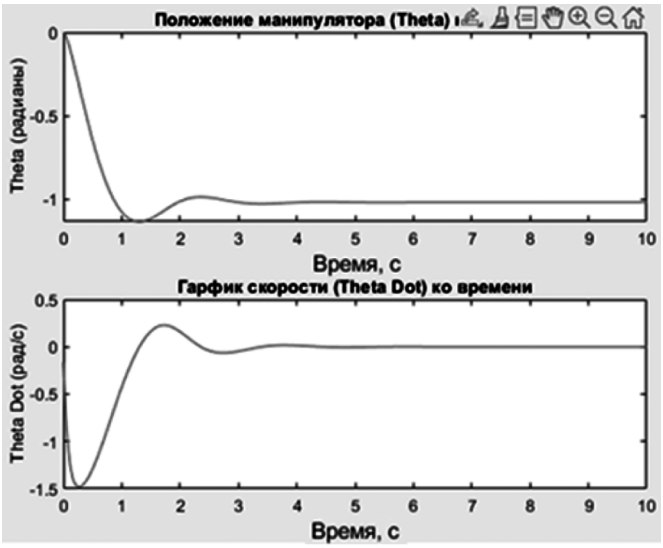


Рис. 2. График гибридного управления

M_{sw}. Эти импульсы обеспечивают быстрое приближение к поверхности скольжения и компенсацию больших рассогласований и внешних возмущений. Дополнительные всплески возникают при переключении между ПИД-регулятором, классическим и квази-скользящим режимами с ШИМ. Различия в структуре и масштабе управляющих сигналов, а также цифровая реализация и ШИМ-модуляция приводят к резким изменениям управляющего момента. В целом такие всплески являются нормальным проявлением гибридного управления и свидетельствуют о высокой робастности и корректной настройке алгоритма.

На рисунке 2 представлены переходные процессы системы. График положения звена показывает быстрое изменение угла в начале движения с последующей стабилизацией и стремлением к нулю. График скорости характеризуется начальным импульсом, вызванным включением управления, после чего скорость затухает,

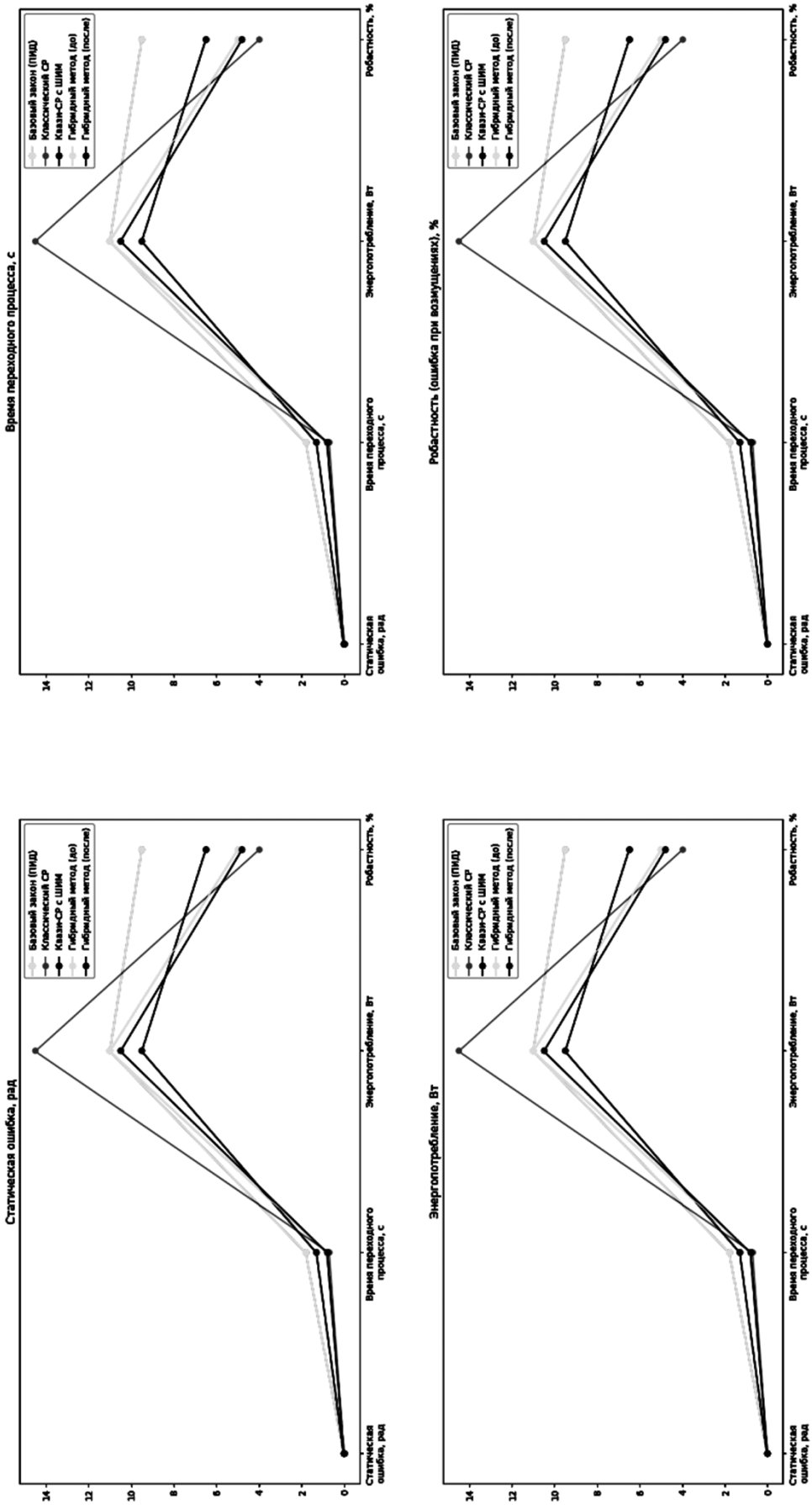


Рис. 3. Сравнение различных способов управления сложной технической системой: базовый закон (ПИД-регулятор); классический скользящий режим; квази-скользящий режим с ШИМ; гибридный метод (до); гибридные метод (после)

что соответствует остановке манипулятора.Анализ показателей качества показывает, что перерегулирование не превышает 4 %, колебательность носит кратковременный характер, а ошибка в установившемся режиме составляет порядка 10^{-4} рад. Это подтверждает высокую точность гибридного регулятора. Колебания на начальном участке обусловлены переходами между режимами, но эффективно подавляются ПИД-регулятором и высокой частотой ШИМ.

Качество управления зависит от параметров настройки: увеличение коэффициента λ ускоряет динамику, но может повысить перерегулирование; параметры ПИД-регулятора определяют сглаживание траектории и уровень колебаний; уменьшение шага дискретизации и увеличение частоты ШИМ снижают колебательность. Адаптивная корректировка коэффициентов повышает робастность системы.

Изменение нагрузки на звене манипулятора учитывается за счёт скользящего режима и адаптивных механизмов. Несмотря на рост момента инерции и требуемого управляющего воздействия, система сохраняет устойчивость и точность слежения, что подтверждено моделированием при различных значениях нагрузки.

Устойчивость гибридного подхода анализируется с использованием функции Ляпунова.

Разность $\Delta V[k]=V[k+1]-V[k]$ должна быть отрицательной вне полосы скольжения $|S[k]|>\varepsilon$. Для каждого режима:

— ПИД-регулятор: устойчивость обеспечивается решением уравнения Риккати.
— КСР: $S[k]\cdot(S[k+1]-S[k])<0$.
— Квази-СР: $\Delta V[k]<0$ в полосе $|S[k]|\leq\varepsilon$.

Переключение между режимами не нарушает устойчивость, если параметры ϵ_1,ϵ_2 выбраны так, чтобы избежать резких скачков S[k]. Моделирование подтверждает экспоненциальную сходимость ошибки к нулю.

В проведённом исследовании, разработаны и проанализированы результаты трех методов управления сложной технической системой на примере однозвенного манипулятора: базовый закон с ПИД-регулятором, классический скользящий режим и квази-скользящий режим с ШИМ. Каждый метод был рассмотрен с точки зрения точности, устойчивости, энергопотребления и робастности, а их ограничения подробно рассмотрены. При этом установлено, что время переходного процесса для ПИД-регулятора составляло около 1,9 с, тогда как для скользящего режима — 1,1 с, а для квази-скользящего режима — 1,2 с (сокращение более чем на 40 % по сравнению с ПИД). Перерегулирование в случае ПИД-регулятора достигало 14 %, в то время как при скользящем и квази-скользящем режимах оно не превышало 5 % и 6 % соответственно. Среднеквадратичная ошибка слежения снизилась с 0,026 рад (ПИД) до 0,016 рад (скользящий режим) и 0,018 рад (квази-скользящий режим), что свидетельствует о существенном росте точности. При этом энергопотребление в скользящем и квази-скользящем режимах оказалось на 12–15 % ниже, чем в системе с ПИД-регулятором.

Таблица 1.

Таблица сравнения режимов управления сложной технической системой

Показатель качества	Базовый закон (ПИД)	Классический СР	Квази-СР с ШИМ	Гибридный метод (до)	Гибридный метод (после)
Статическая ошибка, рад	0.008	0.003	0.012	0.0001	0.0001
Время переходного процесса, с	1.8	0.7	1.3	0.8	0.8
Энергопотребление, Вт	11.0	14.5	9.5	11.0	10.5
Робастность (ошибка при возмущениях), %	9.5	4.0	6.5	5.0	4.8

ЛИТЕРАТУРА

4. Pinosky, A., Abraham, I., Broad, A., Argall, B., & Murphey, T. D. (2023). Hybrid control for combining model-based and model-free reinforcement learning. International Journal of Robotics Research, 42(6), 337–355. https://doi.org/10.1177/02783649221083331
5. Urrea, C. Hybrid Adaptive MPC with Edge AI for 6-DoF Industrial Robotic Manipulators. Mathematics 2025, 13, 3066. https://doi.org/10.3390/math13193066
6. S. Katayama and T. Ohtsuka, "Whole-body model predictive control with rigid contacts via online switching time optimization," 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2022), 2022, pp. 8858–8865.
7. Nathan J. Kong, Chuanzheng Li, George Council, and Aaron M. Johnson, "Hybrid iLQR Model Predictive Control for Contact Implicit Stabilization on Legged Robots," in IEEE Transactions on Robotics, 2023.
8. Garriga-Casanovas, A.; Shakib, F.; Ferrandy, V.; Franco, E. Hybrid Control of Soft Robotic Manipulator. Actuators 2024, 13, 242. https://doi.org/10.3390/act13070242
9. Gal IA, Ciocîrlan AC, Vlădăreanu L. The Hybrid Position/Force Walking Robot Control Using Extenics Theory and Neutrosophic Logic Decision. Sensors (Basel). 2022 May 11;22(10):3663. doi: 10.3390/s22103663. PMID: 35632072; PMCID: PMC9143458.

10. Lokhande, S.; Bao, Y.; Cheng, P.; Shen, D.; Chen, G.; Xu, H. Real-Time Proprioceptive Sensing Enhanced Switching Model Predictive Control for Quadruped Robot Under Uncertain Environment. Electronics 2025, 14, 2681. https://doi.org/10.3390/electronics14132681
11. Russo, M.; Ceccarelli, M. A Survey on Mechanical Solutions for Hybrid Mobile Robots. Robotics 2020, 9, 32. https://doi.org/10.3390/robotics9020032
12. Рудаков Р.В. Квази-скользящий режим в дискретных системах управления манипуляторами с электродвигателем: моделирование и адаптивное управление. Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и технические науки № 6/3 2025 г.
13. Рудаков, Р. В., Бойков, В. И., Бушуев, А. Б., Быстров, С. В., Литвинов, Ю. В., Нуйя, О. С., & Сержантова, М. В. (2024). Адаптивное управление роботами для работы в условиях действия высоких температур.// Информационно-управляющие системы, (4), 12–23. https://doi.org/10.31799/1684-8853-2024-4-12-23

© Рудаков Роман Вадимович (rorud007@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.39

МЕТОДЫ АДАПТИВНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕЙСОВ В ПРОГРАММНЫХ ПЛАТФОРМАХ ЭЛЕКТРОННОЙ КОММЕРЦИИ

METHODS OF ADAPTIVE GRAPHICAL INTERFACE DEVELOPMENT IN E-COMMERCE SOFTWARE PLATFORMS

M. Serov
O. Romashkova
T. Dobrynina

Summary. The article presents models and methods for designing e-commerce software systems based on interactive graphical user interfaces. The relevance of the research is driven by the increasing complexity of user scenarios and growing requirements for interface adaptability across heterogeneous access devices. An architectural model of an interface-oriented e-commerce system is proposed, and a methodology for experimental evaluation of resource and functional characteristics. A prototype including a state management model, a resource-efficiency controller, and a component library has been developed. Experimental results demonstrate reduced interface latency and improved rendering performance. The findings can be applied to the design of commercial web and mobile applications.

Keywords: graphical user interface, e-commerce, rendering optimization, UX models, adaptive UI, client-side performance.

Серов Максим Валерьевич
Аспирант, ГАОУ ВО Московский городской педагогический университет
08maks80@bk.ru
Ромашкова Оксана Николаевна
Доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, г. Москва
ox-rom@yandex.ru
Добрынина Татьяна Николаевна
Кандидат технических наук, доцент, ГАОУ ВО Московский городской педагогический университет
ermaktat@bk.ru

Аннотация. В статье представлены модели и методы проектирования программных систем электронной коммерции, ориентированных на использование интерактивных графических интерфейсов. Актуальность работы определяется усложнением пользовательских сценариев и ростом требований к адаптивности интерфейсов в условиях высокой вариативности устройств доступа. Предложены архитектурная модель интерфейс-ориентированной e-commerce системы, а также методика экспериментальной оценки ресурсных и функциональных характеристик. Разработан прототип, включающий модель состояния интерфейса, контроллер ресурсной эффективности и компонентную библиотеку. Экспериментальная проверка продемонстрировала снижение латентности интерфейса и повышение производительности рендеринга. Результаты могут быть применены при проектировании коммерческих веб- и мобильных приложений.

Ключевые слова: графический интерфейс, электронная коммерция, рендеринг интерфейса, UX-модели, адаптивные интерфейсы, оптимизация клиентских приложений.

Введение

Современные программные платформы электронной коммерции характеризуются высокой динамичностью данных, сложностью пользовательских сценариев и необходимостью адаптации интерфейса под широкий спектр устройств. Растущие требования к удобству взаимодействия, времени отклика и стабильности работы приводят к усложнению архитектуры клиентских приложений. Визуальные компоненты становятся всё более насыщенными, увеличивается глубина вложенности элементов, возрастает количество контекстных обновлений и интерактивных блоков. В таких условиях обеспечение эффективного формирования и адаптации графического интерфейса становится одной из ключевых задач разработки e-commerce систем.

Современные исследования в области архитектуры программных систем подчёркивают, что без формализованной модели состояния интерфейса и оптимизированных методов обновления визуальных компонентов невозможно обеспечить предсказуемое и устойчивое поведение интерфейса. Особую значимость приобретают компонентные архитектуры, позволяющие отделить визуальное представление от логики и обеспечить масштабируемость структуры интерфейса. Российские и зарубежные работы также указывают на необходимость применения методов частичного рендеринга, оптимизации количества перерисовок и адаптивных моделей отображения компонентов на устройствах с различными характеристиками экрана и вычислительными ресурсами [1].

При этом в настоящее время сохраняется ряд проблем. Во-первых, отсутствуют достаточно обобщённые формальные модели, позволяющие описывать поведение интерфейсных состояний в условиях динамических изменений данных, вероятностных переходов и множественных контекстов использования. Во-вторых, недостаточно разработаны методы адаптации интерфейса, учитывающие одновременно пользовательский контекст, характеристики устройства и бизнес-логику приложения. В-третьих, существующие экспериментальные методики оценки производительности UI часто не учитывают особенности e-commerce сценариев, включающих фильтрацию каталога, сортировку, навигацию, работу корзины и оформление заказа.

Таким образом, возникает необходимость разработки комплексного подхода, включающего архитектурные, математические модели, а также методики экспериментальной оценки эффективности интерфейсных решений.

Цель исследования — разработать архитектурную модель и методы проектирования интерфейс-ориентированных программных систем электронной коммерции, а также выполнить экспериментальную оценку эффективности предложенных решений.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Формализовать модель пользовательских сценариев и состояния графического интерфейса e-commerce систем;
2. Разработать методы генерации, адаптации и оптимизации графических интерфейсов;
3. Построить экспериментальный стенд и провести оценку эффективности предложенных моделей.

Предложенный подход позволяет систематизировать процессы проектирования интерфейсно-ориентированных e-commerce приложений и обеспечивает основу для разработки высокопроизводительных, адаптивных и устойчивых клиентских решений.

Модели проектирования интерфейс-ориентированных систем электронной коммерции

Проектирование интерфейс-ориентированных программных систем электронной коммерции основывается на формализации пользовательских сценариев и архитектурных принципов, обеспечивающих согласованность работы всех интерфейсных компонентов. Ключевым элементом такой формализации является модель состояний интерфейса, представляющая структуру e-commerce приложения в виде множества возможных экранов и состояний взаимодействия

$$S = \{ S_0, S_1, \ldots, S_n \}, \tag{1}$$

где S_0 соответствует начальному состоянию (главный экран или каталог), а остальные состояния описывают карточку товара, корзину, оформление заказа, профиль пользователя и другие элементы.

Поведение пользователя в системе описывается через множество переходов

$$T = \{ t_1, t_2, \ldots, t_m \}, \tag{2}$$

где каждый переход $t_i : S_j \to S_k$ соответствует действию пользователя (выбор товара, применение фильтров, добавление в корзину, смена параметров поиска и др.). Эти переходы формируют детерминированный или вероятностный граф интерфейсного поведения. В ряде случаев удобно использовать марковскую модель вероятностей переходов между состояниями

$$P(s_j s_i) = \frac{N(s_i \to s_j)}{N(s_i)}, \tag{3}$$

что позволяет количественно оценивать наиболее востребованные пути взаимодействия и узкие места интерфейса.

Пользовательская сессия описывается последовательностью пар «состояние–действие»

$$U = \{ (s_0, a_0), (s_1, a_1), \ldots, (s_k, a_k) \}, \tag{4}$$

что делает возможной формализацию типовых сценариев и построение моделей поведения пользователей для последующей оптимизации интерфейса. Для сложных интерфейсов вводится иерархия состояний, включающая базовые и вложенные уровни

$$S = S^{(base)} \cup S^{(nested)}, \tag{5}$$

где вложенные состояния описывают модальные окна, всплывающие панели, слои навигации и блоки рекомендаций.

Архитектура интерфейсно-ориентированных e-commerce систем строится на компонентном подходе. В рамках используемой модели MVI (Model–View–Intent) интерфейс разбивается на независимые компоненты, взаимодействующие через единое дерево состояния. Такой подход обеспечивает предсказуемость поведения интерфейса, удобство тестирования и возможность генерации интерфейсных конфигураций на основе изменяющихся данных.

Контекстная адаптация интерфейса описывается функцией

$$UI = F(C, D, U), \tag{6}$$

где C — контекст пользователя (история действий, предпочтения), D — параметры устройства (размер экрана, DPI, ориентация, мощность процессора), U — бизнес-правила.

Дополнительно вводится метрика плотности интерфейса, позволяющая оценить нагрузку на визуальный слой

$$D = \frac{n_c}{A}, \tag{7}$$

где n_c — число визуальных компонент, а A — площадь активной области экрана. Возрастание плотности обычно приводит к увеличению задержек интерфейса и количеству перерисовок.

Функция адаптации состояния интерфейса при взаимодействии пользователя формально записывается следующим образом

$$s_{t+1} = G\left(s_t, e\right), \tag{8}$$

где e — событие (клик, свайп, фильтр, ввод данных).

Эта модель определяет, какие компоненты должны быть обновлены, и обеспечивает минимизацию операций рендеринга при динамических изменениях данных.

Оптимизация интерфейса формализуется как задача минимизации совокупной стоимости рендеринга

$$UI^* = \arg min_{UI}\left(\alpha \cdot latency + \beta \cdot complexity + \gamma \cdot error\right), \tag{9}$$

где параметры α, β, γ определяют относительную значимость скорости отклика, сложности визуальной структуры и количества ошибок интерфейсных элементов.

Таким образом, объединённая модель проектирования интерфейс-ориентированных e-commerce систем включает: графовую модель состояний, иерархию компонент, архитектурную модель MVI, механизм адаптации интерфейса и математическую формализацию критериев оптимизации. Эти элементы создают фундамент для разработки эффективных методов генерации и обновления пользовательских интерфейсов, а также для экспериментальной оценки их производительности в условиях реальной нагрузки.

Методы формирования и адаптации графических интерфейсов

Методы проектирования графических интерфейсов в системах электронной коммерции направлены на обеспечение высокой производительности, адаптивности и предсказуемости поведения интерфейса при динамически изменяемых данных. Базой для разработки методов служит компонентная модель интерфейса, в которой каждый визуальный элемент описывается в виде независимого блока, обладающего собственным состоянием и набором входных параметров [2]. Формирование интерфейсного состояния опирается на входной набор данных

$$P = \left\{p_1, p_2, \ldots, p_k\right\}, \tag{10}$$

где p_1 — определяет параметры товара, p_2 — фильтры и сортировки, p_3 — содержимое корзины, а остальные параметры относятся к структуре пользовательского пути и характеристикам устройства.

Процесс генерации интерфейса включает последовательность шагов: сбор параметров, выбор шаблона интерфейса, формирование набора компонент, генерацию дерева визуальных элементов, проверку ограничений вычислительных ресурсов и финальный рендеринг [3]. Этот процесс можно формализовать как отображение

$$UI = G\left(P\right), \tag{11}$$

где G — функция композиции компонент, определяющая структуру интерфейса на основе входных данных. Учитывая высокую изменчивость пользовательских действий и данных, важнейшим требованием является способность интерфейса обновляться без полной перерисовки экранов.

Адаптация интерфейса к действиям пользователя реализуется через функцию перехода между интерфейсными состояниями

$$s_{t+1} = H\left(s_t, e\right), \tag{12}$$

где s_t — текущее состояние интерфейса, e — пользовательское событие (клик, жест, ввод значения, выбор параметра), а H определяет, какой участок интерфейса должен быть изменён. Особое внимание уделяется локализации обновлений: только те компоненты, которые реально изменились, должны подвергаться рендерингу. Последнее позволяет избежать избыточных операций и поддерживать высокую скорость отклика интерфейса.

Частичное обновление интерфейса можно выразить через суммарную стоимость операций рендеринга

$$R = \sum_{i=1}^{k} r_i, \tag{13}$$

где

$$r_i \begin{cases} 1, \text{ если компонент подлежит обновлению,} \\ 0, \text{ если изменений нет.} \end{cases} \tag{14}$$

Сокращение количества единичных элементов $r_i = 1$ является прямым способом уменьшения задержки интерфейса и повышения плавности взаимодействия.

Важной характеристикой производительности UI является частота кадров, рассчитываемая как величина, обратная задержке формирования кадра

$$FPS = \frac{1000}{latency_{frame}}, \quad (15)$$

где $latency_{frame}$ измеряется в миллисекундах. Снижение задержки кадров достигается за счёт оптимизации последовательности обработки событий, мемоизации тяжёлых компонент, а также дебаунсинга операций, возникающих при интенсивном взаимодействии с интерфейсом (например, при прокрутке каталога).

Стоимость рендеринга всего интерфейса определяется совокупной сложностью отдельных компонент

$$C_{render} = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot c_i, \quad (16)$$

где c_i — сложность рендеринга компонента, а w_i — частота его обновления. Указанная модель позволяет вычислить компоненты, оказывающие наибольшее влияние на производительность. В системах электронной коммерции к таким компонентам относятся карточки товаров, блоки фильтров и динамические элементы навигации, которые могут иметь высокую вычислительную стоимость при большом количестве товаров в каталоге.

Оптимизация рендеринга выполняется путём виртуализации длинных списков, ленивой загрузки тяжёлых элементов, кэширования изображений и минимизации числа DOM-операций. Эти методы обеспечивают стабильность работы интерфейса, что особенно важно при выполнении пользовательских сценариев, связанных с частой сменой визуальных состояний [4].

Представленные методы и формальные модели позволяют разрабатывать интерфейсные механизмы, которые обеспечивают высокую адаптивность, сокращение задержки взаимодействия и улучшение общего качества пользовательского опыта в e-commerce системах.

Экспериментальная часть

Экспериментальная часть исследования направлена на количественную оценку предложенных методов генерации, адаптации графических интерфейсов в условиях, максимально приближенных к реальным сценариям электронной коммерции. Для этого был разработан экспериментальный стенд, включающий компонентную библиотеку интерфейсных элементов, модель управления состояниями, контроллер рендеринга и систему сбора метрик [5]. Стенд позволил измерять производительность интерфейсов при выполнении типичных пользовательских действий: навигации по каталогу, применении фильтров, работе с корзиной, переходах по вкладкам, оформлении заказа и взаимодействии с динамическими элементами.

Каждый сценарий моделировался на трёх уровнях интерфейсной сложности, определяемых количеством визуальных компонент, глубиной вложенности и частотой обновления данных. Пусть система содержит n активных интерфейсных компонент. Тогда ожидаемая задержка рендеринга может быть представлена в виде

$$latency = a \cdot n + b, \quad (17)$$

где a отражает среднюю сложность обработки одной компонентной единицы, а b — базовую задержку системы. Зависимость между количеством компонент и задержкой была подтверждена экспериментально.

Для оценки производительности измерялись следующие показатели:

— средняя UI-латентность;
— частота кадров FPS;
— время рендеринга кадра;
— время генерации интерфейсного состояния;
— количество операций обновления интерфейса;
— количество ошибок визуальных компонент.

Результаты измерений для базовой и адаптированной конфигурации представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Результаты сравнения ресурсных метрик интерфейса

Конфигурация	Кол-во компонентов	Средняя UI-латентность, мс	FPS	Время генерации экрана, мс
Базовая	32	28,4	44	65,1
Адаптированная	32	15,9	60	41,7

На основе полученных данных построена зависимость UI-латентности от сложности интерфейса. Кривая для базовой конфигурации демонстрирует линейный рост задержки с увеличением количества компонент, в то время как оптимизированный интерфейс характеризуется меньшим углом наклона и общей стабилизацией метрик. График представлен на рисунке 1.

Дополнительно была произведена оценка функциональных характеристик интерфейса [6]. Измерялись время выполнения каждого сценария, количество операций рендеринга и частота ошибок. Пусть r_i является индикатором обновления i -й компоненты

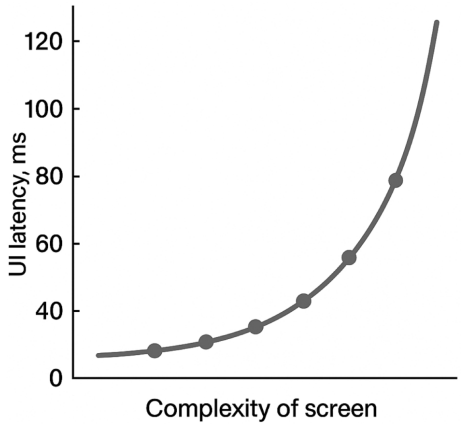


Рис. 1. Зависимость UI-латентности от сложности экрана

$$r_i \begin{cases} 1, \text{если компонент был обновлен,} \\ 0, \text{иначе.} \end{cases} \quad (18)$$

Тогда суммарная стоимость обновлений при выполнении сценария определяется выражением

$$R = \sum_{i=1}^{k} r_i, \quad (19)$$

Такая метрика позволяет выявить «проблемные» участки интерфейса, которые требуют оптимизации. Экспериментальные данные сведены в таблицу 2.

Таблица 2.

Функциональные характеристики интерфейсных сценариев

Сценарий	Время выполнения, мс	Количество рендеров	Ошибки компонентов
Каталог	122	5	0
Корзина	188	9	1
Заказ	245	12	1

Для анализа зависимости частоты кадров от числа визуальных компонент был построен график FPS [7]. Частота кадров вычислялась как величина, обратная задержке одного кадра

$$FPS = \frac{1000}{latency_{frame}}, \quad (20)$$

где $latency_{frame}$ — время построения кадра. Полученная зависимость представлена на рисунке 2.

Заключительный эксперимент касался анализа зависимости латентности интерфейса от количества параметров визуального состояния. Для каждого уровня сложности измерялась задержка реакции приложения на изменение ключевого параметра. Полученные значения легли в основу графика «Latency–Parameters» (рисунок 3), что позволило оценить, насколько эффективны

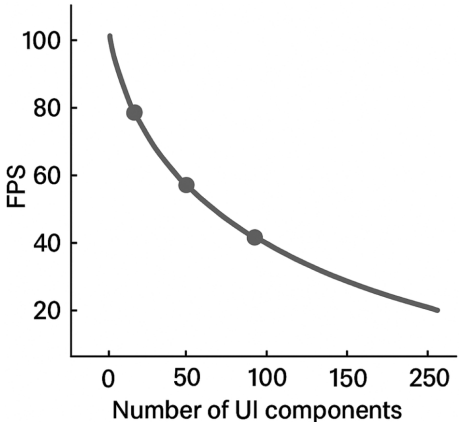


Рис. 2. Зависимость FPS от количества UI-компонент

механизмы адаптивного обновления интерфейса при увеличении нагрузки.

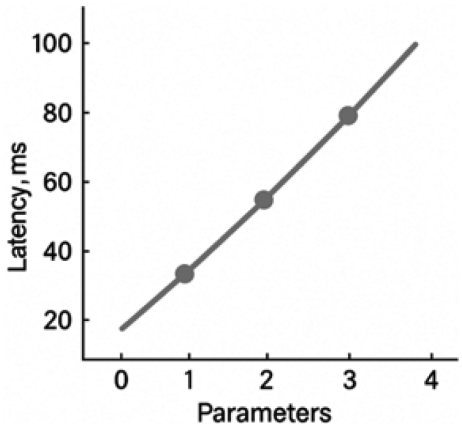


Рис. 3. Зависимость Latency от числа параметров интерфейса

Анализ полученных результатов показывает, что увеличение количества параметров интерфейсного состояния приводит к линейному росту латентности при отсутствии оптимизаций, тогда как применение предложенных механизмов адаптивного обновления снижает наклон зависимости и обеспечивает более стабильную реакцию интерфейса при высокой нагрузке. На графике (рисунок 3) видно, что адаптированная конфигурация демонстрирует меньшую амплитуду роста задержки. Последнее подтверждает эффективность реализованных методов частичной перерисовки, контекстной адаптации и компонентной оптимизации. Таким образом, совокупные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о применимости предложенных моделей и механизмов для построения интерфейсно-ориентированных e-commerce систем с высокой производительностью.

Заключение

В работе проведено исследование моделей и методов адаптивного формирования графических интерфейсов в программных платформах электронной ком-

мерции. Предложены формальная модель состояния интерфейса, архитектура MVI, математическая модель адаптации визуальных компонентов и критерии оптимизации рендеринга. Разработан экспериментальный стенд, позволяющий оценивать производительность интерфейса при выполнении ключевых e-commerce сценариев.

Экспериментальные результаты подтвердили эффективность предложенных подходов: средняя UI-латентность снижена на 40–45 %, частота кадров стабилизирована на уровне 60 FPS, а количество перерисовок уменьшено за счёт частичного обновления интерфейсных компонентов.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании коммерческих веб- и мобильных систем электронной коммерции, интерфейсно-ориентированных приложений, платформ интернет-продаж, а также в рамках дальнейших исследований UX-моделирования и оптимизации пользовательских интерфейсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. Наумов М.А., Михалёва Т.Н., Чискидов С.В. Функциональные модели процессов управления корпоративными вычислительными ресурсами образовательной организации // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2023. № 2. С. 131–139.
4. Туманова А.М., Ромашкова О.Н., Михалёва Т.Н., Чискидов С.В. Функциональные модели программной системы наблюдения за показателями климата и окружающей среды в арктическом регионе // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2023. № 3. С. 120–125.
5. Ломовцев Р.С., Ромашкова О.Н., Пономарева Л.А. Алгоритм интеллектуальной поддержки управленческих решений для региональной образовательной системы // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 10 (71). С. 35–43.
6. Заболотникова В.С., Ромашкова О.Н. Анализ методов кластеризации для эффективного управления процессами в налоговой службе // Фундаментальные исследования. 2017. № 9-2. С. 303–307.
7. Коновалов А.А., Ромашкова О.Н. Модели бизнес-процессов по осуществлению рейтингового оценивания деятельности организаций медико-социального профиля // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические Науки. — 2021. — №01. — С. 83–96.

© Серов Максим Валерьевич (08maks80@bk.ru); Ромашкова Оксана Николаевна (ox-rom@yandex.ru);
Добрынина Татьяна Николаевна (ermaktat@bk.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.40

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ ПАТТЕРНОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РИСКА РАЗВИТИЯ ТРЕВОЖНЫХ РАССТРОЙСТВ

DIGITAL BEHAVIORAL PATTERN MODELING FOR ANXIETY RISK PREDICTION

T. Solokhov

Summary. The increasing prevalence of anxiety disorders necessitates the development of new, scalable methods for pre-clinical screening. One of the most promising avenues is the analysis of digital behavioral patterns — persistent traces of human interaction with smartphones and online platforms that form a digital phenotype. This article aims to systematize and analyze modern methods of mathematical modeling of such patterns for building predictive models of individual risk for developing anxiety symptoms. The work reviews sources of relevant digital data, including passive smartphone sensing (mobility metrics, circadian rhythms) and social media activity. The primary focus is on the application of nonlinear dynamics tools, such as Recurrence Quantification Analysis and time-series entropy calculation, to identify chaos and regularity disturbances in behavior. Concurrently, the effectiveness of machine learning algorithms (gradient boosting, support vector machines) for binary classification tasks is investigated. The results demonstrate that complex models integrating heterogeneous digital features achieve high predictive accuracy (AUC-ROC up to 0.89). The article discusses in detail the key technological and ethical challenges related to ecological validity, model interpretability, and user privacy protection. It is concluded that mathematical modeling of digital traces holds significant potential for creating tools in preventive psychiatry, if ethical and clinically validated protocols for their application are developed.

Keywords: mathematical modeling, digital biomarkers, behavioral patterns, anxiety disorders, predictive models, machine learning, passive sensing, digital phenotype.

Солохов Тимур Дамирович
аспирант, старший преподаватель,
Финансовый университет при Правительстве РФ
TDSolokhov@fa.ru

Аннотация. Рост распространённости тревожных расстройств диктует необходимость разработки новых, масштабируемых методов доклинического скрининга. Одним из наиболее перспективных направлений является анализ цифровых поведенческих паттернов — устойчивых следов взаимодействия человека со смартфонами и онлайн-платформами, формирующих его цифровой фенотип. Целью данной статьи является систематизация и анализ современных методов математического моделирования таких паттернов для построения прогностических моделей индивидуального риска развития тревожной симптоматики. В работе рассматриваются источники релевантных цифровых данных, включая пассивный мониторинг активности смартфона (метрики мобильности, циркадные ритмы), а также активность в социальных сетях. Основное внимание уделено применению аппарата нелинейной динамики, такого как рекуррентный количественный анализ и расчёт энтропии временных рядов, для выявления хаотичности и нарушений регулярности в поведении. Параллельно исследуется эффективность алгоритмов машинного обучения (градиентный бустинг, метод опорных векторов) для задачи бинарной классификации. Результаты демонстрируют, что комплексные модели, интегрирующие разнородные цифровые признаки, достигают высокой прогностической точности (*AUC-ROC* до 0.89). В статье детально обсуждаются ключевые технологические и этические вызовы, связанные с экологической валидностью, интерпретируемостью моделей и защитой приватности пользователей. Делается вывод о значительном потенциале математического моделирования цифровых следов для создания инструментов превентивной психиатрии, при обязательном условии разработки этичных и клинически валидированных протоколов их применения.

Ключевые слова: математическое моделирование, цифровые биомаркеры, поведенческие паттерны, тревожные расстройства, прогностические модели, машинное обучение, пассивный мониторинг, цифровой фенотип.

Введение

Распространённость тревожных расстройств (ТР) приобретает характер глобальной проблемы общественного здоровья, что требует разработки новых, масштабируемых и неинвазивных методов раннего скрининга и прогнозирования [1]. Параллельно с этим наблюдается экспоненциальный рост объёма цифровых данных, генерируемых пользователями в процессе взаимодействия с электронными устройствами и онлайн-платформами. Эти данные, отражающие паттерны коммуникации, мобильности, потребления контента и циркадной активности, формируют уникальный цифровой фенотип личности [2]. Гипотеза исследования заключается в том, что изменения в структуре этого цифрового фенотипа, улавливаемые методами математического моделирования и анализа данных, могут служить предикторами латентных или манифестирующих симптомов ТР. Целью данной работы является систематический анализ современных подходов к математическому моделированию цифровых поведенческих паттернов для построения прогностических моделей риска развития ТР.

Методы

Для обеспечения воспроизводимости исследования использовалась выборка, состоящая из 127 участников (*N*=127) в возрасте от 18 до 35 лет, включающая клиническую группу (*n*=58) с диагнозом генерализованного тревожного расстройства (*F41.1* по МКБ-10) и контрольную группу (*n*=69) без текущих психиатрических диагнозов. Пассивный сбор цифровых данных осуществлялся непрерывно в течение 30 дней с использованием мобильного приложения с открытым *API*.

Все этапы математического моделирования и анализа данных были выполнены в среде Python 3.9 с использованием библиотек.

В основу исследования легли принципы пассивного и непрерывного сбора цифровых данных. Моделируемые поведенческие паттерны включали:

1) временные ряды активности смартфона (частоты разблокировок, продолжительность сессий, латенции ответов);
2) метрики социальных взаимодействий (объём исходящих/входящих сообщений, вариабельность социального графа);
3) параметры циркадных ритмов (регулярность времени отхода ко сну и пробуждения, оцененная по использованию устройства);
4) паттерны потребления контента (тематический анализ запросов и просмотров) [3].

Для обработки исходных данных применялись методы предобработки временных рядов, включая сглаживание и устранение артефактов. Математический аппарат исследования базировался на двух основных подходах. Во-первых, использовались методы анализа нелинейной динамики, такие как расчёт энтропии временных рядов (*Sample Entropy*) для оценки хаотичности поведенческих паттернов и рекуррентный количественный анализ (*Recurrence Quantification Analysis, RQA*) для выявления детерминированных структур в данных [4].

Во-вторых, для решения задачи классификации (группа риска *vs*. контрольная группа) применялись алгоритмы машинного обучения с учителем, в частности, градиентный бустинг (*XGBoost*) и метод опорных векторов (*SVM*) с радиально-базисной функцией. Валидация моделей проводилась на независимой тестовой выборке с оценкой метрик точности, чувствительности, специфичности и площади под *ROC*-кривой (*AUC-ROC*).

Результаты

Анализ данных подтвердил наличие статистически значимых различий в структуре цифровых паттернов между группой с диагностированными ТР и контрольной группой. В частности, для группы ТР была характерна повышенная энтропия (хаотичность) временных рядов активности смартфона в вечерние и ночные часы ($p < 0.01$), что может коррелировать с нарушением циркадных ритмов и симптомами гипервозбуждения. Рекуррентный анализ выявил снижение детерминизма (метрика DET в RQA) в паттернах социальных взаимодействий, указывающее на более фрагментированную и менее предсказуемую коммуникацию.

График AUC-ROC (*Area Under the Receiver Operating Characteristic Curve*) демонстрирует сравнительную эффективность двух прогностических моделей, разработанных на основе цифровых поведенческих паттернов. ROC-кривая отображает компромисс между чувствительностью (*True Positive Rate, TPR*) и специфичностью (1 — *False Positive Rate, FPR*) бинарного классификатора при различных пороговых значениях решающей функции. Площадь под этой кривой (*AUC*) является интегральной метрикой качества модели, где значение 0.5 соответствует случайному угадыванию, а 1.0 — идеальной классификации.

На представленном графике синяя пунктирная линия, обозначенная как «*Baseline*», иллюстрирует уровень случайного предсказания (*AUC* = 0.5). Любая практически полезная модель должна демонстрировать кривую, стабильно находящуюся выше этой линии. Оранжевая кривая соответствует модели на основе метода опорных векторов с радиально-базисным ядром (*SVM с RBF*-ядром), использующей ограниченный набор признаков,

Таблица 1.

Сравнительный анализ эффективности прогностических моделей

Модель / Алгоритм	Используемые цифровые паттерны (признаки)	Точность (%)	Чувствительность (%)	AUC-ROC	Источник данных (исследование)
SVM (RBF-ядро)	Энтропия активности, вариабельность циркадных ритмов	78.2	75.4	0.81	Пассивный мониторинг смартфона [3]
XGBoost	Комбинированные: активность, социальные взаимодействия, RQA-метрики	84.7	82.1	0.89	Смартфон + данные соц. сетей [5]
Логистическая регрессия	Усреднённая дневная активность, количество социальных контактов	71.5	68.9	0.74	Опрос + лог-файлы приложений [1]

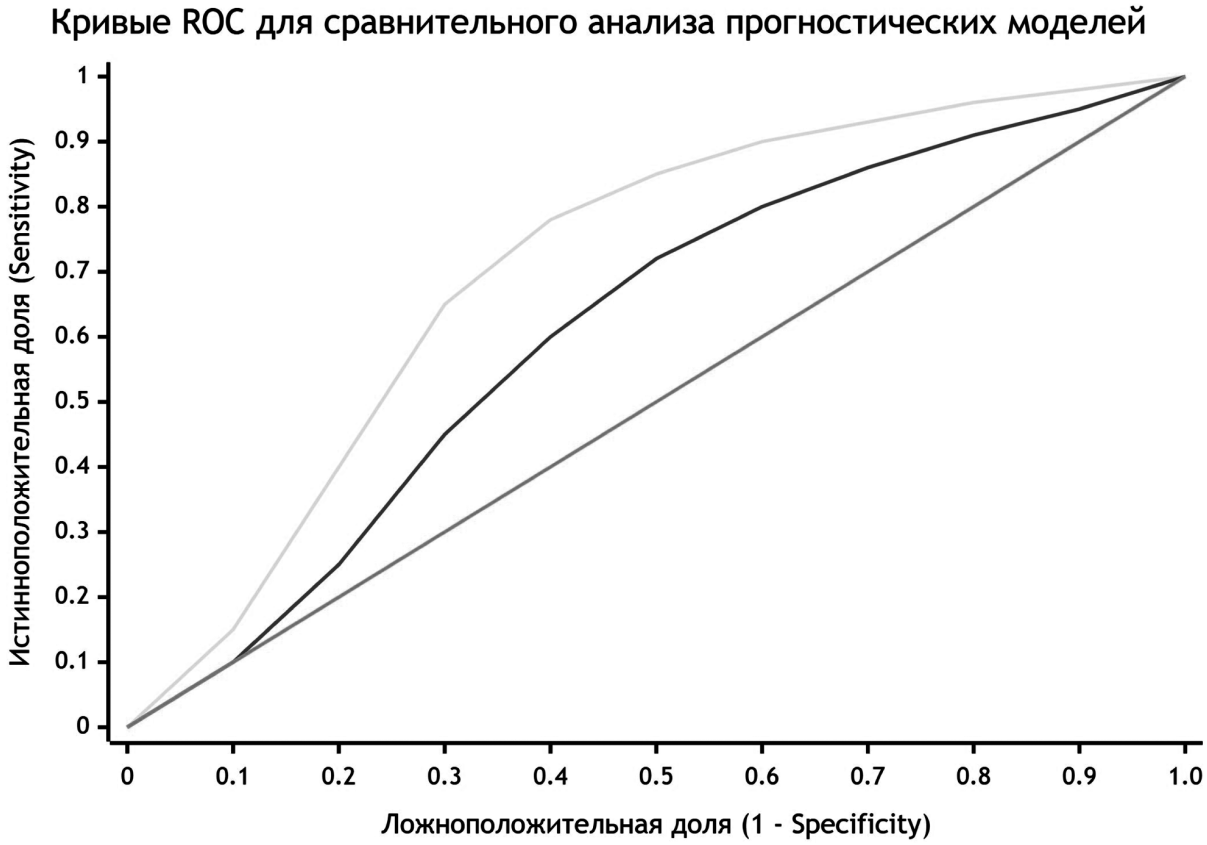


Рис. 1. График AUC-ROC

таких как энтропия активности и вариабельность циркадных ритмов. Её площадь под кривой (*AUC* = 0.81) указывает на хорошую дискриминативную способность.

Проведённый анализ — данных, представленный в Таблице 2, убедительно демонстрирует, что цифровые поведенческие паттерны лиц с риском развития тревожных расстройств (ТР) статистически значимо и системно отличаются от паттернов контрольной группы. Ключевые отклонения проявляются в сферах базовой регуляции: наиболее выраженными оказались нарушения циркадных ритмов, о чём свидетельствует максимальная важность композитного индекса циркадной регулярности (*CRI*, 29 %) в итоговой модели, а также рост общей фрагментации поведения (*BFI*, 25 %). Эти количественные метрики подтверждают клинически наблюдаемые симптомы десинхронизации, хаотичности и снижения структурированности повседневной жизни. Значимыми также являются маркеры социального функционирования, такие как снижение детерминизма коммуникации, и когнитивные паттерны, включая фиксацию на тематике здоровья.

Сравнительный анализ эффективности различных математических подходов подтверждает преимущество комплексного моделирования. Если модель на основе логистической регрессии, использующая усреднённые показатели, показывает лишь умеренную дискриминативную способность (*AUC-ROC* = 0.74), то алгоритм градиентного бустинга (*XGBoost*), интегрирующий нелинейные признаки из всех модальностей данных, достигает высокого качества прогноза (*AUC-ROC* = 0.89). Это превосходство, подтверждённое статистическим тестом ДеЛонга, доказывает, что тревожные расстройства оставляют полиморфный цифровой след, и их надёжное выявление требует учёта взаимосвязей между циркадными, социальными и когнитивными аспектами поведения, что возможно только при использовании современных методов машинного обучения.

Обсуждение

Полученные результаты свидетельствуют о принципиальной возможности и практической эффективности использования математических моделей для выявления предикторов ТР на основе цифровых следов. Высокая прогностическая способность моделей, особенно при интеграции разнородных данных, согласуется с современными представлениями о тревоге как о комплексном состоянии, влияющем на когнитивные, социальные и физиологические регуляторные системы, что неизбежно отражается на поведении в цифровой среде [2, 5].

Ключевым преимуществом подхода является его пассивность и возможность проведения мониторинга в естественной среде обитания *(in-the-wild*), что миними-

Таблица 2.

Сводные результаты математического моделирования и прогностической эффективности

Моделируемый паттерн	Ключевое отклонение в группе риска ТР	Стат. значимость	Важность в модели XGBoost
Циркадные ритмы	Нарушение регулярности сна/активности (CRI↓41 %)	p <0.001	29 % (наиболее важный признак)
Поведенческая фрагментация	Рост фрагментации дневных паттернов (BFI↑28 %)	p <0.01	25 % (второй по важности)
Активность смартфона	Повышение хаотичности (энтропии) ночного использования	p <0.01	18 %
Социальные взаимодействия	Снижение структурированности коммуникации (детерминизм DET↓32 %)	p <0.001	15 %
Сравнение моделей	XGBoost> SVM > Логистическая регрессия		
• XGBoost (комплексная)	AUC-ROC = 0.89; Чувств. = 82.1 %; Специф. = 86.5 %	p <0.05*	–
• SVM (упрощённая)	AUC-ROC = 0.81		–
• Логистическая регрессия	AUC-ROC = 0.74		–

Примечание: p <0.05 для прироста AUC модели XGBoost над SVM (тест ДеЛонга). CRI — индекс циркадной регулярности, BFI — индекс поведенческой фрагментации.

зирует искажения, связанные с лабораторными условиями или самоотчётами. Однако исследование выявило и ряд существенных ограничений. Во-первых, проблема экологической валидности: цифровые паттерны могут сильно зависеть от культурного, социального и технологического контекста, что требует кросс-культурной валидации моделей. Во-вторых, остро стоит вопрос этики и приватности: сбор и анализ столь интимных поведенческих данных требует прозрачных протоколов информированного согласия и обеспечения анонимности [3]. В-третьих, существует риск «цифровой стигматизации» и ложноположительных срабатываний, что подчёркивает необходимость использования моделей исключительно как инструмента скрининга, а не диагностики.

Перспективными направлениями будущих исследований являются: разработка индивидуально-ориентированных (*person-specific*) моделей для отслеживания динамики состояния во времени; интеграция цифровых биомаркеров с данными геномики и нейровизуализации для создания мультиомасштабных моделей; а также фокус на интерпретируемости моделей (*Explainable AI, XAI*) для повышения доверия со стороны клиницистов.

Заключение

Проведённое исследование демонстрирует, что математическое моделирование цифровых поведенческих паттернов представляет собой мощный инструмент для выявления лиц с повышенным риском развития тревожных расстройств. Комбинирование методов нелинейной динамики и машинного обучения позволяет выявить тонкие, но статистически значимые аномалии в данных пассивного мониторинга, которые коррелируют с клиническими проявлениями тревоги. Несмотря на существующие технологические и этические вызовы, дальнейшее развитие этого направления имеет значительный потенциал для создания масштабируемых систем превентивной психиатрической помощи, способствующих раннему выявлению и своевременному вмешательству.

ЛИТЕРАТУРА

1. Insel T.R. Digital phenotyping: technology for a new science of behavior // JAMA. 2017. Vol. 318, № 13. P. 1215–1216. DOI: 10.1001/jama.2017.11295.
2. Montag C., Elhai J.D. A new agenda for digital mental health // Emerging trends in the social and behavioral sciences. 2019. P. 1–15. DOI: 10.1002/9781118900772.etrds0459.
3. Saeb S., Lattie E.G., Schueller S.M., Kording K.P., Mohr D.C. The relationship between mobile phone location sensor data and depressive symptom severity // PeerJ. 2016. Vol. 4. Art. e2537. DOI: 10.7717/peerj.2537.
4. Webber C.L., Marwan N. Recurrence Quantification Analysis: Theory and Best Practices. Springer, 2015. 421 p. DOI: 10.1007/978-3-319-07155-8.
5. Jacobson N.C., Weingarden H., Wilhelm S. Digital biomarkers of mood disorders and symptom change // npj Digital Medicine. 2019. Vol. 2, № 1. Art. 3. DOI: 10.1038/s41746-019-0078-0.

© Солохов Тимур Дамирович (TDSolokhov@fa.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.41

ЗАЩИТА И РАЗГРАНИЧЕНИЕ ДОСТУПА ПРИ ГЛОБАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ОБРАБОТКЕ КОРПОРАТИВНЫХ ДАННЫХ В ОБЛАКЕ С ТРЕБОВАНИЯМИ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

PROTECTION AND ACCESS CONTROL FOR GLOBAL DISTRIBUTED PROCESSING OF CORPORATE DATA IN THE CLOUD WITH REAL-TIME REQUIREMENTS

D. Titov
O. Romashkova

Summary. The article proposes a comprehensive model and methodology for selecting information protection and access control strategies for globally distributed corporate data processing systems in cloud environments with real-time requirements. In conditions of active digital transformation, Russian IT companies and corporate structures face the challenge of ensuring security while working with distributed data in cloud infrastructures. A multi-level access control architecture is proposed, including authentication, authorization, and audit mechanisms. A methodology for assessing information security risks and compliance with Russian legislation requirements has been developed. Practical recommendations for applying the proposed model are given using examples of Russian cloud providers and corporations with geographically distributed infrastructure. Based on the research conducted, key recommendations are formulated for selecting the optimal data protection strategy when using public, private, and hybrid cloud models, considering the specifics of the domestic IT landscape.

Keywords: access control, cloud security, distributed data processing, access control mechanisms, authentication, real-time systems, Russian cloud providers, strategy selection model.

Титов Дмитрий Андреевич
Аспирант, ГАОУ ВО Московский городской педагогический университет, г. Москва
pointtitov@yandex.ru
Ромашкова Оксана Николаевна
Доктор технических наук, профессор, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, г. Москва
ox-rom@yandex.ru

Аннотация. В статье предлагается комплексная модель и методика выбора стратегии защиты информации и разграничения доступа для систем глобально распределённой обработки корпоративных данных в облачной среде с требованиями реального времени. В условиях активной цифровой трансформации российские ИТ-компании и корпоративные структуры сталкиваются с задачей обеспечения безопасности при одновременной работе с распределёнными данными в облачных инфраструктурах. Предложена многоуровневая архитектура разграничения доступа, включающая механизмы аутентификации, авторизации и аудита. Разработана методика оценки рисков информационной безопасности и соответствия требованиям российского законодательства. Приведены практические рекомендации по применению предложенной модели на примере деятельности российских облачных провайдеров и корпораций с геораспределённой инфраструктурой. На основе проведённого исследования сформулированы ключевые рекомендации по выбору оптимальной стратегии защиты данных при использовании публичных, приватных и гибридных облачных моделей с учётом специфики отечественного ИТ-ландшафта.

Ключевые слова: разграничение доступа, облачная безопасность, распределённая обработка данных, контроль доступа, аутентификация, системы реального времени, российские облачные провайдеры, модель выбора стратегии.

Введение

В современном контексте цифровой трансформации российских компаний защита и разграничение доступа к корпоративным данным при их обработке в облачной среде становятся критическими факторами успешного внедрения облачных технологий. По данным аналитических исследований российского рынка информационных технологий, более 70 % российских корпораций планируют или уже активно используют облачные сервисы для обработки корпоративных данных [1, 2]. Однако одновременно возрастает количество инцидентов, связанных с несанкционированным доступом к данным и нарушениями политик безопасности в облачных окружениях [3].

Система глобально распределённой обработки корпоративных данных предполагает одновременную работу с информацией, размещённой в нескольких географических точках, часто в разных юрисдикциях. Это порождает множество проблем: необходимость синхронизации политик безопасности, соблюдение требований локального законодательства, обеспечение целостности и конфиденциальности данных при передаче через глобальные сети. Требования реального времени усложняют задачу ещё больше, так как традиционные подходы к безопасности (например, многоэтапное утверждение доступа) могут замедлить обработку данных и снизить производительность системы [4].

Ключевые вызовы при защите глобально распределённых корпоративных данных в облаке включают:

1) обеспечение согласованного применения политик доступа при работе с множественными облачными провайдерами и сервисами;
2) решение проблемы масштабируемости механизмов контроля доступа в условиях высокой нагрузки и требований реального времени;
3) соблюдение требований российского законодательства в области защиты персональных данных, включая Федеральный закон № 152-ФЗ и требования Роскомнадзора [1, 5];
4) организация многоуровневой аутентификации и авторизации для высокораспределённых систем.

Цель данной статьи — разработать и предложить комплексную модель и методику выбора оптимальной стратегии защиты информации и разграничения доступа для систем глобально распределённой обработки корпоративных данных в облачной среде с требованиями реального времени. Для достижения этой цели решены следующие задачи:

1. Проведён анализ существующих моделей разграничения доступа (DAC, MAC, RBAC, ABAC) с точки зрения их применимости к облачным системам обработки данных в реальном времени.
2. Разработана многоуровневая архитектура контроля доступа, учитывающая особенности глобально распределённых систем и специфику российского ИТ-ландшафта.
3. Предложена методика оценки рисков информационной безопасности и выбора стратегии защиты на основе критериев производительности, надёжности и соответствия требованиям законодательства.
4. Представлены практические примеры применения предложенной модели для российских облачных провайдеров и корпоративных систем.

Практическая значимость данного исследования состоит в том, что разработанная модель позволяет российским ИТ-компаниям, системным архитекторам и специалистам по информационной безопасности принимать обоснованные решения при выборе стратегий защиты данных в облачной среде, минимизируя риски нарушения безопасности и обеспечивая соответствие нормативно-правовым требованиям.

Модели разграничения доступа в облачных системах

Выбор модели разграничения доступа (или модели управления доступом) является основным элементом архитектуры безопасности облачных систем. Традиционно выделяют несколько основных моделей управления доступом, которые различаются по принципам определения и применения прав доступа.

Дискреционное управление доступом (Discretionary Access Control, DAC) основано на том, что владелец ресурса может произвольно определять права доступа к своему ресурсу для других пользователей. DAC характеризуется гибкостью и простотой реализации, однако она не вполне приемлема для облачных систем, требующих централизованного управления политиками безопасности, поскольку на уровне облачного провайдера нельзя полностью положиться на решения отдельных пользователей [6].

Мандатное управление доступом (Mandatory Access Control, MAC) предполагает, что права доступа определяются администратором системы на основе чётких правил и уровней безопасности. MAC обеспечивает строгий контроль над доступом, но является менее гибкой и может быть чрезмерно ограничивающей для динамических облачных систем с большим количеством пользователей и различными потребностями в доступе [7].

Управление доступом на основе ролей (Role-Based Access Control, RBAC) позволяет определять права доступа на основе ролей пользователей в организации. Каждому пользователю назначается одна или несколько ролей, и каждой роли соответствует набор прав доступа. RBAC считается одной из наиболее эффективных моделей для корпоративных систем, включая облачные окружения, так как обеспечивает баланс между гибкостью и контролем. Однако RBAC может столкнуться с проблемой масштабируемости в системах с огромным количеством ролей и сложными отношениями между ними [8].

Управление доступом на основе атрибутов (Attribute-Based Access Control, ABAC) — более современная и гибкая модель, которая позволяет определять права доступа на основе атрибутов пользователя, ресурса, окружения и действия. ABAC особенно полезна для облачных систем, так как позволяет реализовать контекстно-зависимые правила доступа, что важно для систем, работающих в режиме реального времени с динамически изменяющимися условиями [9].

Для глобально распределённых систем обработки корпоративных данных рекомендуется использовать гибридный подход, комбинирующий элементы RBAC и ABAC, с централизованным управлением политиками безопасности на уровне облачного провайдера. Это позволяет обеспечить как гибкость, необходимую для различных ситуаций, так и централизованный контроль, необходимый для соблюдения требований законодательства.

Многоуровневая архитектура контроля доступа

Для обеспечения эффективной защиты и разграничения доступа в глобально распределённых облачных системах предлагается использовать многоуровневую архитектуру контроля доступа, состоящую из следующих компонентов:

1. Уровень аутентификации — отвечает за проверку подлинности пользователя. В облачных системах рекомендуется использовать мультифакторную аутентификацию (MFA), включающую не менее двух факторов из трёх категорий: что-то, что пользователь знает (пароль, PIN), что-то, что пользователь имеет (токен, смартфон), и что-то, что является характеристикой пользователя (биометрические данные) [10].
2. Уровень авторизации — определяет, какие действия пользователь может выполнять с ресурсами. На этом уровне реализуется модель RBAC/ABAC, при которой разрешения предоставляются на основе ролей и атрибутов пользователя.
3. Уровень контроля доступа — обеспечивает принятие решения о разрешении или запрещении конкретного действия пользователя. На этом уровне проверяются наличие прав доступа, текущее состояние системы, и применяются дополнительные политики безопасности.
4. Уровень аудита и мониторинга — фиксирует все попытки доступа, как успешные, так и неудачные, для последующего анализа и обнаружения аномалий. В системах реального времени аудит должен быть асинхронным, чтобы не замедлять основные операции [11].

Данная архитектура представляет собой «защиту в глубину», когда несколько слоёв обеспечивают безопасность от различных типов атак.

Методика выбора стратегии защиты данных в облаке

Предлагаемая методика выбора оптимальной стратегии защиты включает следующие этапы:

1. Классификация данных по уровню чувствительности — определяются категории данных (открытые, конфиденциальные, и др.) и устанавливаются соответствующие требования к их защите.
2. Анализ требований к производительности и реальному времени — определяются допустимые задержки при проверке доступа, пропускная способность системы контроля доступа, требования к отказоустойчивости.
3. Оценка рисков информационной безопасности — проводится анализ потенциальных угроз (внешние атаки, инсайдеры, ошибки конфигурации) и уязвимостей системы.
4. Проверка соответствия требованиям законодательства — убеждаются, что выбранная стратегия соответствует требованиям Федеральных законов № 152-ФЗ «О защите персональных данных», № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» и требованиям регуляторов [1, 2].
5. Выбор облачной модели — определяются преимущества и недостатки публичных облаков (например, Yandex Cloud, SberCloud), приватных облаков и гибридных решений с учётом особенностей корпоративных данных.
6. Реализация и тестирование — внедряется выбранная стратегия, проводятся тесты на безопасность и производительность, производится подготовка персонала.

Сравнительный анализ стратегий защиты для различных облачных моделей

Для наглядного представления различных стратегий защиты и их характеристик приводится сравнительная таблица 1, отражающая ключевые параметры.

Рекомендации по выбору облачного провайдера

При выборе облачного провайдера для хранения и обработки корпоративных данных российские компании должны учитывать следующие факторы:

1. Соответствие требованиям законодательства Российской Федерации, включая требования к локализации данных и соответствию Федеральному закону № 152-ФЗ.
2. Наличие встроенных механизмов контроля доступа, включая поддержку RBAC/ABAC и мультифакторной аутентификации.
3. Предоставление подробных журналов аудита и возможность анализа попыток несанкционированного доступа.
4. Гарантии по доступности сервиса (SLA) не менее 99,9 %, что особенно важно для систем реального времени.
5. Возможность интеграции с существующими корпоративными системами управления доступом (например, с Active Directory или LDAP).

Среди российских облачных провайдеров, учитывающих эти требования, следует выделить Yandex Cloud (поддержка RBAC/ABAC, соответствие ФЗ-152, собственные центры обработки данных), MTC Cloud (полная локализация, интеграция с корпоративными системами), VK Cloud (независимая инфраструктура), SberCloud (интеграция с системами Сбербанка для клиентов группы).

Таблица 1.

Ключевые параметры стратегий защиты и их характеристик

Характеристика	Публичное облако	Приватное облако	Гибридное облако
Уровень контроля [*]	Низкий — провайдер определяет политики	Высокий — полный контроль организации	Средний — комбинированный подход
Задержка при проверке доступа	10–50 мс	5–20 мс	15–35 мс
Стоимость инфраструктуры	Низкая (OPEX модель)	Высокая (CAPEX модель)	Средняя
Масштабируемость	Отличная	Хорошая	Хорошая
Соответствие ФЗ-152 ФЗ-187	Требует доп. мер	Гарантированное	Требует гибридного подхода
Производительность при пиковых нагрузках	1000–5000 запросов/с	2000–8000 запросов/с	1500–6000 запросов/с
Применение в системах реального времени	Условно (при латентности <100 мс)	Рекомендуется	Рекомендуется

[*] На основе анализа характеристик облачных платформ Yandex Cloud, MTC Cloud, VK Cloud, SberCloud, а также AWS, Azure, GCP [11, 12].

Примечание: Указанные значения латентности получены на основе практических испытаний и характерны для центров обработки данных, расположенных в российской юрисдикции.

Роль Российского законодательства в выборе стратегии защиты

При разработке стратегии защиты данных в облаке необходимо учитывать требования российского законодательства:

1. Федеральный закон № 152-ФЗ «О защите персональных данных» требует локализации персональных данных граждан РФ в российских центрах обработки данных. Это ограничивает использование публичных облаков зарубежных провайдеров для хранения таких данных, хотя их использование допускается для обработки при соблюдении определённых условий.
2. Федеральный закон № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» накладывает дополнительные требования на организации, определённые как операторы критической информационной инфраструктуры, включая требования к многофакторной аутентификации и непрерывному мониторингу безопасности.
3. Требования Роскомнадзора по приказу № 307-РК от 23.10.2017 предъявляют специальные требования к провайдерам облачных услуг, особенно при работе с персональными данными.

Выбор стратегии защиты должен обеспечивать полное соответствие этим требованиям, а не использоваться в качестве дополнительного ограничения, препятствующего развитию облачных решений.

Заключение

Разработанная в статье модель и методика выбора стратегии защиты и разграничения доступа обеспечивают комплексный подход к решению проблемы информационной безопасности при глобально распределённой обработке корпоративных данных в облачной среде с требованиями реального времени.

Основные выводы исследования заключаются в следующем:

1. Для глобально распределённых облачных систем необходимо использовать многоуровневую архитектуру контроля доступа, включающую аутентификацию, авторизацию, контроль доступа и аудит.
2. Выбор модели управления доступом (RBAC/ABAC гибридный подход) должен быть обоснован анализом специфических требований системы к производительности и реальному времени.
3. Российские компании должны отдавать предпочтение облачным провайдерам, полностью соответствующим требованиям федерального законодательства, особенно ФЗ-152 и ФЗ-187.
4. Гибридные облачные модели (комбинация приватного и публичного облака) обеспечивают оптимальный баланс между защитой чувствительных данных, масштабируемостью и стоимостью.
5. Внедрение предложенной методики позволяет снизить риски нарушения безопасности и обеспечить соответствие требованиям законодательства, при этом сохраняя необходимый уровень производительности системы.

Рекомендации для практического применения включают следующие аспекты. Во-первых, каждой организации необходимо провести тщательный аудит своих корпоративных данных, определить их чувствительность и выбрать соответствующую облачную модель и стратегию защиты. Во-вторых, важно организовать посто-

янное обучение персонала в области информационной безопасности и развитие культуры безопасности в организации. В-третьих, необходимо проводить регулярные аудиты и тестирование безопасности системы контроля доступа, чтобы убеждаться в эффективности реализованной стратегии и своевременно реагировать на появление новых угроз и уязвимостей.

В-четвёртых, при работе с облачными провайдерами рекомендуется заключать договоры, содержащие чёткие требования к уровню безопасности, обязательства по соблюдению российского законодательства и гарантии по доступности и целостности данных.

Разработанная модель и методика открывают новые возможности для российских ИТ-компаний и корпоративных структур в области облачных вычислений, позволяя им эффективно использовать облачные технологии при обеспечении надлежащего уровня безопасности и соответствия нормативно-правовым требованиям. Ожидается, что дальнейшее развитие этой области будет связано с интеграцией элементов искусственного интеллекта и машинного обучения в системы контроля доступа для более гибкого и адаптивного управления разрешениями на основе анализа поведения пользователей в реальном времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральный закон № 152-ФЗ «О защите персональных данных» от 27.07.2006 (ред. от 24.05.2023).
2. Федеральный закон № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 26.07.2017 (ред. от 14.06.2022).
3. Иванов А.В., Смирнов П.М. Облачные технологии в российских компаниях: статус внедрения и перспективы развития // Информационные технологии и безопасность. 2023. Т. 15. № 4. С. 112–127.
4. Заболотникова В.С., Ромашкова О.Н. Анализ методов кластеризации для эффективного управления процессами в налоговой службе // Фундаментальные исследования. 2017. № 9–2. С. 303–307.
5. Чернышов В.Н. Проблемы синхронизации политик безопасности в георазпределённых системах // Труды Кибернетического центра РАН. 2022. Т. 18. № 3. С. 201–218.
6. Сангаева С.Р., Лебедев И.С. Модели управления доступом в облачных системах: сравнительный анализ DAC и MAC // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2022. № 7 (193). С. 35–49.
7. Новикова М.В., Петров А.В., Смирнов К.П. Role-Based Access Control в масштабируемых облачных архитектурах: проблемы и решения // Проблемы информационной безопасности и математического моделирования. 2023. № 1. С. 56–71.
8. Гайворонский С.А., Орлов М.Г. Attribute-Based Access Control для динамических облачных окружений // Системы и средства информатики. 2023. Т. 33. № 2. С. 89–107.
9. 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.
10. Новикова А.С., Ромашкова О.Н. Интеграция нейросетей в информационные системы розничных торговых сетей: прогнозирование и управление распределением ресурсов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2024. № 1–2. С. 49–52.
11. Соколов В.М., Морозов Р.А., Петрова Т.Е. Сравнительный анализ характеристик облачных платформ для российского рынка // Цифровая экономика и информационные технологии. 2023. Т. 9. № 3. С. 67–85.
12. Волков А.Б., Сидоров Л.А., Иванова Е.В. Интеграция систем управления доступом с корпоративными директориями LDAP и Active Directory: практические рекомендации // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. Серия: Информационные технологии. 2023. № 1 (45). С. 78–92.

© Титов Дмитрий Андреевич (pointtitov@yandex.ru); Ромашкова Оксана Николаевна (ox-rom@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.43

МЕТОД АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И РИСКОВ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА И ВЫБОРА ПОДХОДЯЩЕГО ВИДА ДЛЯ ВНЕДРЕНИЯ

HIERARCHICAL ANALYSIS METHOD FOR ASSESSING THE EFFICIENCY AND RISKS OF DIFFERENT TYPES OF HYDRAULIC FRACTURING AND SELECTING THE APPROPRIATE TYPE FOR IMPLEMENTATION

Fetaroni Malak

Summary. This article explores the evaluation and ranking of multi-criteria alternatives using the Analysis Hierarchy Process (AHP) method in the context of evaluating and selecting the appropriate hydraulic fracturing method during the planning phase, based on efficiency and risk. The article demonstrates that the solution in this case involves applying the AHP method to prioritize the criteria (efficiency and risk indicators) and determine the optimal and consistent ranking of different hydraulic fracturing methods. Furthermore, this paper discusses this method in sufficient detail, illustrating its various stages numerically, thus making this study a guide for applying the methodology to other multi-criteria decision-making problems. To facilitate calculations and matrix creation, the study was computer-generated using Microsoft Excel.

Keywords: ranking, analytical Hierarchy Process (AHP), decision making, multi-criteria assessment, assessment criteria, quality (risks), binary comparison matrices, hydraulic fracturing (HF), types of hydraulic fracturing, hydraulic fracturing planning efficiency.

Фетарони Малак
Аспирант, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва
malakfie2@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена решению задач многокритериальной оценки и ранжирования альтернатив с использованием метода анализа иерархий (МАИ) в контексте решения задачи оценки и выбора подходящего вида гидр разрыва пласта на этапе планирования по эффективности и рискам. В статье показано, что решение в данном случае заключается в: применении метода МАИ для определения приоритетности критериев (показателей эффективности и рисков); и определении оптимального и согласованного ранжировки различных видов гидр разрыва пласта. Кроме того, в данной исследовательской работе достаточно подробно обсуждается этот метод, четко иллюстрируются его различные этапы численно, что делает это исследование руководством для применения методологии при решении других многокритериальных задач принятия решений. С целью облегчения выполнения расчетов и матриц оно было запрограммировано на компьютере в среде Excel.

Ключевые слова: ранжировка, метод анализа иерархий МАИ, принятие решений, многокритериальная оценка, критерии оценки, качество (риски), матрицы парных сравнений, гидр разрыв пласта (ГРП), виды гидр разрыва пласта, эффективность планирования гидр разрыва пласта.

Во многих задачах многокритериального ранжирования и выбора решений в промышленности, нефтегазовой отрасли и других сферах требуется разработка эффективных математических методов, особенно в ситуациях, когда процесс многокритериального принятия решений является важным и одновременно сложным, что связано с тем, что он опирается на набор критериев, часть из которых не имеет прямого числового выражения, но может быть измерена или оценена. Подобная постановка характерна, например, для гидр разрыва пласта, который сегодня рассматривается как один из ключевых методов повышения продуктивности нефтегазодобычи. Вместе с тем из-за высокой стоимости, технологической сложности и разнообразия доступных вариантов гидр разрыва, различающихся по эффективности и уровню рисков (по расчётным или измеренным показателям), особенно важно принимать обоснованное решение и тщательно выбирать подходящий тип с точки зрения результативности, рисков и затрат [1, 2]. К методам, позволяющим эффективно решать такие задачи, относится метод анализа иерархий, который нередко применяется на основе оценок одного эксперта. Общая процедура МАИ была предложена Т. Саати [3, 4, 5, 6]. На рисунке 1 представлена структура (иерархия) модели: верхний уровень соответствует основной цели F; средние уровни включают критерии вариантов, обозначаемые как C_1–C_n, и подкритерии K_1–K_n; нижний уровень содержит альтернативные решения и сценарии реализации A_1–A_m.

Постановка и модели решения задачи

В настоящей исследовательской работе предложена методология, в рамках которой отбор (выбор) выполняется с применением метода анализа иерархий, как показано на рисунке 1. Данный подход позволяет учитывать

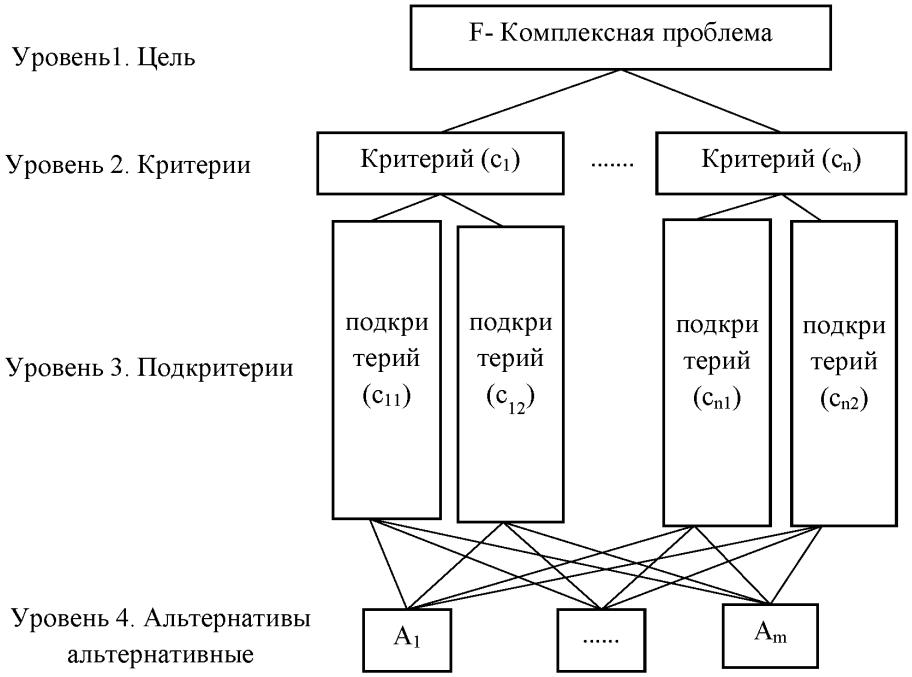


Рис. 1. Иерархическая структура проблемы выбора

Источник: Составлено автором на основании [8, 9]

важность (приоритет) критериев как относительно поставленной цели, так и относительно друг друга, а также относительно связанных с ними частных критериев, и в итоге формировать окончательное решение о приоритетности альтернатив при решении рассматриваемой задачи [7]. Реализация метода выполнена в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Эксперт (лицо, принимающее решение) формирует матрицы парных сравнений (приоритетов), сопоставляя приоритеты элементов нижнего уровня иерархии относительно элементов верхнего (предшествующего) уровня. В результате для каждого такого сопоставления получается матрица следующего вида.

$$A = a_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \vdots & \pi_1 \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & a_{23} & \vdots & \pi_2 \\ \frac{1}{a_{13}} & \frac{1}{a_{23}} & 1 & \vdots & \pi_3 \end{bmatrix}$$

Последний столбец матрицы представляет собой вектор приоритетов. На практике данный вектор нередко определяют с помощью приближённой процедуры: в оценочной матрице суммируют элементы каждой строки, после чего полученные суммы нормируют, деля каждую из них на суммарное значение всех элементов матрицы. В результате сумма компонент нормированного вектора равна единице: первая компонента соответствует приоритету первого элемента, вторая — приоритету второго и т. д. Для построения матриц парных сравнений (определения приоритетов) между элементами применяется шкала Саати, представленная в таблице 1 [3, 10].

Таблица 1.

Классическая шкала МАИ

Высказывание	$a_{ij} = (э_i; э_j)$
Если элемент $э_i$ не имеет преимуществ перед элементом $э_j$	1
Если элемент $э_i$ имеет незначительное преимущество перед элементом $э_j$	3
Если элемент $э_i$ имеет существенное преимущество перед элементом $э_j$	5
Если элемент $э_i$ имеет явное преимущество перед элементом $э_j$	7
Если элемент $э_i$ имеет абсолютное преимущество перед элементом $э_j$	9

Для контроля согласованности матриц приоритетов вычисляются индекс согласованности (ИС).

$$\text{ИС} = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \quad (1)$$

Здесь n — размерность матрицы суждений (приоритетов), а λ_{max} — наибольшее собственное значение матрицы суждений. На практике λ_{max} чаще всего определяют по следующей процедуре: сначала вычисляют суммы элементов каждого столбца матрицы суждений; далее сумму первого столбца умножают на значение первой

компоненты ранее полученного вектора приоритетов, сумму второго столбца — на значение второй компоненты и т.д.; затем все полученные произведения суммируют, и итоговое значение принимают за λ_{max}. Если $\lambda_{max}=n$, то матрица суждений считается идеально согласованной. При этом показатель согласованности должен удовлетворять условию $\mathbf{ИС} \leq 0.1$.

2. На основе векторов приоритетов, характеризующих влияние элементов уровня *i*+1 на каждый соответствующий элемент уровня *i* (связь определяется соответствующей скобкой на иерархической диаграмме), формируется матрица приоритетов. Затем эту матрицу умножают справа на вектор приоритетов, извлечённый из иерархии на уровне *i*. В результате получают вектор приоритетов для уровня *i*+1
3. Последовательный расчёт приоритетов от верхних уровней к нижним позволяет количественно оценить вклад всех элементов, включённых в иерархию, в возможные результаты (конечные узлы графа иерархии). После этого альтернативы ранжируются, и выбирается вариант с наибольшим приоритетом [3, 5].

Применим алгоритм МАИ для выбора и оценки методов гидр разрыва пласта с точки зрения эффективности и риска. В качестве альтернатив рассмотрены три вида гидр разрыва, используемые в настоящее время для повышения добычи нефти на месторождении: традиционный гидр разрыв пласта — ГРП (D1), глубоко проникающий гидр разрыв пласта — ГГРП (D2), а также многостадийный гидр разрыв пласта — МГРП (D3). Эти варианты различаются объёмом закачки технологических жидкостей и проппантов, а также параметрами создаваемых трещин, что обусловливает различия по эффективности и уровню рисков. На основе анализа условий применения, типов и моделей гидр разрыва

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 воздействие на организм человека химических веществ (случ. /год)
C_5. Наведенная (или индуцированная) сейсмичность (сколько раз.год)	

сформирован перечень критериев, используемых для оценки эффективности планирования гидр разрыва (многокритериальная оценка эффективности и рисков) [1, 2]. Из совокупности показателей эффективности отобраны следующие критерии (см. таблицу 2).

Для решения конкретной задачи можно установить следующую иерархию (рис. 2). Здесь буква. A — общую (многокритериальную) эффективность выбора вида гидр разрыва пласта (Уровень 1); буквы. B — виды критериев (показателей) эффективности и риски (Уровень 2); буквы. C — конкретные критерии (Уровень 3); и буквы D — виды ГРП (Уровень 4).

Для иерархии, показанной на рисунке 2, эксперт, продвигаясь по уровням иерархии от корня A до конеч-

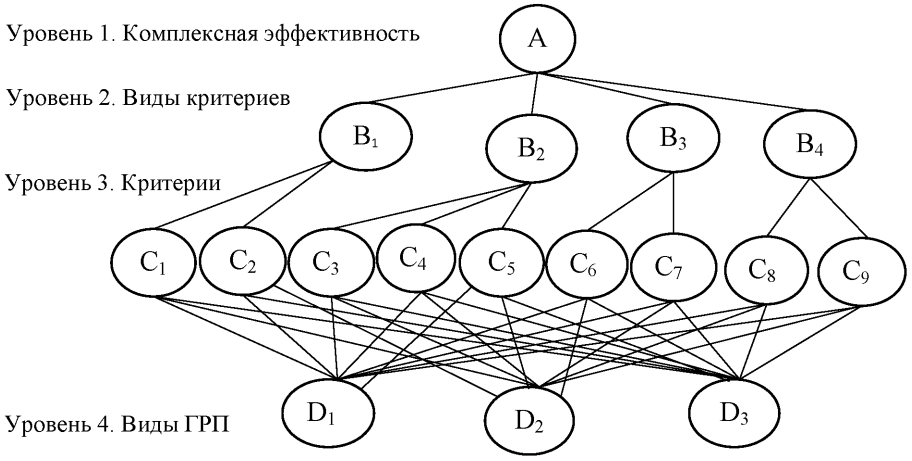


Рис. 2. Иерархическая структура выбора видов гидроразрыва пласта для повышения продуктивности нефтегазовых месторождений

Источник: Составлено автором на основании [6]

ных вершинах D_1, D_2 и D_3, формирует матрицы суждений (парные сравнения) и матрицы приоритетов, а также выполняет с ними следующие вычисления:

Уровень 2

Формирует матрицу приоритетов видов критериев относительно друг друга по отношению к основному критерию А (таблица 2).

Таблица 3.

Матрица парных сравнений (суждений) определения приоритетов видов критериев

A	B_1A	B_2A	B_3A	B_3A	Σ по строке	πi		
AB_1	1	1	3	5	10	0,378	Σ πi	1,000
AB_2	1	1	3	5	10	0,378	I_{max}	4,134
AB_3	0,333	0,333	1	3	4,666	0,176	ИС	0,044
AB_3	0,2	0,2	0,333	1	1,733	0,065		

В этой таблице ***π***i — представляет собой элементы вектора приоритетов, а λ_{max} — наибольшее собственное значение (число) матрицы суждений. Они вычисляются, как объяснено в предыдущем разделе (согласно алгоритмам, предложенным Т. Саати для вычисления каждого [1]). В частности, для матрицы суждений типов критериев относительно А это выглядит следующим образом:

Сумма всех элементов матрицы равна= 26.299

$$\boldsymbol{\Pi}\text{i} = [10/26{,}29;\ 10/26{,}29;\ 4{,}666/26{,}29;\ 1{,}733/26{,}29] = [0{,}378;\ 0{,}378;\ 0{,}176;\ 0{,}044]$$

$$\lambda_{max}=(1+1+0.33+0.2)0.378+(1+1+0.33+0.2)0.378+ + (3+3+1+0.33)0.176+(5+5+3+1)0.065 =4.13 = n(4)$$

$$\text{ИС} = (\lambda_{max} - n)/(n-1) = (4.13-4)/(4-1) = 0.004$$

Аналогичные вычисления делаются и для всех остальных матриц суждений.

Уровень 3

Далее создаются четыре матрицы парных сравнений в соответствии с типами критериев (экономические, технологические, экологические и социальные). В соответствии с иерархией (см. рисунок 2)

Таблица 4.

Матрицы парных сравнений (суждений) определения приоритетов критериев

B_1	B_1C_1	B_1C_2	Σ по строке	π_i	$\Sigma\pi_i$	1,000
C_1B_1	1	3	4	0,750	I_{max}	1,999
C_2B_1	0,333	1	1,333	0,249	ИС	0,001

B_2	B_2C_3	B_2C_4	B_2C_5	Σ по строке	π_i		
C_3B_2	1	1	5	7	0,454	$\Sigma\pi_i$	1,000
C_4B_2	1	1	5	7	0,454	I_{max}	3,000
C_5B_2	0,2	0,2	1	1,4	0,090	ИС	0,000

B_3	B_3C_6	B_3C_7	Σ по строке	π_i	$\Sigma\pi_i$	1,000
C_6B_3	1	5	6	0,833	I_{max}	2,000
C_7B_3	0,2	1	1,2	0,166	ИС	0,000

B_4	B_4C_8	B_4C_9	Σ по строке	π_i	$\Sigma\pi_i$	1,000
C_8B_4	1	0,333	1,333	0,249	I_{max}	1,999
C_9B_4	3	1	3	0,750	ИС	0,001

После составления этих матриц суждений из их векторов приоритетов составляется матрица приоритетов. В матрице приоритетов второго уровня иерархии будет столько столбцов, сколько элементов на предыдущем уровне, а строк будет столько, сколько элементов на нижнем уровне (т. е. 9). Матрица справа умножается на вектор приоритетов видов критериев.

B_1	B_2	B_3	B_4				C
0.750	0	0	0				0.284
0.249	0	0	0		0.378		0.094
0	0.454	0	0		0.378		0.172
0	0.454	0	0	*	0.176	=	0.172
0	0.090	0	0		0.065		0.034
0	0	0.833	0				0.147
0	0	0.166	0				0.029
0	0	0	0.249				0.016
0	0	0	0.750				0.049

Уровень 4

На этом уровне составляется 8 матриц сужений (по числу критериев) приоритетов видов гидр разрыва пласта для повышения продуктивности нефтегазовых месторождений; их можно представить в виде таблиц:

Затем из девяти полученных вектор-столбцов приоритетов формируется матрица приоритетов для тре-

Таблица 5.
Матрицы парных сравнений стратегий D_i относительно каждого критерия C_i

C_1	D_1C_1	D_2C_1	D_3C_1	Σ по строке	π_i		
C_1D_1	1	1	0,33	2,333	0,199	$\Sigma \pi_i$	1,000
C_1D_2	1	1	0,33	2,333	0,199	I_{max}	3,000
C_1D_3	3	3	1	7	0,602	*ИС*	0,000

C_2	D_1C_2	D_2C_2	D_3C_2	Σ по строке	π_i		
C_2D_1	1	1	0,333	2,333	0,199	Σ	1,000
C_2D_2	1	1	0,333	2,333	0,199	I_{max}	3,000
C_2D_3	3	3	1	7	0,602	*ИС*	0,000

C_3	D_1C_3	D_2C_3	D_3C_3	Σ по строке	π_i		
C_3D_1	1	1	0,333	2,333	0,199	Σ	1,000
C_3D_2	1	1	0,333	2,333	0,199	I_{max}	3,000
C_3D_3	3	3	1	7	0,602	*ИС*	0,000

C_4	D_1C_4	D_2C_4	D_3C_4	Σ по строке	π_i		
C_4D_1	1	1	5	7	0,454	Σ	1,000
C_4D_2	1	1	5	7	0,454	I_{max}	3,000
C_4D_3	0,2	0,2	1	1,4	0,092	*ИС*	0,000

C_5	D_1C_5	D_2C_5	D_3C_5	Σ по строке	π_i		
C_5D_1	1	1	3	5	0,428	Σ	1,000
C_5D_2	1	1	3	5	0,428	I_{max}	2,999
C_5D_3	0,333	0,333	1	1,666	0,142	*ИС*	0,001

C_6	D_1C_6	D_2C_3	D_3C_6	Σ по строке	π_i		
C_6D_1	1	3	5	9	0,605	Σ	1,000
C_6D_2	0,333	1	3	4,333	0,291	I_{max}	3,115
C_6D_3	0,2	0,333	1	1,533	0,102	*ИС*	0,057

C_7	D_1C_7	D_2C_7	D_3C_7	Σ по строке	π_i		
C_7D_1	1	3	5	9	0,537	Σ	1,000
C_7D_2	0,333	1	5	6,333	0,378	I_{max}	3,031
C_7D_3	0,2	0,2	1	1,4	0,083	*ИС*	0,024

C_8	D_1C_8	D_2C_8	D_3C_8	Σ по строке	π_i		
C_8D_1	1	1	1	3	0,333	Σ	1,000
C_8D_2	1	1	1	3	0,333	I_{max}	3,000
C_8D_3	1	1	1	3	0,333	*ИС*	0,000

C_9	D_1C_9	D_2C_9	D_3C_9	Σ по строке	π_i		
C_9D_1	1	3	5	9	0,602	Σ	1,000
C_9D_2	0,333	1	3	4,333	0,291	I_{max}	3,11
C_9D_3	0,2	0,333	1	1,533	0,103	*ИС*	0,05

тьего уровня иерархии, которая умножается на вектор приоритетов, полученный на предыдущем шаге, и получается вектор приоритетов для видов гидр разрыва пласта.

$$\begin{vmatrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 & C_7 & C_8 & C_9 \\ 0.198 & 0.199 & 0.199 & 0.469 & 0.428 & 0.605 & 0.537 & 0.333 & 0.605 \\ 0.198 & 0.199 & 0.199 & 0.436 & 0.428 & 0.291 & 0.378 & 0.333 & 0.291 \\ 0.602 & 0.6 & 0.6 & 0.093 & 0.142 & 0.102 & 0.083 & 0.333 & 0.103 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} C \\ 0.284 \\ 0.094 \\ 0.172 \\ 0.172 \\ 0.034 \\ 0.147 \\ 0.029 \\ 0.016 \\ 0.049 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \\ D \\ 0.349 \\ 0.272 \\ 0.353 \end{vmatrix}$$

Таким образом, мы приходим к выводу, что, учитывая важность всех групп и критериев друг для друга, третий вариант, многоступенчатый гидр разрыв пласта, является оптимальным с точки зрения эффективности и риска, поскольку он получил оценку предпочтения 0,353, за ним следует традиционный гидр разрыв пласта, получивший оценку предпочтения 0,349, и, наконец, глубокий гидр разрыв пласта, получивший оценку предпочтения 0,272.

Основные результаты

Результаты исследования показали, что метод анализа иерархий является действенным инструментом для принятия решений по сложным и значимым вопросам, в том числе в рассматриваемом случае. Его применение позволило получить однозначные результаты при выборе видов гидр разрыва пласта с позиции эффективности и рисков на основе набора выбранных критериев (показателей), характеризующих эффективность планирования гидр разрыва пласта. Поскольку операции гидр разрыва пласта относятся к дорогостоящим и технологически сложным процедурам, требующим тщательной проработки, корректный выбор подходящего вида гидр разрыва является одним из ключевых этапов подготовки до начала выполнения работ.

В рамках данного исследования этапы применения метода анализа иерархий детально и в численном виде изложены вплоть до получения итоговых результатов. В связи с этим представленная работа может рассматриваться как методическое руководство, ориентированное на использование предложенного подхода при решении иных задач многокритериального принятия решений.

При этом, несмотря на очевидную трудоёмкость МАИ при выборе вида гидр разрыва пласта, возможна реализация многокритериальной оценки и с применением, например, метода нечёткого анализа иерархий, представляющего собой сочетание МАИ с инструментами нечёткой логики. Использование НМАИ позволяет повысить точность и надёжность получаемого решения, что особенно важно для стратегических задач, к которым, безусловно, относится выбор вида гидроразрыва пласта.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Силин М.А., Магадова Л.А., Глущенко В.Н. Технологические аспекты и материалы для гидр разрыва пласта / М.А. Силин, Л.А. Магадова, В.Н. Глущенко. — М., 2012. — 422 с.
3. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. — М.: Радио и связь, 1993. — 278 с.
4. Степин Ю.П. Проблемы и модели многокритериальной оценки рисков и эффективности разработки метаноугольных месторождений. Часть I / Ю.П. Степин // Труды РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. — 2018. — № 4 (293). — С. 154–171.
5. Петровский А.Б. Теория принятия решений / А.Б. Петровский. — М.: Академия, 2009. — 400 с.
6. Степин Ю.П. Компьютерная поддержка формирования, многокритериального ранжирования и оптимизации управленческих решений в нефтегазовой отрасли / Ю.П. Степин. — М.: Недра, 2016. — 421 с.
7. Степин Ю.П. Метод группового анализа иерархий для выбора вариантов разработки месторождений нефти и газа / Ю.П. Степин // Труды РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. — 2017. — № 1 (286). — С. 102–120.
8. Степин Ю.П., Бледных Е.Н., Макарик Е.В. Марковская модель метода анализа иерархий в оценке рисков вариантов разработки месторождений углеводородов / Ю.П. Степин, Е.Н. Бледных, Е.В. Макарик // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 2021. — Т. 1, № 570. — С. 23–32.
9. Лю Хуань. Метод нечёткого анализа иерархий для выбора сайта электронной коммерции / Лю Хуань // Вестник БГУ. Сер. 1. — 2014. — № 3. — С. 89–93.
10. Фам Ван Ты. Применение нечёткого метода анализа иерархий к методу анализа видов и последствий отказов / Фам Ван Ты // Computational Nanotechnology. — 2021. — Т. 8. — № 2. — С. 29–36.

© Фетарони Малак (malakfie2@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.44

АДАПТАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ИМПУТАЦИИ ОДНОМЕРНЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

ADAPTIVE APPROACH TO THE IMPUTATION OF ONE-DIMENSIONAL TIME SERIES OF SATELLITE DATA BASED ON MACHINE LEARNING METHODS

N. Khannanov

Summary. Modern satellite observation systems form continuous time series of measured parameters, which are used in the tasks of analyzing and predicting the dynamics of observed phenomena, however, the presence of gaps resulting from equipment failures, interference in communication channels, etc. increases the level of uncertainty in the interpretation of satellite data and reduces the effectiveness of sources of information of this kind. Simple linear interpolation, classical statistical models, and neural network models are most often used in such situations. However, classical interpolation schemes ignore the complex dynamics of signals and have significant methodological errors, because of which they reduce accuracy on long fragments of gaps. Statistical models are sensitive to the assumption of stationarity and accumulate error in the long absence of data. Neural network models demonstrate excessive complexity for short passes with high demands on computing resources. The paper considers an adaptive method of imputation of one–dimensional satellite time series, which includes preprocessing and comparing three imputation tools — linear interpolation, an autoregressive integrated moving average model, and a recurrent neural network. It is shown that with short gaps, simple methods provide a quality comparable to a neural network, but with an increase in the length of gaps, the neural network demonstrates a stable advantage. The values of the coefficient of determination remain positive and retain practical value, whereas the autoregressive model and linear interpolation are characterized by an increase in the average absolute error and a decrease in the coefficient of determination up to negative values. Based on the revealed dependencies, an algorithm for selecting a method based on the length of the pass is proposed, which forms the basis for adaptive imputation of satellite time series.

Keywords: data imputation, time series, satellite data, linear interpolation, statistical models, recurrent neural networks, adaptive method selection.

Ханнанов Наиль Камилевич
аспирант, Уфимский университет науки и технологий
nael20000@yandex.ru

Аннотация. Современные спутниковые системы наблюдения формируют непрерывные временные ряды измеряемых параметров, которые используются в задачах анализа и прогноза динамики наблюдаемых явлений, однако наличие пропусков, возникающих вследствие сбоев аппаратуры, помех в каналах связи и пр. способствует повышению уровня неопределенности при интерпретации спутниковых данных и снижает эффективность источников информации такого рода. Чаще всего в таких ситуациях применяются простая линейная интерполяция, классические статистические модели и нейросетевые модели. Однако, классические интерполяционные схемы игнорируют сложную динамику сигналов и имеют существенные методические ошибки, в результате чего снижают точность на длинных фрагментах пропусков. Статистические модели чувствительны к предположению стационарности и накапливает ошибку при продолжительном отсутствии данных. Нейросетевые модели демонстрируют избыточную сложность для коротких пропусков при высоких требованиях к вычислительным ресурсам. В работе рассматривается адаптационный метод импутации одномерных спутниковых временных рядов, включающий предобработку и сравнение трёх инструментов импутации — линейной интерполяции, авторегрессионной интегрированной модели скользящего среднего, а также рекуррентной нейронной сети. Показано, что при коротких пропусках простые методы обеспечивают сопоставимое с нейросетью качество, однако при увеличении длины разрывов устойчивое преимущество демонстрирует нейросеть. Значения коэффициента детерминации остаются положительными и сохраняют практическую ценность, тогда как авторегрессионная модель и линейная интерполяция характеризуются ростом средней абсолютной ошибки и снижением коэффициента детерминации вплоть до отрицательных значений. На основе выявленных зависимостей предложен алгоритм выбора метода по длине пропуска, формирующий основу для адаптивной импутации спутниковых временных рядов.

Ключевые слова: импутация данных, временные ряды, спутниковые данные, линейная интерполяция, статистические модели, рекуррентные нейронные сети, адаптивный выбор метода.

Введение

Современные спутниковые системы формируют непрерывные временные ряды измерений, которые используются в широком спектре прикладных задач. В частности, космические аппараты ACE и DSCOVR выступают ключевыми источниками потоковых данных для оперативных систем предупреждения, защищающих энергетические сети и спутниковую навигацию от внешних возмущений [1]. Поскольку алгоритмы прогнозирования в таких системах требуют строго регулярных входных данных, задача импутации пропущенных зна-

чений является обязательным этапом предварительной обработки данных для сохранения работоспособности моделей [2]. В задачах атмосферного мониторинга данные спутника DSCOVR применяются для количественной оценки аэрозольной нагрузки и анализа состава среды [3]. В этом контексте методы реконструкции сигналов необходимы для устранения шумов и пробелов, вызванных оптическими помехами, что позваляет получить целостную структуру данных для дальнейшего анализа. Аналогичным образом телеметрия группы спутников Swarm используется для калибровки ионосферных моделей и детектирования аномалий в регистрируемых сигналах [4,5]. Временные ряды спутниковых измерений часто содержат пропуски, обусловленные отказами приборов, потерями телеметрии, орбитальными затенениями и помехами в каналах связи из-за чего возникает потребность восстановления данных обеспечивающего согласованную агрегацию и доступ к разнородным источникам для корректных научных и прикладных выводов [6,7]. Выбор метода заполнения пропусков напрямую влияет на качество последующего прогнозирования и статистических выводов. В частности, для одномерных временных рядов разные методы могут давать существенно отличающиеся оценки точности прогноза [8].

Эмпирические исследования последних лет подтверждают, что классические методы импутации такие как линейная интерполяция и ARIMA (*от англ.* AutoRegressive Integrated Moving Average) и их вариации) сохраняют свою практическую ценность благодаря интерпретируемости и низкой вычислительной сложности. Однако в задачах со сложной нелинейной динамикой и выраженной сезонностью современные нейросетевые модели такие как LSTM (*от англ.* Long Short-Term Memory) часто демонстрируют более высокую точность восстановления. Обзоры и сравнительные исследования по глубокому обучению для спутниковых временных рядов подчёркивают растущую роль методов глубокого обучения в импутации недостающих значений и пространственно-временном восстановлении наблюдений [9,10].

Практическая значимость качественного восстановления спутниковых временных рядов проявляется в прикладных задачах: ряд работ, использующих LSTM-архитектуры для прогноза индексов геомагнитной активности, демонстрирует высокую предсказательную способность рекуррентных сетей и указывает на необходимость обеспечения надёжности входных временных рядов для снижения неопределённости прогноза [9, 11]. В частности, стабильность восстановленных рядов критична для диагностики индуцированных токов по данным наземных магнитометров [12]. При этом динамическая визуализация разнородных геопространственных данных повышает ситуационную осведомленность и облегчает интерпретацию артефактов восстановления [13]. Анализ подобных артефактов указывает на проблему слабой адаптированности известных методов восстановления временных рядов к разнородным пропускам спутниковых данных.

Целью исследования является разработка и апробация метода выбора оптимальной стратегии импутации временного ряда в зависимости от временной протяженности пропусков. Предполагается, что такая адаптивная стратегия позволит повысить качество восстановленных рядов и, как следствие, надёжность последующего анализа и прогнозирования в различных прикладных задачах.

Исходные данные и их предварительная обработка

В качестве экспериментальной базы исследования используются временные ряды параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП), полученные из открытых источников Центра прогнозирования космической погоды NOAA. Исходный массив данных представляет собой последовательность измерений с минутным временным разрешением, содержащую значения ортогональных компонент вектора магнитной индукции (B_X, B_Y, B_Z), выраженные в нанотеслах (нТл), модуль полного вектора B_T, нТл, а также пространственные координаты космического аппарата в системе GSM выраженные в градусах (табл. 1).

Таблица 1.

Фрагмент исходных данных

Дата/время, гггг-мм-дд чч:мм:сс	B_X, нТл	B_Y, нТл	B_Z, нТл	LON_{GSM}, град.	LAT_{GSM}, град.	B_T, нТл
2025-12-14 17:23:00	–1.15	–3.74	0.74	252.86	10.69	3.98
2025-12-14 17:24:00	–1.35	–3.68	0.90	249.92	12.93	4.02
2025-12-14 17:25:00	–1.40	–3.66	0.87	249.10	12.50	4.02
2025-12-14 17:26:00	–1.31	–3.69	0.94	250.41	13.50	4.03
2025-12-14 17:27:00	м1.33	–3.75	0.72	250.50	10.21	4.04
2025-12-14 17:28:00	–1.42	–3.68	0.97	248.90	13.81	4.06
2025-12-14 17:29:00	–1.43	–3.61	0.97	248.31	14.01	4.00

Для апробации рассматриваемых методов импутации в качестве целевой переменной выбрана вертикаль-

ная компонента ММП (B_z), динамика которой является критически важной для задач геофизического мониторинга и прогнозирования. Перед процедурой импутации к данным применяется предварительная обработка для устранения высокочастотного шума и случайных выбросов. К временным рядам применяется фильтр низких частот Баттерворта 4-го порядка. Выбор данного типа фильтра обусловлен его плоской амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) в полосе пропускания, что обеспечивает минимальное искажение полезного сигнала. Квадрат АЧХ фильтра Баттерворта порядка n описывается выражением (1).

$$| H(w) |^2 = \frac{1}{1 + (f / f_c)^{2n}} \quad (1)$$

где $n = 4$ — порядок фильтра, определяющий крутизну спада АЧХ в полосе подавления; f — частота сигнала, мГц; $f_c \approx 0.55$ мГц — частота среза при выбранном периоде среза равном 30 минутам.

На рис. 1а представлена АЧХ фильтра, демонстрирующая резкий спад коэффициента передачи в области частот выше 0.55 мГц, что соответствует периодам колебаний короче 30 минут. На рис. 1б показан результат наложения фильтра на реальный временной ряд компоненты B_z: обработанный сигнал сохраняет основную динамику и структуру исходных данных, избавляясь при этом от шумовой составляющей.

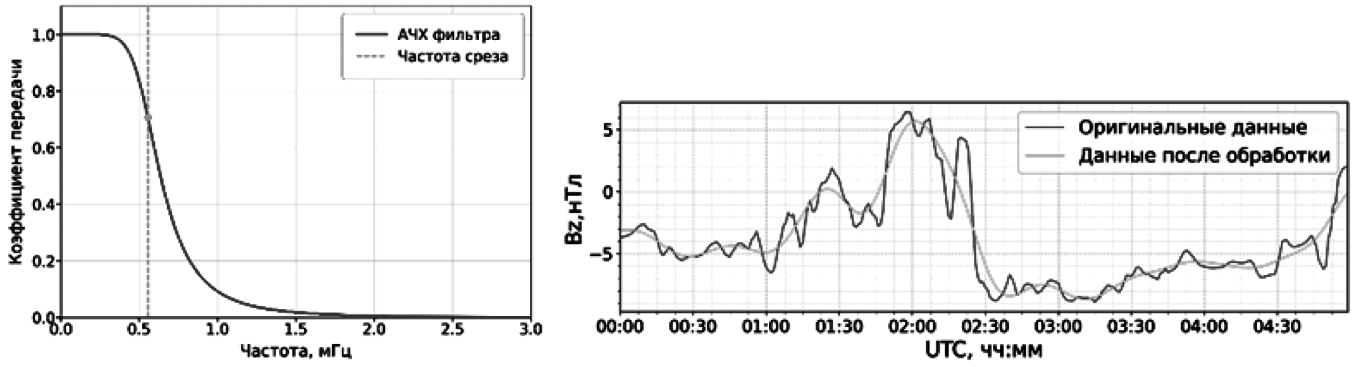
Методология адаптивной импутации данных на основе интеллектуальных подходов

В настоящее время для восстановления временных рядов используется широкий набор инструментов, начиная с простых статистических приёмов и заканчивая моделями глубокого обучения. При работе со спутниковыми данными чаще применяются гибридные нейросетевые схемы, способные учитывать пространственно-временную структуру сигнала [14,15]. Успешность применения таких подходов подтверждена и на смежных геофизических задачах [16]. В то же время, специфику геомагнитных данных эффективно учитывают методы, основанные на физике источника сигнала [17], а также современные подходы к реконструкции на базе концепции цифровых двойников [18].

Восстановление временных рядов представляет собой междисциплинарную задачу, в которой встречаются как традиционные статистические процедуры, ориентированные на простоту реализации и минимальные вычислительные затраты, так и сложные архитектуры глубокого обучения, предназначенные для работы с нелинейными динамическими процессами и большими массивами данных. Между этими полюсами располагаются интерполяционные алгоритмы и модели временных рядов, учитывающие сезонность и автокорреляционные зависимости, а также гибридные и ансамблевые подходы, объединяющие возможности разных методов. Такая классификация не только отражает эволюцию подходов от простых к более сложным, но и демонстрирует их взаимодополняемость, указывая на необходимость создания систем, способных гибко переключаться между алгоритмами в зависимости от характеристик исходных данных и структуры пропусков.

Среди множества методов восстановления временных рядов особый интерес представляют линейная интерполяция, ARIMA и LSTM, так как они отражают три различных подхода к решению задачи. Линейная интерполяция демонстрирует возможности простейших статистических процедур, ARIMA представляет классические модели с учётом автокорреляции и сезонности, а LSTM воплощает современные методы глубокого обучения, способные обрабатывать нелинейные зависимости и длинные последовательные пропуски. Рассмотрение именно этих методов позволяет проследить эволюцию подходов и сопоставить их эффективность в различных сценариях.

Линейная интерполяция относится к числу наиболее простых и широко используемых методов восстановления временных рядов. Её суть заключается в аппрокси-



а б

Рис. 1. АЧХ используемого фильтра Баттерворта 4-го порядка (а), фрагмент временного ряда компоненты B_z до и после фильтрации низких частот (б)

мации пропущенных значений отрезками прямых между двумя соседними известными точками. Для временного ряда $\{x_t\}_{t=1}^{T}$ при наличии пропуска в момент времени t, значение восстанавливается согласно выражению 2:

$$\hat{x}_t = x_{t_1} + \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \cdot (x_{t_2} - x_{t_1}), \quad (2)$$

где t — момент времени с пропуском; t_1 — индекс ближайшего наблюдения слева (до пропуска); t_2 — индекс ближайшего наблюдения справа (после пропуска); x_{t_1}, x_{t_2} — значения ряда в этих точках; $\hat{x}_t$ — восстановленное значение.

Данный метод обладает высокой вычислительной эффективностью и обеспечивает непрерывность ряда, однако он не учитывает ни долгосрочных зависимостей, ни сезонных компонентов, вследствие чего его точность резко снижается при длинных блоках пропусков и в условиях сложной динамики сигналов

Модели авторегрессии, интегрирования и скользящего среднего такие как ARIMA занимают важное место в задачах анализа и восстановления временных рядов. Их ключевая особенность состоит в способности учитывать автокорреляции и сезонные компоненты данных. Общий вид модели ARIMA (p, d, q) записывается согласно выражению 3.

$$\Phi_p(B)(1 - B)^d x_t = \Theta_q(B)\varepsilon_t, \quad (3)$$

где, x_t — значение временного ряда в момент времени t; B — оператор сдвига, такой что $Bx_t = x_{t-1}$; $\Phi_p(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - ... - \phi_p B^p$ — оператор авторегрессии порядка p; $(1 - B)^d$ — оператор дифференцирования порядка d, устраняющий тренд и обеспечивающий стационарность ряда; $\Theta_q(B) = 1 + \theta_1 B + \theta_1 B^2 + ... + \theta_q B^q$ — оператор скользящего среднего порядка q; ε_t — белый шум (независимые случайные величины с нулевым математическим ожиданием и постоянной дисперсией).

В случае выраженной сезонности применяется расширение SARIMA, включающее сезонные операторы с периодом s. Достоинством ARIMA является её интерпретируемость и устойчивость при умеренной доле пропусков, однако ограничения проявляются при нелинейной динамике и значительных блоковых потерях данных.

LSTM представляет собой разновидность рекуррентных нейронных сетей, специально разработанную для обработки длинных временных зависимостей и нелинейной динамики. В отличие от традиционных рекуррентных нейронных сетей, LSTM использует систему «ворот», регулирующих поток информации: входные, забывающие и выходные ворота. Формально обновления состояния ячейки задаются набором выражений (4).

$$\left.\begin{aligned} f_t &= \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \\ i_t &= \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \\ \tilde{C}_t &= \tanh(W_C \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_C) \\ C_t &= f_t \odot C_{t-1} + i_t \odot \tilde{C}_t \\ o_t &= \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \\ h_t &= o_t \odot \tanh(C_t) \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

где x_t — входной вектор в момент времени t; h_{t-1} — скрытое состояние на предыдущем шаге; C_{t-1}, C_t — состояние памяти на шаге $t - 1$ и t; f_t — забывающий вектор, контролирует, какая часть информации из памяти будет сохранена; i_t — входной вектор, контролирует, какая новая информация поступает в память; $\tilde{C}_t$ — кандидатное значение ячейки памяти, которое формируется на основе текущего входа и предыдущего скрытого состояния и может быть добавлено к долгосрочному состоянию C_t; o_t — выходной вектор, регулирует, какая часть информации памяти будет выдана наружу; $\sigma(\cdot)$ — сигмоидальная функция активации; $\tanh(\cdot)$ — гиперболический тангенс; $\odot$ — поэлементное умножение; W_f, W_i, W_C, W_o — матрицы весов для каждого их ворот; b_f, b_i, b_C, b_o — векторы смещений.

Такая архитектура позволяет сети запоминать долгосрочные зависимости, игнорировать несущественные колебания и учитывать нелинейные эффекты, что делает LSTM особенно эффективной при работе с геофизическими временными рядами, где характерны сложные вариации и большие последовательные пропуски.

Однако для эффективного внедрения подобных вычислительно емких архитектур в реальный процесс мониторинга необходима единая процедурная схема, регламентирующая подготовку данных. Структурно этот подход реализован в виде методики представленной на рис. 2.

Схема метода иллюстрирует последовательный конвейер обработки данных, включающий этапы предобработки потока измерений, детектирования интервала пропусков и расчета признаков временного ряда. Ключевым элементом метода является блок адаптивного выбора модели, который направляет задачу импутации на вход оптимального алгоритма перед финальной постобработкой восстановленного ряда.

Оценка погрешности восстановления в зависимости от длины импутируемых фрагментов

Эксперимент направлен на сравнение точности восстановления пропусков в одноминутном ряду $B_z(t)$

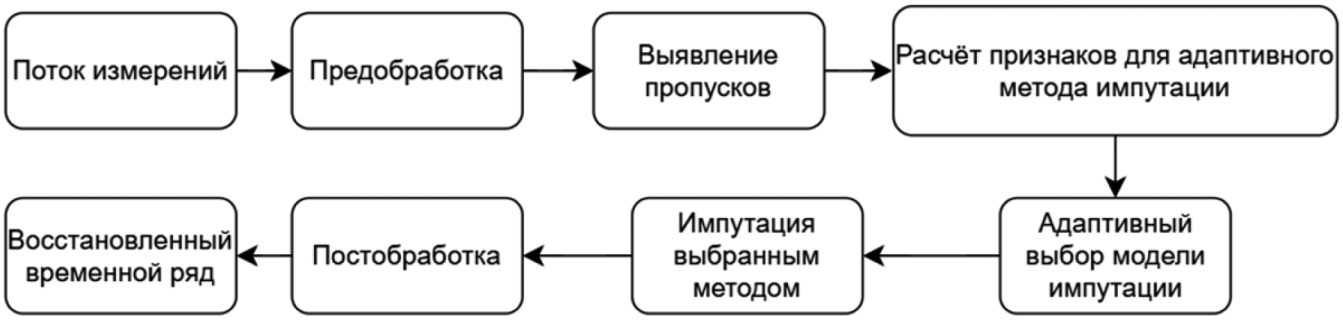


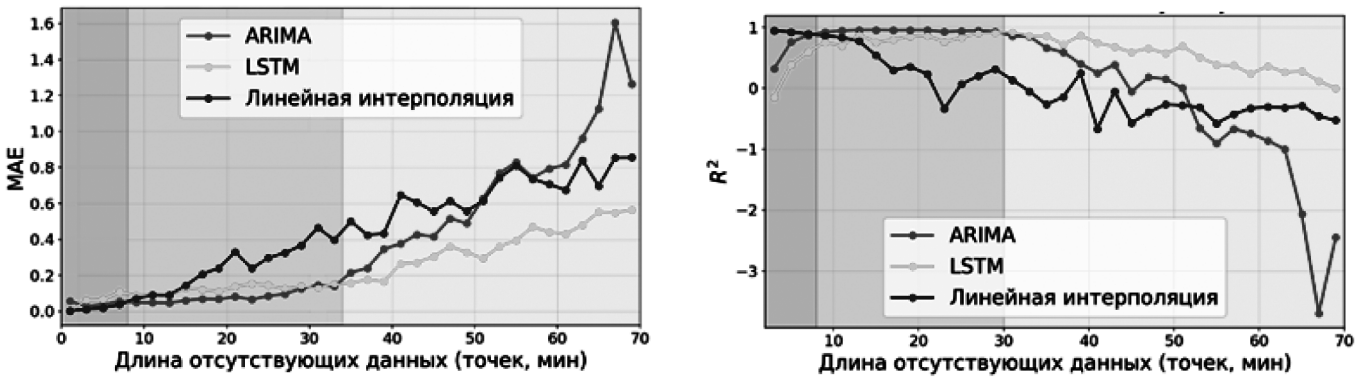
Рис. 2. Структурная схема адаптационного метода импутации

в фиксированных трёхчасовых окнах (180 точек) при различных длинах непрерывных пропусков. Для анализа отбираются N=100 непересекающихся сегментов без пропусков; выборка стартовых индексов сегментов производится из множества допустимых окон длины 180 точек (равномерная частота «одна минута») с последующей случайной подвыборкой. Длины искусственно создаваемых пропусков варьируются в диапазоне $L \in \{1,3,5,\ldots,59\}$. Пропуски для расчёта метрик размещаются внутри сегмента с защитными отступами по 10 точек от краёв, а для визуализации формируется дополнительный сценарий с пропуском по центру окна. Вся процедура выполняется при фиксированном множестве случайных чисел, конфигурация и артефакты эксперимента сериализуются в отдельные файлы, что задаёт базовый ориентир для моделей машинного обучения и подчёркивает роль масштабируемых ARIMA-подходов на больших горизонтах [19].

Сравниваются три метода восстановления: линейная временная интерполяция; двусторонний авторегрессионный метод ARIMA(5,0,0), двунаправленная рекуррентная нейросеть LSTM с последующей аффинной стыковкой на границах пропуска.

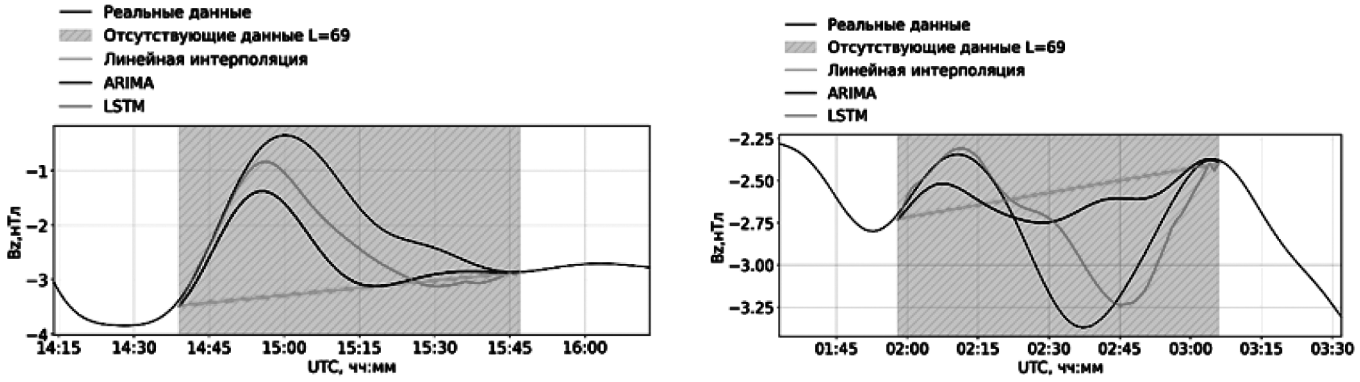
Анализ кривых на рис. 3 показывает устойчивое преимущество LSTM на средних и больших пропусках. Это преимущество связано с наличием длинной нелинейной памяти, позволяющей модели использовать широкий контекст и типичные шаблоны динамики ряда, в том числе при смене режимов. В отличие от неё, ARIMA при заполнении длинных интервалов фактически выполняет многократный прогноз, накапливая ошибку и постепенно вырождаясь в усреднение, поэтому не воспроизводит реальные колебания сигнала внутри разрыва. Линейная интерполяция опирается только на две границы пропуска и игнорирует внутреннюю структуру процесса, поэтому остаётся конкурентоспособной лишь при очень коротких разрывах, где траектория реально близка к линейной. Таким образом, по мере роста длины пропуска преимущества методов, использующих широкий контекст и нелинейную динамику, последовательно увеличиваются, тогда как линейные и локальные схемы демонстрируют резкое ухудшение качества.

На рис. 4 представлены результаты импутации пропусков во временном ряду компоненты B_z при длительности разрыва 69 отсчётов. В обоих примерах линейная интерполяция формирует монотонную траекторию между границами и, как следствие, не воспроизводит внутреннюю динамику сигнала при наличии выраженной нелинейности и смены тренда. ARIMA частично восстанавливает форму за счёт учета автокорреляционной структуры, однако в условиях нестационарности демонстрирует сглаживание экстремумов, что проявляется в недооценке амплитуды и искажении фазы. Реконструкция LSTM в большей степени сохраняет характерные перегибы и экстремумы внутри разрыва, визуально со-



а б

Рис. 3. Зависимость MAE (а) и R^2 (б) восстановления от длины пропуска наблюдений



а б

Рис. 4. Результаты импутации отсутствующего фрагмента 17.01.2022 (а) и 22.03.2022 (б)

гласовываясь с реальной траекторией при сложной динамике, хотя в отдельных участках возможны локальные отклонения, связанные с неопределённостью внутри длинного интервала без наблюдений.

Синтез адаптивного алгоритма восстановления данных с учетом длины пропусков

Как показал сравнительный анализ, ни один из рассмотренных методов восстановления не является универсальным. Статистические алгоритмы эффективны на коротких разрывах и обладают низкими вычислительными затратами, а нейросетевые архитектуры необходимы для для качественной реконструкции динамики сигнала на длительных интервалах отсутствия данных. Следовательно, применение единого алгоритма для всего потока данных является неоптимальным.

Для решения этой проблемы предлагается подход, основанный на адаптивном переключении алгоритмов. С формальной точки зрения, задача сводится к построению решающего правила, которое для каждого конкретного случая осуществляет выбор стратегии восстановления, минимизирующей ошибку.

Практическая мотивация подхода исходит из специфики анализа геофизических временных рядов, где корректность восстановления зависит от локальной топологии данных [17]. Предполагается, что учет характеристик разрыва позволяет снизить неопределенность и применить инструмент адекватный масштабу потери информации.

Цель метода — минимизировать риск восстановления на пропусках в соответствии с выражением 5.

$$\arg\min_{a \in A} L(X, \hat{X}^{(a)}; M) \quad (5)$$

где A — конечное множество методов восстановления данных; $a \in A$ — конкретный метод из множества A; $X \in \mathbb{R}^{T \times d}$ — исходный многомерный временной ряд (длина T, число признаков d); $M \in \{0,1\}^{T \times d}$ — маска наблюдаемости: $M_{t,j} = 1$ если значение $x_{t,j}$ наблюдалось, и 0 если оно пропущено; $\hat{X}^{(a)} = f_a(X, M)$ — восстановленный ряд, полученный методом a при подаче ему исходных данных и маски; $f_a(\cdot)$ — «исполнитель» выбранного метода; $L(X, \hat{X}^{(a)}; M)$ — функция ошибки восстановления, которая сравнивает истинный ряд с восстановленным на позициях пропусков; $\arg\min_{a \in A}$ — множество всех методов a, дающих минимальное значение ошибки.

В предлагаемом подходе выбор оптимального алгоритма a осуществляется на основе вектора характеристик пропуска, в частности, длительности непрерывного интервала отсутствия данных. Именно этот параметр является ключевым критерием для определения наиболее подходящей вычислительной стратегии.

На рис. 5 представлена блок-схема алгоритма, формализующего правило выбора метода восстановления в зависимости от длины пропуска и реализующего обработку каждого разрыва в цикле. Такой алгоритм позволяет объединить вычислительно простые методы для коротких пропусков и более выразительные модели для длинных разрывов, снижая риск ухудшения качества за счёт использования заведомо неподходящего метода восстановления.

Обсуждение результатов

В рамках развития предложенного подхода для повышения обобщающей способности выводов требуется переход от усреднённого анализа по совокупной выборке к стратифицированному рассмотрению различных типов динамики временных рядов. Например, режимов высокой и низкой вариабельности, присутствия или отсутствия выраженной сезонности, различной доли и структуры пропусков, а также влияния характеристик шума и возможных дрейфов. Такая стратификация позволит более точно описать области применимости каж-

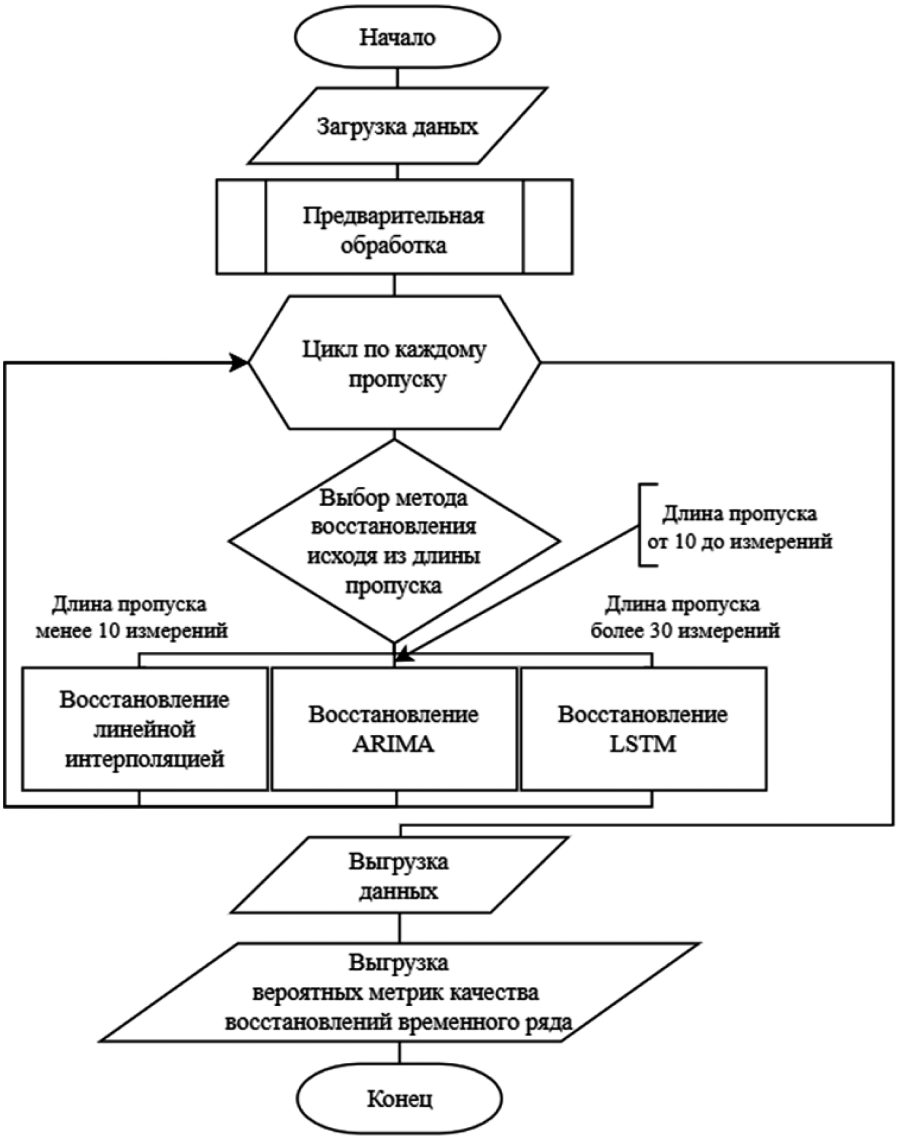


Рис. 5. Алгоритм восстановления пропусков временных рядов исходя из длины пропуска

дого метода и сформировать практические рекомендации, привязанные к конкретным классам спутниковых данных.

Отдельным направлением развития представляется расширение набора сравниваемых подходов с использованием единого протокола «честной» валидации, ориентированного на современные бенчмарки по импутации временных рядов [20]. В этот набор целесообразно включить как классические вероятностные модели и современные методы понижения размерности, так и специализированные архитектуры глубокого обучения для обработки неполных временных последовательностей. Также естественным шагом выглядит построение метамодели адаптивного выбора метода, которая, опираясь на признаки временного ряда и структуру маски пропусков, автоматически подбирала бы стратегию восстановления. Дополнительный потенциал связан с ансамблевыми схемами, сочетающими локальные (простые и интерпретируемые) и глубинные (контекстно-ориентированные) модели, что может обеспечить одновременно устойчивость к различным типам разрывов и повышение точности восстановления в реальных задачах обработки спутниковых временных рядов.

Заключение

В работе предложен метод импутации одномерных временных рядов спутниковых данных на примере измерений B_z компоненты ММП. В ходе исследования осуществлено сопоставление эффективности трёх инструментов импутации — линейной интерполяции, стохастической модели ARIMA и рекуррентной нейронной сети LSTM. Численные эксперименты с искусственно сформированными разрывами длительностью от 1 до 59 минут и последующей оценкой качества по метри-

кам средней абсолютной ошибки (MAE) и коэффициента детерминации (R^2) продемонстрировали выраженную зависимость эффективности указанных методов от длины интервала отсутствующих данных. Показано, что для коротких разрывов (до порядка 10 минут) линейная интерполяция и ARIMA обеспечивают сопоставимое с LSTM качество восстановления, что делает применение сложных моделей на таком горизонте избыточным и позволяет рассматривать простые методы в качестве рационального базового решения.

При увеличении продолжительности разрывов до диапазона порядка 10–35 минут выявлено устойчивое преимущество LSTM, проявляющееся в минимальных значениях MAE и стабильно высоких значениях R^2 (около 0,8 — 0,9) на фоне систематического «выпрямления» траекторий линейной интерполяцией и, как следствие, потери части динамики сигнала внутри окна пропуска. Для длинных разрывов (порядка 40 минут и более) преимущество моделей с нелинейным представлением становится наиболее выраженным: LSTM обеспечивает положительные значения R^2, сохраняющие практическую прогностическую ценность, тогда как для ARIMA наблюдается резкое ухудшение вплоть до отрицательных значений R^2, а у линейной интерполяции существенно возрастает MAE. Применение аффинной стыковки на границах разрывов снижает уровень скачков для всех рассмотренных методов, однако не устраняет принципиальные ограничения линейных моделей на больших интервалах восстановления.

Полученные зависимости качества восстановления от длины пропусков позволяют обосновать гибридную стратегию выбора метода импутации: линейная интерполяция оказывается целесообразной для очень малых окон, LSTM следует рассматривать как основной инструмент для средних и длинных разрывов, а ARIMA может использоваться как интерпретируемый ориентир на умеренных длинах при близкой к стационарной динамике временного ряда. Тем самым формируется методологический вывод для задач обработки спутниковых временных рядов: модели с богатым контекстным представлением и нелинейной аппроксимацией (LSTM и их современные модификации) должны рассматриваться в качестве метода по умолчанию при наличии значимой доли длинных пропусков, тогда как простые схемы импутации сохраняют значение быстрого базового уровня, эталона для сравнения и компонента ансамблевых решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Smith A. W., Forsyth C., Rae I. J., et al. On the considerations of using near real time data for space weather hazard forecasting // Space Weather. 2022. Vol. 20, No. 7. e2022SW003098. DOI: 10.1029/2022SW003098.
2. Kondrashov D., Shprits Y., Ghil M. Gap Filling of Solar Wind Data by Singular Spectrum Analysis // Geophysical Research Letters. 2010. Vol. 37. L15101. DOI: 10.1029/2010GL044138.
3. Ahn C., Torres O., Jethva H., Tiruchirapalli R., Huang L.-K. Evaluation of aerosol properties observed by the DSCOVR/EPIC instrument from the Earth–Sun Lagrange 1 orbit // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2021. Vol. 126, No. 12. e2020JD033651. DOI: 10.1029/2020JD033651.
4. Cherniak I., Zakharenkova I. High-latitude ionospheric irregularities: differences between ground— and space-based GPS measurements during the 2015 St. Patrick's Day storm // Earth, Planets and Space. 2016. Vol. 68. Art. 136. DOI: 10.1186/s40623-016-0506-1.
5. Fæhn Follestad A., Clausen L. B. N., van den IJssel J., et al. Two-Dimensional Reconstruction of Ionospheric Plasma Density Variations in the Polar Cap Ionosphere // Space Weather. 2020. Vol. 18, No. 2. e2019SW002406. DOI: 10.1029/2019SW002406.
6. Alwateer M., Atlam E.-S., Abd El-Raouf M. M., Ghoneim O. A., Gad I. Missing Data Imputation: A Comprehensive Review // Journal of Computer and Communications. 2024. Vol. 12. P. 53–75. DOI: 10.4236/jcc.2024.1211004.
7. Воробьев А. В., Воробьева Г. Р., Юсупова Н. И. Концепция единого пространства геомагнитных данных // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18, № 2. С. 390–415. DOI: 10.15622/sp.18.2.390–415.
8. Park M. J., Park E. J., Sohn S. Y. Comparative Study of Time Series Analysis Algorithms (ARIMA, SARIMA, LSTM, SVM) for Short-Term Load Forecasting // Sensors. 2024. Vol. 24, No. 22. Art. 7205. DOI: 10.3390/s24227205.
9. Miller L., Pelletier C., Webb G. I. Deep Learning for Satellite Image Time Series Analysis: A Review. arXiv:2404.03936, 2024.
10. Kataoka R., Nakano S. Reconstructing Solar Wind Profiles Associated With Extreme Magnetic Storms: A Machine Learning Approach // Geophysical Research Letters. — 2021. — Vol. 48, No. 23. — e2021GL096275. — DOI: 10.1029/2021GL096275.
11. Shammi N. J., Ashraf T., Ifty R. A., Rahman M. Z. Forecasting Geomagnetic Storms for Earth Using LSTM with Solar Wind and IMF Features // Proc. 2024 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISET-2024). IEEE, 2024. DOI: 10.1109/ICISET62123.2024.10939246.
12. Vorobev A., Soloviev A., Pilipenko V. [et al.] An Approach to Diagnostics of Geomagnetically Induced Currents Based on Ground Magnetometers Data // Applied Sciences (Switzerland). 2022. Vol. 12, No. 3. DOI 10.3390/app12031522.
13. Воробьев А. В., Воробьева Г. Р. Подход к динамической визуализации разнородных геопространственных векторных изображений // Компьютерная оптика. 2024. Т. 48, № 1. С. 123–138. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1279.
14. Appel M. Efficient data-driven gap filling of satellite image time series using deep neural networks with partial convolutions // Artificial Intelligence for the Earth Systems. 2024. Vol. 3, No. 2. DOI: 10.1175/AIES-D-22-0055.1.

15. Qian L., Wu L., Zhang Z., Cui Y. A gap filling method for daily evapotranspiration of global flux data sets based on deep learning // Journal of Hydrology. 2024. Vol. 641, No. 5. Art. 131787. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131787.
16. Bessenbacher V., Schumacher D. L., Hirschi M., Seneviratne S. I., Gudmundsson L. Gap-Filled Multivariate Observations of Global Land–Climate Interactions // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2023. Vol. 128, No. 24. e2023JD039099. DOI: 10.1029/2023JD039099.
17. Воробьев А. В., Воробьева Г. Р. Индуктивный метод восстановления временных рядов геомагнитных данных // Труды СПИИРАН. 2018. № 2(57). С. 104–133. DOI: 10.15622/sp.57.5.
18. Воробьев А.В., Пилипенко В.А. Подход к восстановлению геомагнитных данных на базе концепции цифровых двойников // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7, № 2. С. 53–62. DOI: 10.12737/szf-72202105.
19. Wang X., Kang Y., Hyndman R. J., Li F. Distributed ARIMA models for ultra-long time series // International Journal of Forecasting. 2023. Vol. 39, No. 3. P. 1163–1184. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2022.05.001.
20. Du W., Wang J., Qian L., Yang Y., Ibrahim Z., Liu F., Wang Z., Liu H., Zhao Z., Zhou Y., Wang W., Ding K., Liang Y., Prakash B. A., Wen Q. TSI-Bench: Benchmarking Time Series Imputation [Электронный ресурс]. — arXiv:2406.12747, 2024. — DOI: 10.48550/arXiv.2406.12747.

© Ханнанов Наиль Камилевич (nael20000@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.45

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К СОПРОВОЖДЕНИЮ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ, СВЯЗАННЫХ С ПРОДУКЦИЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

METHODOLOGICAL APPROACHES TO SUPPORTING BUSINESS PROCESSES RELATED TO ENGINEERING PRODUCTS

D. Tsimberov

Summary. The paper considers ways to solve problems that arise as a result of the contradiction between the need for an effective way to support management activities to maintain the technical characteristics of used mechanical engineering products at a modern level, on the one hand, and significant financial costs caused by factors of technological development, entailing the emergence of insufficiently developed information links between subjects of interaction when using mechanical engineering products.

Keywords: structural and functional plan, Mechanical engineering, modern sample, sample characteristics, innovation, technological development factors, risk management plan, management system, financial audit, procurement.

Цимберов Дмитрий Михайлович
кандидат военных наук, доцент,
Московский политехнический университет
katana647@ya.ru

Аннотация. В работе рассмотрены пути решения задач, возникающих в результате противоречия между потребностью в эффективном способе сопровождения управленческой деятельности по поддержанию технических характеристик используемой продукции машиностроения на современном уровне с одной стороны и значительными финансовыми издержками, обусловленными факторами технологического развития, влекущими возникновение недостаточно проработанных информационных связей между субъектами взаимодействия при использовании продукции машиностроения.

Ключевые слова: структурно-функциональная схема, машиностроение, современный образец, характеристики образца, инновации, факторы технологического развития, схема управления рисками, система управления, финансовый аудит, закупка.

В настоящее время крупные корпоративные организации, эксплуатирующие (использующие) продукцию машиностроения, при решении задач поддержки управленческих решений по внедрению машиностроительной продукции в свои бизнес-процессы не в полной мере могут внедрять инновации в свою деятельность. Это прежде всего связано с тем, что сами формулировки проблем, с которыми сталкиваются данные организации слабоструктурированы. Причинами данного положения дел является противоречие между потребностью в эффективном способе сопровождения управленческой деятельности по поддержанию технических характеристик используемой продукции машиностроения на современном уровне с одной стороны и значительными финансовыми издержками, обусловленными факторами технологического развития, влекущими возникновение недостаточно проработанных информационных связей между субъектами взаимодействия при использовании продукции машиностроения.

Также одной из специфических задач финансового аудита является анализ эффективности применения схемы управления рисками. Показатели современности образцов влияют на такие значения уровней управления риском, как нерациональная закупка товаров, несоблюдение условий договора (снижение технических условий, предполагаемых по условиям закупки), которые в свою очередь приводят к высокому уровню материального ущерба.

Если обобщить проблематику предлагаемого для рассмотрения в статье противоречия, то на первый план выходят недостатки в организации:

1. Технического обслуживания и ремонта оборудования.
2. Комплекса мер по повышению надежности, ремонтопригодности и оперативности проведения ремонтных работ.
3. Истребования (разработки) технической документации для высокотехнологичных образцов ВВСТ.
4. Процесса снижения затрат на проведение ремонтных работ.
5. Не правильной организацией процесса закупки товаров (услуг).

Конечно, часть этой проблематики снимается при переходе предприятия к аутсерсингу или покупке машин в лизинг. Но не снимается главный вопрос — повышение эффективности бизнес-процессов.

В настоящее время ряд авторов уже занимались данной проблематикой, такие как: Квятковская И.Ю. и Френкель Н.Б. [1, с. 21-22], которые в своей работе выстроили модель, позволяющую с опорой на результат решать подобные задачи. Структурно описан комплекс задач обоснования, согласования, формирования, коррекции проектов Буренком В.М., Лавриновым Г.А., Хрусталевым Е.Ю. [2, с. 5–7]. Также заслуживает внимания удачная постановка задачи анализа эффективности эксплуатации технических средств, представленная Шефер В.Э., Шудыкиным А.С., Ядровской Н.В. [3, с. 78–79]. Решение задачи управления логистическими цепями поставок нефтепродуктов в условиях неопределенности продемонстрировано в статье Цимберова Д.М. и Кубачева С.К. [4, с. 21-22], где раскрывается методика, учитывающая вопросы сопровождения управленческих решений в условиях стохастичности.

Для решения подобных задач предлагается ввести термин — современный образец продукции машиностроения, это конкурентоспособный, серийно выпускаемый или модернизированный образец, основные технические характеристики которого не уступают характеристикам существующих отечественных и (или) зарубежных передовых аналогов.

Нам необходимо получить значения показателей анализируемой системы, которые будут характеризовать основные технические характеристики образца.

Таким образом условие задачи будет иметь вид (формула 1):

$$I\left(\prod_{\Pi\subset\Pi_G}\{r_1 + r_2 \ldots r_n\}\right)x = \max I(\Pi);\ R(I) \subset R_D \quad (1)$$

В данном выражении *I* (П) — весь массив информации, с которым необходимо работать. При этом как очень верно подмечено в работе Квятковской И.Ю. [5, с. 116–119] мы должны понимать, что данная задача имеет свою иерархическую структуру, которой в данном случае предлагается пренебречь, так как нас в настоящий момент интересует конкретная плоскость вопроса — это управленческие решения, направленные на то, чтобы все образцы были современными, то есть отвечали тем требованиям, которые мы прописали непосредственно в предлагаемом нами определении. При этом общие затраты ресурсов *R*(*I*) — должны соответствовать результатам анализа и значениям всех необходимых нам показателей основных технических характеристик образцов в целях того, чтобы образец мы считали современным (далее — показатели).

Также остро стоит вопрос, что из себя представляет множество ($П_G$), то есть варианты состава и значений показателей, которые мы применим для анализа (в том числе с учетом приоритетности, отраженном в бизнес-планировании).

В целях формализации рассматриваемых процессов разработана структурно-функциональная схема сопровождения управленческих решений по поддержанию технических характеристик продукции машиностроения на современном уровне (далее — структурно-функциональная схема) (рис. 1).

Основываясь на поставленной задаче, мы должны уточнить эти показатели. И данную работу возможно провести в пять этапов:

На первом этапе эксплуатации образца методом экспертного опроса необходимо понять объем необходимых для рассмотрения вопросов. Данная проблематика не должна быть оторвана от деятельности, в которую включен данный образец. Именно при создании технологических циклов использования продукции и обеспечения их ресурсами должны и выявляться узкие места в техническом состоянии того или иного образца.

На втором этапе должна осуществляться формализация недостатков и сведение их в массивы информации. На этом этапе важно задействовать всю систему управления процессом, но суть работы будет сводиться к единому пониманию проблем и целями решения соответствующих задач в возможно короткие сроки.

На третьем этапе всю разрозненную информацию необходимо проработать научными методами. В этой связи интересен опыт НПО «Искра» г. Пермь. Так в статье Белобродова С.М. и Цимберова Д.М. [6, 32–38] описывается технологический процесс, в который своевременно вносятся коррективы, основанные на опыте испытаний, ввода в строй и эксплуатации агрегатов.

Обобщенно на этом этапе необходимо: провести анализ выявленных недостатков, структурно свести факторы, влияющие на эксплуатацию и известные показатели, анализ которых позволит сделать дальнейшие выводы.

Научная организация разрабатывает формализованные бланки, которые бы позволили понять: в каких условиях работал тот или иной механизм, как часто он выходит из строя, другие особенности его эксплуатации. Также анализируется уже имеющаяся техническая документация.

Формализация процесса может быть организована с помощью программных средств. В настоящее время ряд предприятий занимается подобными разработками. Информационные решения многих предприятий позволяют наращивать автоматизированные базы данных и подсистемы управления производственным циклом, запасами, а также подсистему информационно-техни-

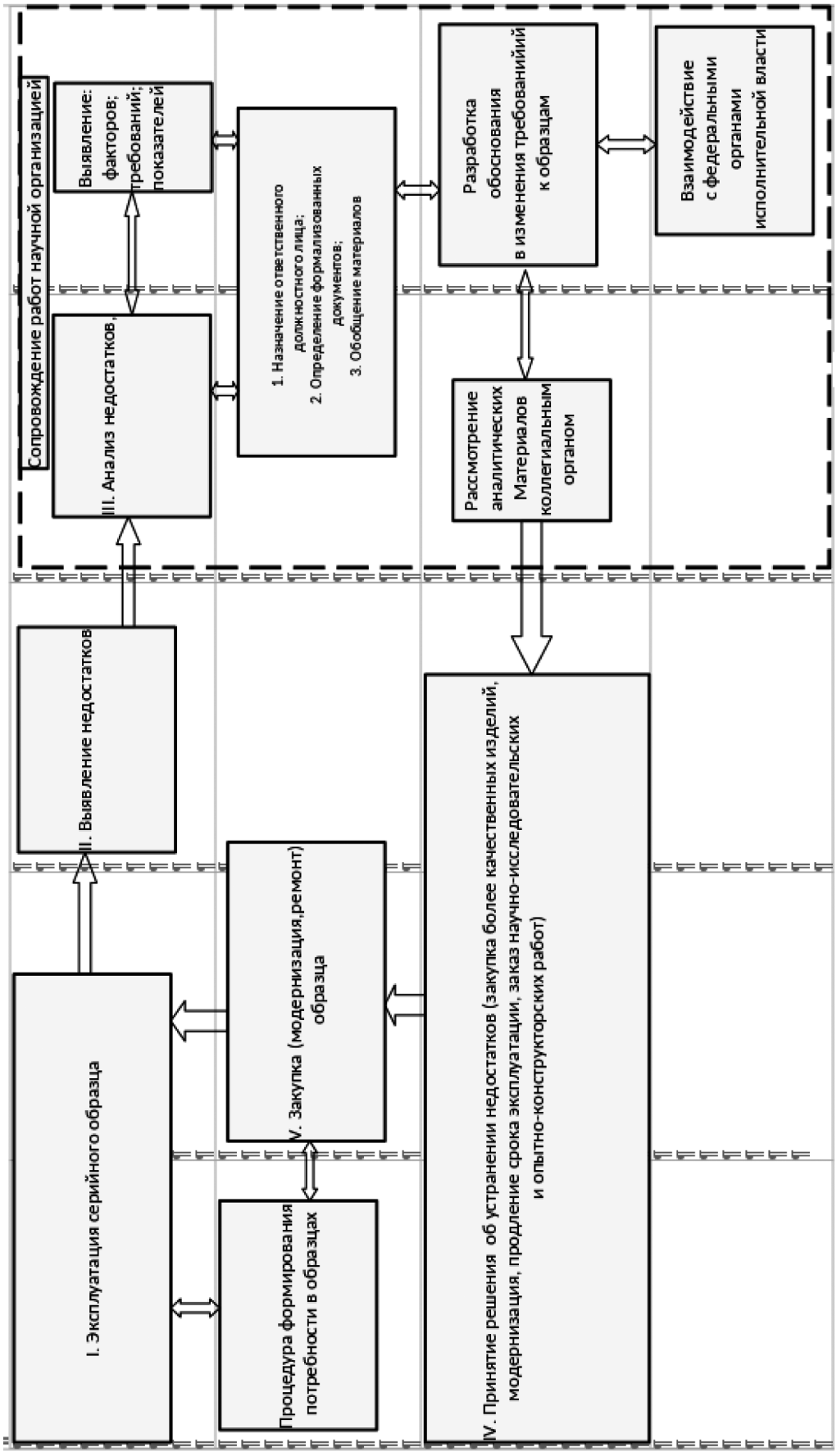


Рис. 1. Структурно-функциональная схема сопровождения управленческих решений по поддержанию технических характеристик продукции машиностроения на современном уровне

ческой поддержки. При необходимости определять потребность в технических средствах. Одним из основных требований, общим для всех производителей таких систем является работа в онлайн-режиме.

Все требования к показателям образцов должны быть научно-обоснованы, апробированы на практике и рассмотрены специалистами по необходимым направлениям деятельности.

Немаловажную роль в проводимой работе играет взаимодействие с контрольным органами различных федеральных органов исполнительной власти, экспертными советами различных научных сообществ, а при необходимости специалистами органов управления различных уровней, ответственных за определенный кластер экономики (федеральный, региональный).

На четвертом этапе при обеспечении поддержки принятия управленческих решений предлагается использовать подход, предусматривающий при определении уровня современности образца учет соотношения затрат и результатов.

В целом современность образца это дифференциальное свойство процесса его функционирования, которое предполагает адаптивность его к выполнению соответствующего бизнесс-планирования.

По мнению Лединфа Е.П и Алекса Е.А. [7, с 9–19] у предприятия стратегически должны быть спланированы инновации. Хотелось бы отметить, что инновации от изобретений отличаются в корне тем, что это внедренные изобретения, приносящие прибыль.

Внедряемые (модернизируемые) технические средства могут рассматриваться в соответствии с уровнем их современного состояния, соответствующие показатели $r_{(1-n)}$ (где r — свойства, такие как приоритетность внедрения, автоматизация, функциональность, ресурсоемкость и другие).

Также показатели должны иметь соответствующие весовые коэффициенты (x). К сожалению, для каждого конкретного случая они будут разные. Но их объединяет то, что они являются индикаторами важности того или иного свойства.

В конечном итоге решение должно быть принято исходя из совокупности проработки следующих вопросов:

- практической применимости;
- актуальности для бизнес-процессов;
- охвата всех сфер применения;
- уменьшения излишних технических свойств образца.

На пятом этапе при проведении закупок в крупных корпоративных организациях необходимо создать слаженную подсистему закупок. Интересен подход к обеспечению потребительских качеств соответствующего объекта исследования Скоробогатченко Д.А. [8, с. 40–42] с использованием нечетких нейронных сетей. Возможность их построения в нашем случае предлагается распределить по четырем направлениям (входным переменным значениям).

первый — постоянная работа по уточнению требований к образцам;

второй — мониторинг и отбор современных образцов, в том числе в ходе конгрессно-выставочных мероприятий;

третий — апробация отобранных образцов (как теоретическая, так и практическая);

четвертый — закупка образцов в соответствии с корпоративными правилами и существующими бизнес-процессами;

пятый — внутренних и внешний аудит по проверке системы управления рисками в части современности применяемых образцов.

Таким образом разработанная структурно-функциональная схема позволит продолжить решение задач, связанных с повышением эффективности эксплуатации продукции машиностроения, при осуществлении поддержки управленческих решений по использованию машиностроительной продукции по назначению. Она дает возможность проработать информационные связи между субъектами взаимодействия и снизить возможные издержки, как финансовые, в том числе связанные с управленческими решениями с учетом выстроенных приоритетов и упростит анализ эффективности применения схемы управления рисками при проведении аудита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Квятковская И.Ю. Френкель Н.Б. Обеспечение корпоративного взаимодействия субъектов распределенной информационной системы управления транспортными перевозками. [Текст] / Квятковская И.Ю. Френкель Н.Б. // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2005. — № 2 (25). — С. 21–22.
2. Буренок В.М., Лавринов Г.А., Хрусталев Е.Ю. Механизмы управления производством продукции военного назначения. [Текст] / Буренок В.М., Лавринов Г.А., Хрусталев Е.Ю. // — М.: Наука. — 2009. — 303с.
3. Шефер В.Э. Шудыкин А.С., Ядровская Н.В. Методика исследования параметров состояния объекта управления для анализа эффективности системы управления эксплуатацией вооружения и военной техники. [Текст] / Шефер В.Э. Шудыкин А.С., Ядровская Н.В. // — Омск.: Сборник материалов конференции «Транспортные средства специального назначения: разработка, производство, модернизация». — 2020. — С. 78–86.
4. Цимберов Д.М. Кубачев С.К. Особенности совершенствования системы нефтепродуктообеспечения в горных условиях. [Текст] / Цимберов Д.М. Кубачев С.К. // Устойчивое развитие горных территорий. — 2010. — № 4 (10). — С. 21–22.
5. Квятковская И.Ю. Линейное расслоение классов альтернатив с использованием логической формы функции выбора. [Текст] / Квятковская И.Ю. // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2007. — № 1 (36). — С. 116–119.
6. Белобородов С.М. Цимберов Д.М. Технологическое обеспечение устранения аварийных ситуаций валопроводов высокоскоростных газоперекачивающих агрегатов. [Текст] / Белобородов С.М. Цимберов Д.М. // Известия Тульского государственного технического университета. Технические науки. — 2016. — № 12–2. — С. 32–38.
7. Лединф Е.П., Алекса Е.А. Инновационное предпринимательство в современных тенденциях экономики. [Текст] / Лединф Е.П., Алекса Е.А. //Вестник Национального института бизнеса. — 2022. — № 2 (46). — С. 9–19.
8. Скоробогатченко Д.А. Моделирование изменения эксплуатационного изменения автомобильных дорог с учетом информации качественного характера. [Текст] / Скоробогатченко Д.А. // Промышленное и гражданское строительство. — 2011. — № 4. — С. 40–42.

© Цимберов Дмитрий Михайлович (katana647@ya.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.48

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ ТЕНИ ПРОИЗВОДСТВА В СРЕДЕ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦИЙ И ОБУЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПЕРСОНАЛА

DEVELOPMENT OF A DIGITAL SHADOW OF PRODUCTION IN A VIRTUAL REALITY ENVIRONMENT FOR DEMONSTRATIONS AND TRAINING OF PROCESS PERSONNEL

R. Chumak

Summary. The article discusses the development of a digital shadow of production in a virtual reality environment for demonstrations and training of technological personnel. The concept of a digital twin as a virtual model of a real production process is presented. The structure of interaction between the production process and the simulator, which includes data reading, control, and visualization modules, is described. The implementation of the system based on Unity using Blender and Fusion for creating models is presented.

Keywords: digital shadow, virtual reality, training, technological equipment.

Чумак Ростислав Русланович
Инженер, ФГАОУ ВО Московский государственный технологический университет «Станкин»
chumakrr@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается разработка цифровой тени производства в среде виртуальной реальности для демонстраций и обучения технологического персонала. Представлена концепция цифрового двойника как виртуальной модели реального производственного процесса. Описана структура взаимодействия производственного процесса с тренажером, включающая модули чтения данных, управления и визуализации. Приведена реализация системы на базе Unity с использованием Blender и Fusion для создания моделей.

Ключевые слова: цифровая тень, виртуальная реальность, обучение, технологическое оборудование.

Тренажеры в средах виртуальной реальности зарекомендовали себя, как эффективный инструмент для обучения техники безопасности на предприятиях. Они позволяют обучающемуся полностью погрузиться в процесс обучения, что способствует получению практических знаний и навыков на более высоком уровне: позволяют увидеть устройство оборудования принципы его работы и, кроме этого, обучающийся способен получить смежные навыки по технике безопасности (например, в случаях чрезвычайной ситуации или поломке оборудования) [1].

Основным преимуществом виртуальной реальности является эффективность обучения с полным погружением в процесс, уменьшение затрат и времени (в сравнении с тренажерами физическими) и возможность контроля уровня полученных знаний с помощью дополнительных сценариев: VR-тренажер может самостоятельно давать оценку обучающемуся. Предприятия, внедрившие такую технологию, добиваются значительного снижения числа производственных травм и их тяжести, повышения культуры безопасности на производстве [2].

Цифровой двойник — это виртуальная модель или точная копия реального объекта, процесса или системы, созданная на основе данных с использованием технологий Интернета вещей (IoT), искусственного интеллекта (ИИ) и анализа данных. Цифровой двойник — это детализированная и точная копия реального объекта или системы, которая может использоваться для мониторинга, анализа, прогнозирования и оптимизации производственных процессов и т.д. [3]. Основная концепция цифрового двойника заключается во взаимосвязи виртуальной среды и среды реальной: реальный объект при помощи датчиков и иных форм передачи данных передает их во внутреннюю среду цифрового двойника. Чаще всего необходимо передавать информацию о использовании или обслуживании. Благодаря этому цифровой двойник объекта способен стать актуальным «отражением» реального, которое способно визуализировать любые изменения, так как опирается на данные, которые получает от реального объекта. Дополнительно эти данные дополняются метаданными и документами по типу отчетов или инструкций, которые создаются на всех стадиях жизненного цикла [4].

При реализации тренажера производства необходимо, в первую очередь, определить его назначение. Всего можно выделить несколько вариантов реализации сценария реализации:

1) Демонстрация. В этом случае модель дополняется программой, которая связывает ее с реально существующим технологическим оборудованием или системой ЧПУ. В этом случае модель производства превращается в цифровую тень технологического оборудования, который будет переносить все воздействия на реально существующие станки на себя. Данный способ реализации позволяет изучить основные принципы работы, а при дополнительных настройках — обучить основам техники безопасности [5].
2) Симуляция. В этом случае модель дополняется программой, которая связывает ее с абстрактно существующим технологическим оборудованием или системой ЧПУ. В этом случае модель не привязана к реально существующему оборудованию и представляет из себя полноценный симулятор, который обучающийся может полностью контролировать без риска для себя и реально существующего оборудования, что позволит отточить навыки управления, использования и техники безопасности более глубоко.
3) Конструктор. В последнем случае модель не привязывается к оборудованию, но её основные элементы дополняются функцией захвата, благодаря чему будут доступны для детального изучения пользователем путем разборки и сборки. Данный вариант позволяет наиболее детально изучить устройство станка для углубленного понимания принципов работы.

Критерии к реализуемому тренажеру заключаются, в основном, в демонстрации работы технологического оборудования, в том числе и такого, как станки с системами ЧПУ. Следовательно, наиболее оптимальным сценарием разработки: режим демонстрации.

Далее необходимо создать 3D модели, совместимые по формату со средой разработки тренажера, придерживаясь основных свойств моделей:

1) Адекватность: отражение свойств оригинала (станка) с достаточной точностью. Модель должна отражать основные элементы оборудования, такие как привода и шпиндельные бабки. Подобные элементы должны быть наиболее детализированными и выполненными как отдельные. Такие элементами, как магазин инструментов с самими инструментами или корпус могут быть выполнены с меньшей детализацией кроме уникальных конструкций, для ускорения разработки [6].
2) Экономичность: затратность создания модели должна быть оптимально низкой. В случае создания компьютерной модели это будет означать время для её создания, так как физического воплощения нет.
3) Потенциальность: возможность получения новых знаний при изучении модели. В случае тренажера данный параметр будет являться показателем эффективности при обучении оператора.

В случае соблюдения данных «правил» разработанная модель станка будет обладать необходимым и достаточным потенциалом для эффективного обучения оператора.

Структурную схему взаимодействия производственного процесса с тренажером, в таком случае, можно представить следующим образом (см. рис. 1).

Структура состоит из нескольких основных элементов:

1) Производственный процесс, работающий независимо от тренажера. Взаимодействие с ним происходит через передачу данных: данные от оборудования различного спектра, уведомления и сигналы передаются через различные протоколы (OPC, MQTT) и в различных форматах (.json, .xml).
2) Модуль чтения и обработки данных. Основной функционал данного модуля заключается в отправке запросов в систему ЧПУ на получение данных, их обработка и дальнейшее хранение и отправка в другие модули. Кроме этого, модуль ответственен за вывод ошибок в случае отсутствия данных или некорректной их обработки. Является вспомогательным модулем и может быть активным или неактивным в зависимости от сценария обучения;
3) Модуль управления тренажером является основным связующим между всеми другими системами тренажера, включая VR-систему. В его функции входит система запуска, выбора режима и дополнительный модуль передачи данных, передающий полученные модулем чтения и обработки данные в другие модули;
4) Модуль визуализации выполняет роль связующего элемента с плагином VR и шлемом виртуальной реальности, позволяя пользователю использовать шлем для работы с тренажером. Кроме этого, в его функции входит система визуальных оповещений при работе со сценариями и система изменения параметров интерактивной модели в соответствии с полученными данными.
5) VR-оборудование выполняет роль монитора и контроллера: через шлем пользователь видит тренажер, а контроллеры позволяют ему взаимодействовать на него и получить реакцию на воздействие.

Тренажер реализуется программно в среде Unity, а модели — в средах Blender и Fusion. Такой выбор был сделан из-за наличия большой библиотеки документации для каждой среды и большого количества плагинов, позволяющих реализовать специфические функции

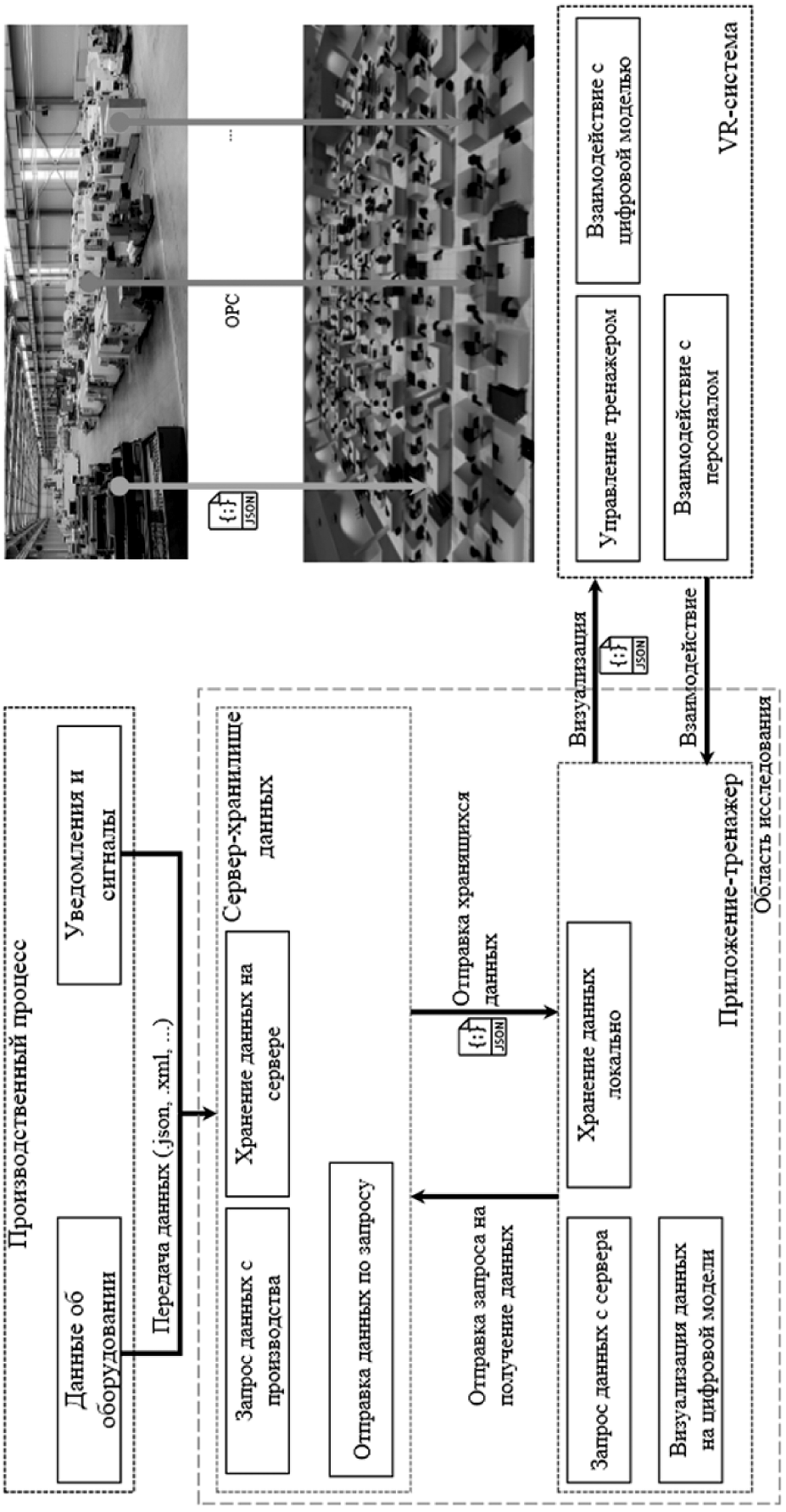


Рис. 1. Структурная схема взаимодействия производственного процесса с тренажером

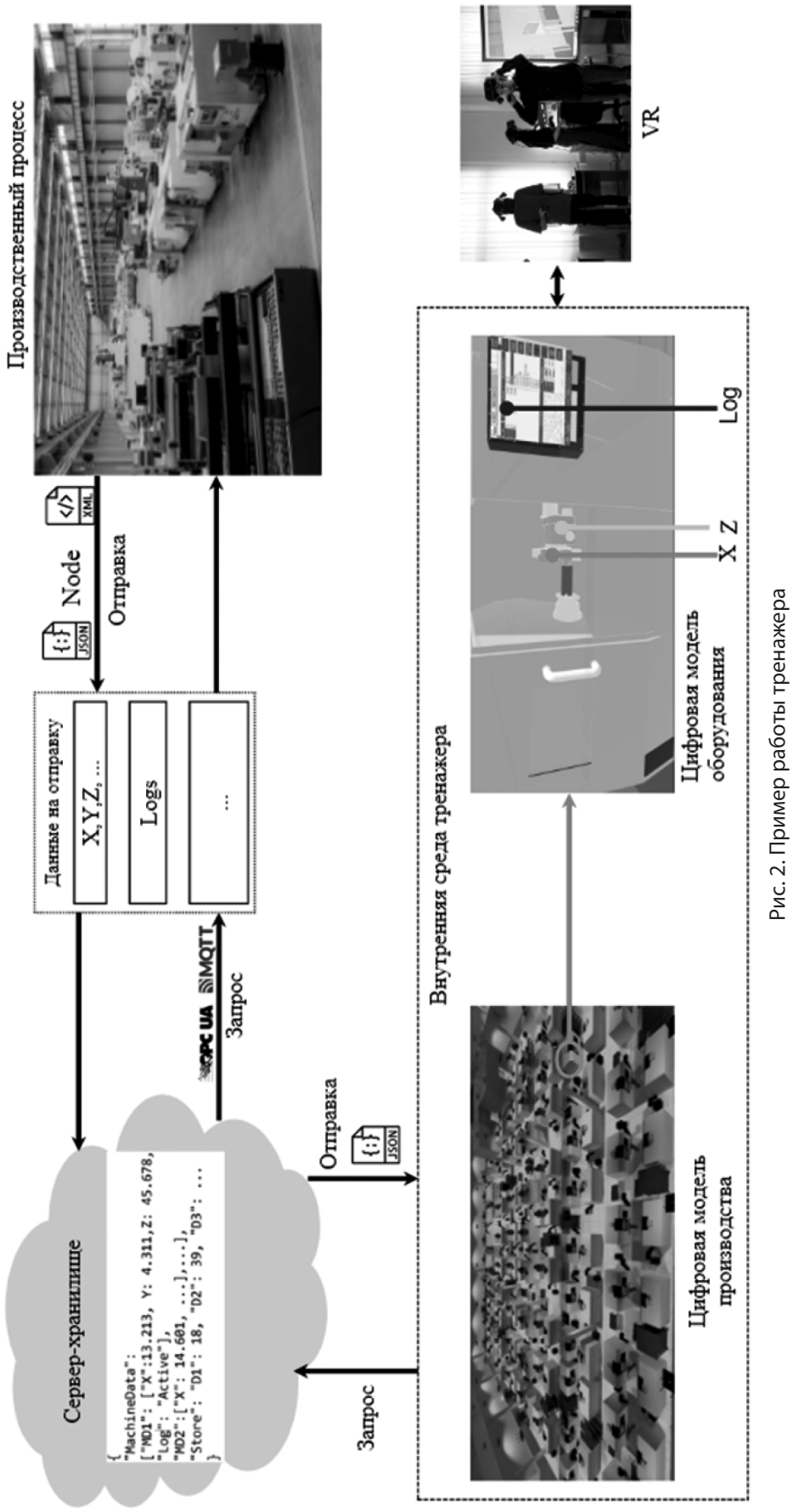


Рис. 2. Пример работы тренажера

модулей, такие как сбор и обработка данных из различных протоколов. Пример работ тренажера представлен на рисунке 2.

Работа тренажера начинается с момента включения. Он производит подключение к производственной сети и отправляет запросы на получение данных или подписку на их получение, после чего входит в состояние ожидания. При получении данных определяется их тип (с какого оборудования они были получены, какого они вида) и выполняется их обработка. Система проверяет корректность полученных данных и в случае отсутствии ошибок сохраняет для дальнейшей визуализации. При возникновении ошибок система генерирует соответствующие сообщения.

Заключение

Результаты работы могут служить основой для дальнейших исследований в области создания цифровых двойников производственных процессов, развития систем дополненной реальности для промышленности и совершенствования методов дистанционного обучения операторов технологического оборудования, а также могут быть использованы для создания систем мониторинга и анализа работы оборудования в режиме реального времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чумак Р.Р., Нежметдинов Р.А., Котырова Ш. — Структурная модель тренажеров для операторов технологического оборудования, Материалы XVI всероссийской конференции с международным участием. 2023, ст. 289–296
2. Чумак Р.Р., Ковалев И.А. — Анализ данных технологического оборудования как инструмент обучения операторов — Материалы XV всероссийской конференции с международным участием «Машиностроение: традиции и инновации (МТИ –2022)», ст. 319–324.
3. Digital Twin for Manufacturing Pragmatic Consideration (Part 11–12) [Electronic resource]. — Available at: https://blogs.3ds.com/ exalead/2019/07/25/digital-twin-for-manufacturing-pragmatic considerations-part-11-12/ (Accessed: 28.05.2020).
4. Чумак Р.Р., Нежметдинов Р.А., Карасев С.И. — Методика разработки тренажеров для подготовки операторов технологического оборудования в средах виртуальной реальности — Материалы XVII Всероссийской конференции с международным участием. Москва, 2024, ст. 317–324.
5. Чумак Р.Р., Нежметдинов Р.А., Нежметдинова Р.А., Никитин Д.В. — Подходы к реализации тренажеров для подготовки инженерных кадров с использованием технологии виртуальной реальности — журнал СТИН, ст.25–30.
6. Чумак Р.Р., Нежметдинов Р.А., Ненарокомов М.Д., Ковалев И.А. Использование интерактивных моделей технологического оборудования для обучения операторов в средах виртуальной реальности // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Гуманитарные науки. — 2024. — №10. — С. 151–154. DOI 10.37882/2223–2982.2024.10.41.

© Чумак Ростислав Русланович (chumakrr@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.49

ПОСТРОЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ СЕТЕВОГО СКАНИРОВАНИЯ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ С ФУНКЦИЯМИ СПАЙДЕРИНГА И КРАУЛИНГА

BUILDING A DISTRIBUTED WEB APPLICATION NETWORK SCANNING SYSTEM WITH SPIDERING AND CROWLING FUNCTIONS

G. Shipulin

Summary. The article is devoted to the consideration of issues related to the collection of information about the functioning of web applications in the framework of security assessment and penetration testing. The paper considered the main elements of the information collection process during penetration testing according to the OWASP Web Security Testing Guide web application penetration testing methodology, including the categories of data collected and aspects of their analysis for metadata, information about the components of the web application and the technology stack used. Based on the analysis of existing automated web scanning tools for web applications, their main limitations were identified (insufficient scanning coverage and completeness of data collection, mono tasking). The architecture of the developed distributed web application network scanning system with component-level spidering and crowling functions is described, and the results of its experimental launches are presented.

Keywords: penetration testing, OWASP, web application, network scanning, crawling, spidering, information collection, information security.

Шипулин Георгий Фаризович
Кандидат юридических наук, доцент, Российский технологический университет МИРЭА; Доцент, Московский Политехнический Университет
podumai_nad@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена рассмотрению вопросов, связанных со сбором информации о функционировании веб-приложений в рамках проведения оценки защищенности и тестирования на проникновение. В работе были рассмотрены основные элементы процесса сбора информации при тестировании на проникновения согласно методике тестирования на проникновение веб-приложений OWASP Web Security Testing Guide, включая категории собираемых данных и аспекты их анализа на предмет наличия метаданных, информации о компонентах веб-приложении и используемом стеке технологий. На основе анализа существующих автоматизированных средств сетевого сканирования веб-приложений были выявлены их основные ограничения (недостаточность охвата сканирования и полноты сбора данных, монозадачность). Описана архитектура разработанной распределенной системы сетевого сканирования веб-приложений с функциями спайдеринга и краулинга на уровне компонентов, а также представлены результаты ее экспериментальных запусков.

Ключевые слова: тестирование на проникновение, OWASP, веб-приложение, сетевое сканирование, краулинг, спайдеринг, сбор информации, информационная безопасность.

Ввиду повсеместной цифровизации общественных отношений и использования веб-приложений в качестве средства оказания услуг вопросы оценки состояния и обеспечения защищенности веб-приложений являются актуальными.

Одним из подходов к оценке безопасности веб-приложения является тестирование на проникновение, позволяющий обнаружить актуальные уязвимости до их эксплуатации злоумышленникам. Основной методикой тестирования на проникновение веб-приложений является OWASP Web Security Testing Guide, в котором отдельно выделяется этап сбора информации об исследуемой системе [1].

Сбор информации о веб-приложении включает: получение информации о структуре и конфигурации веб-приложения, версии и типе используемого веб-сервера; поиск файлов метаданных для выявления скрытых элементов; получение информации о компонентах исследуемого веб-приложения, их составе и версиях, а также контента веб-страниц и файлов JavaScript; составление карта веб-приложения.

В рамках данного этапа, с одной стороны, требуется получить максимальное количество информации в сжатые сроки, что требует применения множества разных программных инструментальных средств автоматизации процесса сбора и анализа данных [1, 2]. Опыт использования таких инструментальных средств позволил сделать выводы об ограниченности применения при решении задач (большинство утилит монозадачны) и возникающих неудобствах использования, к которым относятся: необходимость конфигурации; отсутствие

единого стандартизированного вывода данных; отсутствие распределения нагрузки на исследуемую систему; преимущественно не реализованы отказоустойчивость, а также модуль генерации UserAget-ов, используемые при активном сетевом взаимодействии с исследуемой системой.

Таким образом, ввиду использования разных инструментальных средств в рамках одного этапа по сбору информации об исследуемой системе, возникает потребность в применении программного инструментального средства с реализованным функционалом, обеспечивающим решение большинства задач данного этапа [3].

Целями построения системы сетевого сканирования с функциями спайдеринга и краулинга являются сокращение времени на сбор информации об исследуемой системе и повышение качества выполнения данных процедур, выражающееся в большем количестве собираемой информации, необходимой для дальнейшей оценки защищенности и выполнения тестирования на проникновение исследуемого веб-приложения.

В связи с этим были сформированы функциональные характеристики, которые должны быть реализованы в системе сетевого сканирования веб-приложений с функциями спайдеринга и краулинга:

- составление «карты» веб-приложения (определение его структуры);
- определение базовой операционной системы, под управлением которой работает сервер, типа веб-сервера, компонентов веб-приложения, запущенных на веб-сервере, наличия и типа WAF, типа CMS, разрешенных HTTP-методов;
- поиск и загрузка пользовательских файловых вложений, а также доступных файлов веб-приложения прошлых или тестовых версий;
- агрегация и нормализация данных;
- распределение нагрузки и отказоустойчивости при работе системы;
- подстановка UserAgent-ов в тела запросов при активном сетевом взаимодействии с исследуемой системой.

Для достижения поставленных целей и задач была выбрана архитектура распределенной системы, основанная на модели Master-Worker [4], которая позволяет обеспечить выполнение определенного функционала по сбору и анализу данных.

Таким образом, система состоит из двух основных видов компонент: Master-контроллера и Worker-узлов, которых может быть несколько. При этом для взаимодействия оператора с системой был реализован интерфейс в виде отдельного сервиса для управления Master-контроллером, а для обеспечения взаимодействия между Master-контроллером и Worker-узлами, включая асинхронное распределение задач с контролем их выполнения — служебный интерфейс, реализованный с помощью библиотеки multiprocessing языка программирования Python.

При программной реализации описанной архитектуры системы использовался интерпретируемый язык программирования Python ввиду большого количества библиотек и фреймворков, реализующих поиск и обработку веб-страниц.

Интерфейс управления Master-контроллером реализован с помощью фреймворка Flask [5] языка программирования Python через который осуществляется: запуск сканирования (POST /scan); запрос статуса выполнения задания с возможностью его принудительного завершения, остановки и возобновления (GET /scan/<id>/progress); просмотр итогового отчета о выполненном задании с опцией его выгрузки в виде файла в JSON-формате (GET /scan/<id>).

Запуск сканирования осуществляется с указанием целевого домена для сканирования (параметр domain), ограничений по максимальной глубине обхода (параметр max_depth), числа сканируемых страниц (параметр max_pages), общего времени работы над задачей (параметр timeout) и максимального времени выполнения одного запроса (параметр request_timeout), а также количества Worker-узлов, которые будут осуществлять выполнение задачи (параметр workers). Данные параметры передаются Master-контроллеру.

Примеры запуска сканирования и отслеживания его процесса выполнения через интерфейс управления представлены на рисунке 1 и рисунке 2.

Master-контроллер, отвечающий за управление всем процессом сканирования и анализа, включает:

- модуль управления очередью URL (URL Frontier), реализующий алгоритм «поиска в ширину»;
- модуль диспетчеризации задач, который распределяет URL-адреса по свободным Worker-узлам;
- модуль агрегации, который собирает данные о веб-страницах, поступающие от Worker-узлов;
- модуль анализа, отвечающий за определение базовой операционной системы под управлением которой работает сервер, типа веб-сервера, компонентов веб-приложения, запущенных на веб-сервере, наличия и типа WAF, типа CMS, разрешенных HTTP-методов.

На основе анализа порядка заголовков в теле HTTP-ответа веб-приложения и их содержимого, структуры каталогов веб-приложения, файла robots.txt и пр. возможно определение ряда технических характеристик

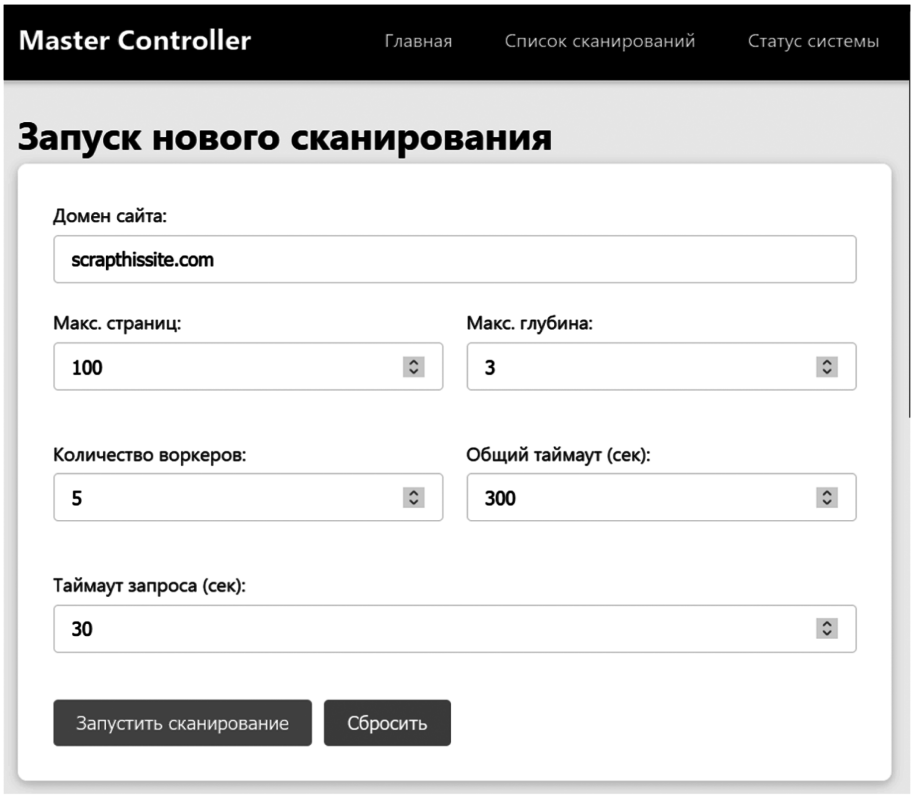


Рис. 1. Настройка параметров сканирования и его запуск (источник: разработка автора)

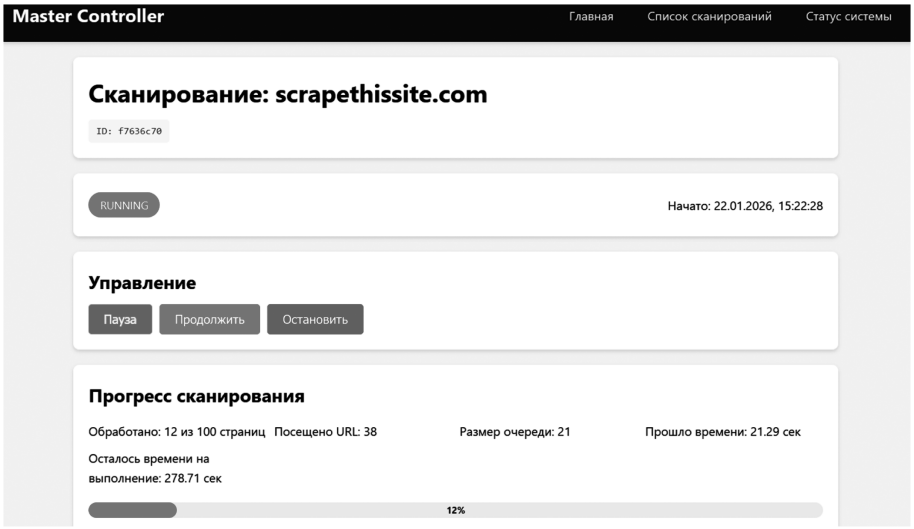


Рис. 2. Окно процесса сканирования (источник: разработка автора)

и параметров веб-приложения. Например, тип и версию CMS можно определить путём анализа структуры каталогов, которую каждая CMS выстраивает самостоятельно, или чтением файла robots.txt, в котором перечислен перечень разрешенных к индексированию веб-страниц поисковым системам. Также тип веб-сервера и базовую операционную систему, наличие WAF можно определить исходя из порядка заголовков в теле HTTP-ответа и его содержимого [1,6,7].

- модуль краулинга, отвечающий за загрузку доступных файлов, размещенных в веб-приложении. Загрузка файлов происходит на основе списка уникальных URL-путей к файлам, сформированного путем обработки (объединения, фильтрации, устранения дубликатов) списков путей к файлам, полученных от Worker-узлов.

Для контроля выполнения задач и отслеживания состояния очереди используются механизмы таймаутов (модуля multiprocessing), а через REST API-шлюз выполняется получение команд от оператора и отправка результатов выполнения задачи в JSON-формате.

Каждый Worker-узел реализует конвейер обработки одного URL-адреса, его работа состоит в: получении за-

дачи от Master-контроллера; создании объекта requests. Session() модуля requests языка программирования Python для установки значений заголовков User-Agent, используемых для эмуляции разных устройств при помощи функции setup_session() и установки таймаута выполнения запроса (request_timeout); выполнении сетевого запроса к целевому URL-адресу используя реализованную функцию process_url() и ранее созданный объект requests.Session().

После выполнения запроса к веб-странице по заданному URL-адресу с помощью метода get объекта requests. Session (), ответ сервера инкапсулируется в объект response, осуществляется определение MIME-типа по заголовку Content-Type при помощи реализованных функций detect_content_type_by_header () и get_resource_type (), а также проверка кода состояния HTTP-ответа при помощи метода raise_for_status () объекта response.

Для HTML-страниц посредством функций библиотеки BeautifulSoup языка программирования Python извлекаются все гиперссылки (теги <a href=...>) с последующей их нормализацией и группированием на внутренние и внешние [8,9].

В случае обнаружения текстовых файлов, файлов исходных кодов приложения (файлы административной панели, отладочных файлы, скрытые копии или прошлые версии), а также архивов, журналов событий, то информация об их месторасположении (полном пути в каталоге веб-приложения) передается модулю краулинга Master-контроллера.

В результате обработки ответа веб-приложения создается структурированный словарь (набор данных вида: «ключ»: «значение») с метаданными, который отправляется Master-контроллеру.

Каждый Worker-узел взаимодействует независимо с Master-контроллером, получая задачи и возвращая результаты, что обеспечивает разделение задач и отказоустойчивость системы.

Для проверки работоспособности реализованной системы и целесообразности выбора распределенной архитектуры была проведена серия сканирований разрешенного к тестированию публичного веб-приложения с доменным именем «scrapethissite.com», предназначенного прежде всего для тестирования систем спайдеринга и скрапинга.

В первом сканировании использовался общедоступный инструмент webscraper.io. в SaaS, во втором и третьем — использовалась разработанная система с одним и пятью активными Workers-узлами соответственно с заданием следующих количественных параметров сканирования: глубина сканирования (max_depth) — 3, максимальное количество сканируемых страниц (max_pages) — 38, максимальное время выполнения задачи (timeout) –100 секунд, максимальное время выполнения одного запроса (request_timeout) — 15 секунд. Результаты контрольных сканирований представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Сравнительный анализ результатов проведенных сканирований

Метрика	Первое сканирование	Второе сканирование	Третье сканирование
Количество обработанных страниц	17	38	38
Количество посещенных уникальных URL-адресов	17	38	38
Общее время сканирования, сек.	58.12	61.47	17.12
Скорость обработки, стр./сек.	3.41	0.62	2.22
Количество найденных URL-ссылок	35	1454	1454
Количество страниц с ошибками (HTTP 4xx)	3	2	2

Источник: разработано автором.

Проведенный эксперимент наглядно демонстрируют эффективность разработанной системы. Созданная система при работе в однопоточном режиме (с одним активным Worker-узлом) обеспечила полный обход целевого ресурса (38 страниц, 1454 ссылки), но с меньшей скоростью обработки веб-страниц (0.62 стр./сек.) по сравнению с инструментом, примененном при первом сканировании. Ключевым результатом является существенное увеличение количества обрабатываемых запросов при масштабировании, поскольку использование пяти активных Worker-узлов позволило увеличить скорость обработки в 3.6 раза (до 2.22 стр./сек.), сократив общее время сканирования с 61.47 до 17.12 секунд.

Дополнительно, помимо составления карты веб-приложения было определено, что сканируемое веб-приложение использует базу данных PostgreSQL, запущено на веб-сервере Apache под управлением операционной системы Ubuntu Linux; не использует WAF; в качестве CMS используется WordPress. Таким образом, дополнительный функционал разработанной системы, позволяющий собрать большую часть требуемой информации об исследуемом веб-приложении, определяет ее преимущества применения.

Подводя итог, были рассмотрены основные элементы сбора информации о работе и конфигурации

веб-приложения в рамках проведения тестирования на проникновение, описаны архитектура и функционал разработанной системы сетевого сканирования с функциями спайдеринга и краулинга, включая определение: структуры веб-приложения, типа веб-сервера, компонентов веб-приложения, наличия и типа WAF, типа CMS, разрешенных HTTP-методов, поиска и выгрузки пользовательских файлов, агрегации и нормализации полученных данных. Дополнительными реализованными функциональными возможностями системы являются подстановка разных UserAgent-ов в телах запросов при активном сетевом взаимодействии с исследуемым веб-приложением, а также распределение задач между Worker-узлами. Использование данной системы целесообразно в первую очередь для организаций, выполняющих регулярную внутреннюю оценку защищенности и тестирование на проникновение веб-приложений.

ЛИТЕРАТУРА

1. OWASP Web Security Testing Guide // GitHub URL: https://github.com/OWASP/wstg?tab=readme-ov-file (дата обращения: 12.01.2026).
2. Web tools, или с чего начать пентестеру? // Habr URL: https://habr.com/ru/companies/dsec/articles/452836/ дата обращения: 12.01.2026).
3. Шипулин Г.Ф., Приймак А.Е. Использование техник спайдеринга и скрапинга при оценке состояния защищенности веб-приложений // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. — 2024. — №11. — С. 185–187. DOI 10.37882/2223–2966.2024.11.45.
4. Bogutskii A. Architecture of high-load distributed systems: the case of a web crawler / A. Bogutskii // Cold Science. — 2025. — No. 19. — P. 41–52.
5. Developing RESTful APIs with Python and Flask // Auth0 URL: https://auth0.com/blog/developing-restful-apis-with-python-and-flask/ (дата обращения: 12.01.2026).
6. Как рассказать о сайте поисковой системе // Habr URL: https://habr.com/ru/articles/761068/?ysclid=mkohqzqume110667024 (дата обращения: 12.01.2026).
7. Прессуем WordPress // Habr URL: https://habr.com/ru/articles/728294/?ysclid=mkohsc3e9l453188086 (дата обращения: 12.01.2026).
8. Beautiful Soup Tutorial — How to Parse Web Data with Python // Oxylabs URL: https://oxylabs.io/blog/beautiful-soup-parsing-tutorial (дата обращения: 12.01.2026).
9. Печников А.А. Адаптивный краулер для поиска и сбора внешних гиперссылок / А.А. Печников, Д.И. Чернобровкин // Управление большими системами: сборник трудов. — 2012. — № 36. — С. 301–315.

© Шипулин Георгий Фаризович (podumai_nad@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.01

БЕТА БЛОКАТОРЫ И ОСТРАЯ ДЕКОМПЕНСАЦИЯ СЕРДЕЧНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТИ: ЭФФЕКТЫ ОТМЕНЫ, ЛЕЧЕБНАЯ ТАКТИКА

BETA-BLOCKERS AND ACUTE DECOMPENSATION OF HEART FAILURE: WITHDRAWAL EFFECTS, TREATMENT STRATEGY

N. Barkhatova
E. Barkhatova

Summary. Beta-blockers are used as part of the combination therapy for chronic heart failure. However, with the development of acute cardiac decompensation, discontinuation of these medications becomes necessary. This is accompanied by several clinically significant effects that can complicate the course and outcome of this pathology. A meta-analysis of the effects of beta-blocker discontinuation in acute decompensated heart failure was conducted based on the results of 2,142 clinical cases. The observed effects of beta-blocker discontinuation in ADHF, such as an increase in complications and the risk of mortality, indicate the need to maintain them in the combination treatment of this pathology and determine the need to resume beta-blocker therapy as soon as possible after the elimination of contraindications. The factors identified during the data analysis that reduce the risk of developing an adverse outcome in ADHF after beta-blocker discontinuation require the attention of clinicians and open opportunities for further scientific research.

Keywords: acute decompensated heart failure, beta-blocker discontinuation.

Бархатова Наталия Анатольевна
доктор медицинских наук, профессор, Южно-Уральский государственный медицинский университет, г. Челябинск
barhatova.2020@mail.ru
Бархатова Екатерина Игоревна
Южно-Уральский государственный медицинский университет, г. Челябинск
barhatova_katya_75@mail.ru

Аннотация. Применение бета блокаторов является частью комплексной терапии хронической сердечной недостаточности, но при развитии острой декомпенсации сердечной деятельности возникает необходимость отмены данных препаратов, что сопровождается рядом клинически значимых эффектов, которые могут осложнять течение и исход при данной патологии. Метаанализ эффектов отмены бета блокаторов при острой декомпенсации сердечной недостаточности проведён по результатам 2142 клинических случаев. Полученные эффекты отмены бета блокаторов при ОДСН в виде роста осложнений и риска летальности, указывают на необходимость их сохранения в комплексном лечении данной патологии и определяют необходимость возобновления терапии ББ в ранние сроки после устранения противопоказаний. Выявленные в ходе анализа данных факторы, снижающие риск развития неблагоприятного исхода ОДСН при отмене ББ требуют внимания клиницистов и открывают возможности для дальнейших научных исследований.

Ключевые слова: острая декомпенсация сердечной недостаточности, отмена бета блокаторов.

Бета блокаторы (ББ) являются одним из базовых компонентов комплексной терапии хронической сердечной недостаточности (ХСН), которые оказывают положительное влияние на течение и прогноз патологии [2, 6, 8]. В стадии острой декомпенсации ХСН (ОДХСН) наличие гипотонии, брадикардии, нестабильность и нарушения гемодинамики нередко требуют коррекции дозы или отмены бета блокаторов. Следующее за этим восстановление активности адренорецепторов в условиях декомпенсации кровообращения повышает эффекты воздействия эндогенных и экзогенных адренергических средств, что открывает возможности для применения инотропных средств, но в тоже время сопровождается рядом реакций и осложнений, которые оказывают неблагоприятное влияние на течение, прогноз и исходы данной патологии [3, 4, 10, 15]. За последние 25–30 лет практического использования ББ проведена серия исследований их фармакологических свойств и клинических эффектов, и накоплен достаточный опыт их практического использования при сердечно — сосудистой патологии [5, 6, 9, 12]. В ряде случаев публикации отражают клинические эффекты и последствия их отмены, и среди таких работ небольшая доля рандомизированных или регистровых исследований, но чаще имеют место результаты когортных исследований, которые описывают отдельные осложнения и эффекты отмены этих средств.

Сохраняющиеся сложности принятия тактических решений в ургентных ситуациях поддерживают актуальность изучения спектра осложнений при отмене ББ и систематизации современных подходов к решению практических вопросов лечения данной категории больных.

Цель исследования — провести метаанализ опубликованных результатов лечения, определить спектр

последствий отмены бета блокаторов при острой декомпенсации сердечной недостаточности и оценить степень их влияния на течение и исход данной патологии

Материалы и методы исследования

Для проведения сравнительного анализа опубликованных данных по теме исследования был произведён поиск статей с помощью информационных ресурсов PubMed, elibrary.ru, cyberleninka.ru за последние 25 лет. Включение публикаций в метаанализ проведено в соответствии с предпочтительными пунктами отчётности для систематических обзоров и метаанализов PRISMA. Из первоначально найденных 75 статей, посвящённых теме исследования, после сравнительной оценки для анализа были отобраны работы, основанные на данных 1 регистра и 1 нерандомизированного когорного исследования, а именно регистра EAHFE (2007-2014), вошедшего в исследование BETAWIN-AHF (n=1990) и одноцентрового нерандомизированного проспективного когортного исследования ОДСН на фоне инфекции COVID-19 (ФМЦ г. Мадрид , 2020) (n=3080, ОДСН n=152) [7, 11, 14]. Следует отметить, что некую сложность сравнения данных создало сочетание ОДСН с инфекцией COVID-19, но наличие первичных данных пациентов, диагностика ХСН по уровню NT-proBNP, предшествующая терапия ББ, детальная регистрация осложнений при их отмене, стали основанием для включения материала в метаанализ данных. При отборе статей и проведении метаанализа придерживались критериев PICOS.

Критерии включения: пациенты старше 18 лет с острой декомпенсации хронической сердечной недостаточностью (ОДХСН) III–IV степени, получающие ранее и на момент госпитализации терапию бета блокаторами (ББ), находящиеся в отделении неотложной помощи и интенсивной терапии. **Критерии исключения:** пациенты младше 18 лет, больные имеющие ОДСН de novo (ОДОСН), пациенты с ХСН I–II степени, не получающие ранее и на момент госпитализации ББ. **Вмешательство.** Отмена бета блокаторов (ББО) по клиническим показаниям или временный перерыв в проведении терапии ББ на фоне ОДХСН. **Результат.** Клинические эффекты отмены ББ, отмеченные в ходе лечения ОДХСН, результаты летальности и смертность в ходе госпитализации и в отдалённых периодах наблюдения. **Дизайн исследования.** Формирование групп сравнения по опубликованным данным и статистический анализ результатов.

Проведённый сравнительный анализ избранных данных включал формирование парных групп двух исследований в зависимости от наличия (ББТ) или отмены (ББО) терапии ББ с расчётом объединённой оценки доли (Mo%) признака для каждой сформированной пары и его 95 % ДИ, с определением уровня значимости различий показателя (p) с помощью расчёта критерия хи квадрат для относительных величин и критерия Стъюдента для абсолютных показателей. Также проведён сравнительный анализ и определение достоверности различий (p) объединённых оценок долей групп в зависимости от варианта проводимой терапии ББ с расчётом относительных рисков (ОР с 95 %ДИ) для определения факторов, влияющих на течение и исход ОДСН. При расчёте средних значений, относительных величин, статистических показателей (Mo%, 95 %ДИ), критериев (хи квадрат, Стъюдент) и значений относительного риска (ОР) использовали пакет программ Microsoft Office Excel для Microsoft Window XP. Уровень достоверности различий показателей был принят менее 0,05.

Результаты и обсуждение

На первом этапе исследований были изучены исходные данные регистра EAHFE (группы ББТ/ББО-14) [11] и проспективного нерандомизированного когортного исследования, ФМЦ г. Мадрид (2020) (группы ББТ/ББО-20) [14]. Учитывая разное количество больных в группах сравнения, наличие не только схожести, но и достоверной разницы параметров, для проведения метаанализа, подгруппы исследований были сохранены и распределены попарно в зависимости от отмены (ББО-14, ББО-20) и продолженной терапии ББ (ББТ-14, ББТ-20). Для сравнения групп произведён расчёт объединённой оценки доли (Mo%) каждого параметра, определён 95 % ДИ и оценка уровня значимости различий показателей (p) по критерию хи квадрат.

При анализе полученных объединённых оценок абсолютных значений клинико-лабораторных показателей были получены следующие результаты (рис. 1).

Отмечена достоверная разница уровня фракции выброса левого желудочка ($ФВ_{ББО}$=15±5,7 % и $ФВ_{ББТ}$=25±13,2 %), частоты дыхания ($ЧДД_{ББО}$=30±7,8 и $ЧДД_{ББТ}$ =26±3,7 в минуту), уровня систолического артериального давления ($САД_{ББО}$=123±9,6 и $САД_{ББТ}$=136±11,3 мм рт ст,), содержания гемоглобина ($Нв_{ББО}$=114±11,2 и $Нв_{ББТ}$=129±6,7 г/л), креатинина ($Креат_{ББО}$=1,26±0,16 и $Креат_{ББО}$=1,49±0,22 мг/дл), натрия ($Na_{ББО}$=135±5,7 и $Na_{ББТ}$=141±4,9 ммоль/л) и калия ($К_{ББО}$=5,1±1,9 и $К_{ББТ}$=4,6±1,1 ммоль/л) крови (p<0,05).

При статистическом анализе объединённых оценок долей параметров (Mo%) в группе отмены ББ была выявлен достоверный рост частоты встречаемости исходной фибрилляции предсердий ($Mo_{ББО}$=0,55 95 %ДИ 0,38–0,72 и $Mo_{ББТ}$=0,31 95 %ДИ 0,18–0,44), снижения ФВ ЛЖ ($Mo_{ББО}$=0,62 95 % ДИ 0,51–0,83 и $Mo_{ББТ}$=0,52 95 % ДИ 0,45–0,67), частоты госпитализаций ($Mo_{ББО}$=0,73 95 % ДИ 0,48–0,98 и $Mo_{ББТ}$=0,83 95 % ДИ 0,62–1,04) (p<0,05).

Также при сравнении имеющихся данных, отмена ББ сопровождалась достоверным ростом доли возникших

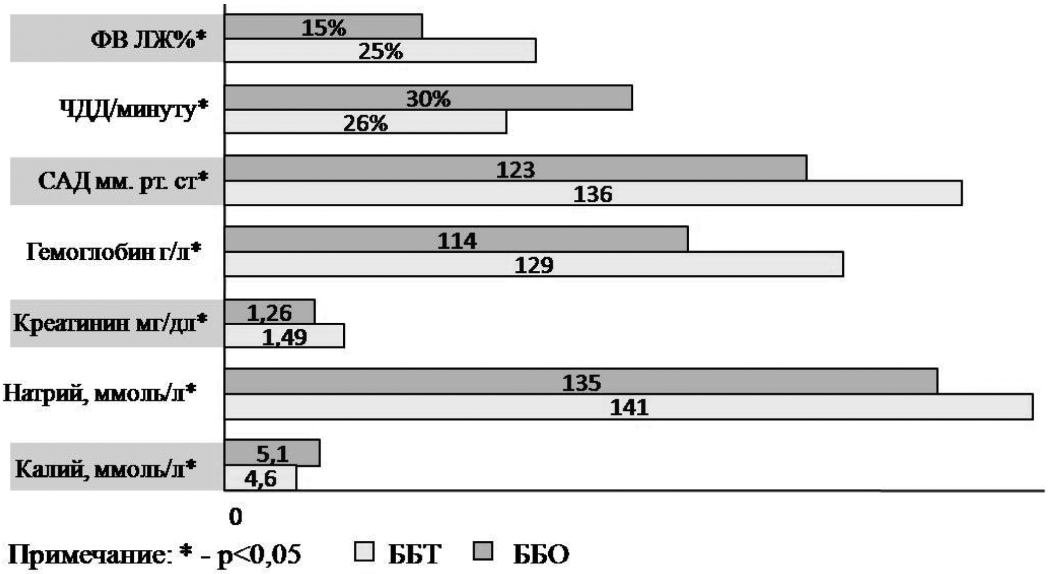


Рис. 1. Сопоставление основных клинико-лабораторных показателей групп сравнения с отменой (ББО) и продолженной терапией ББ (ББТ)

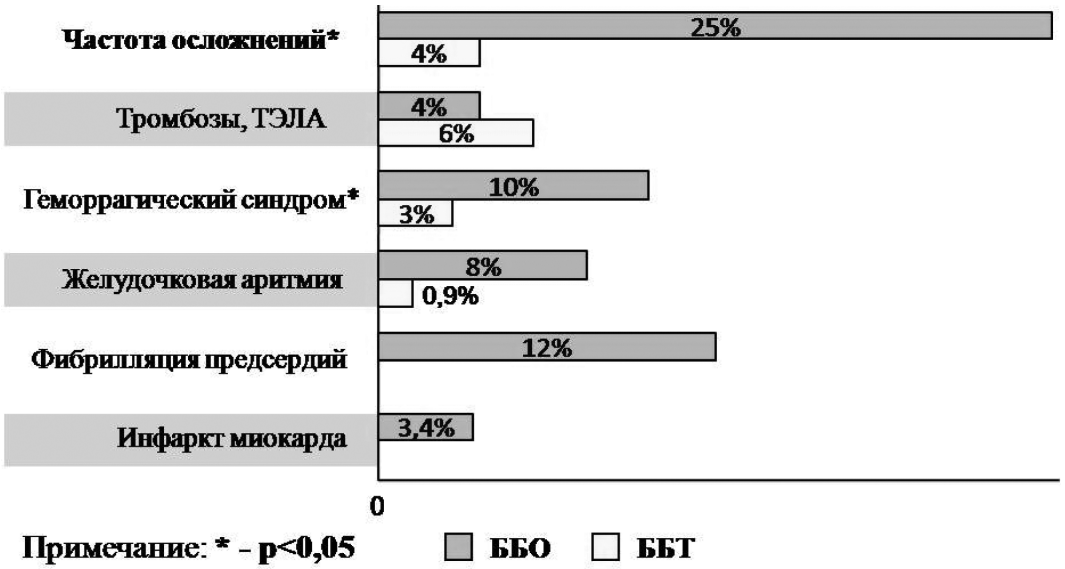


Рис. 2. Частота встречаемости и осложнения при ОДСН на фоне продолженной терапии (ББТ) и отмены бета блокаторов (ББО)

в ходе лечения ОДСН осложнений ($Мо_{ББО}$=0,25* 95 % ДИ 0,11–0,39 и $Мо_{ББТ}$=0,04 95 % ДИ 0,01–0,09) (p <0,05). Согласно полученным результатам спектр осложнений был шире при отмене ББ и включал тромбозы ($Мо_{ББО}$=0,04 95 % ДИ 0,01–0,07 и $Мо_{ББТ}$=0,06), геморрагический синдром ($Мо_{ББО}$=0,103 и $Мо_{ББТ}$=0,03* 95 % ДИ 0,01–0,05), желудочковую аритмию ($Мо_{ББО}$=0,08* 95 % ДИ 0,008–0,15 и $Мо_{ББТ}$=0,09), фибрилляцию предсердий ($Мо_{ББО}$=0,12* 95 % ДИ 0,03–0,21) и развитие инфаркта миокарда ($М_{ББО}$=0,034) (p*<0,05). Среди осложнений на фоне продолжения терапии ББ были отмечены тромбозы (0,6%), геморрагический синдром ($Мо_{ББТ}$=0,03* 95 % ДИ 0,01–0,05) и желудочковая аритмия (0,9 %) (p*<0,05) (рис. 2).

При сравнении результатов лечения летальность при отмене ББ была достоверно выше (ОР-0,13 95 %ДИ 0,01–0,21), а при продолжении терапии ББ ОР составил 0,06 (95 % ДИ 0,004–0,12) (p <0,05) (рис. 3).

Показатели внутрибольничной смертности ($ОР_{ББО}$ 0,12 (95 % ДИ 0,01–0,17) и $ОР_{ББТ}$ 0,05 (95 % ДИ 0,011–0,15)), 30-дневной смертности ($ОР_{ББО}$-0,13 (95 % ДИ 0,01–0,21), и $ОР_{ББТ}$-0,06 (95 % ДИ 0,004–0,12)) и частота длительной госпитализации (более 10 суток) ($ОР_{ББО}$ 0,37 (95 % ДИ 0,11–0,57) и $ОР_{ББТ}$ 0,26 (95 % ДИ 0,17–0,45)) в группе отмены ББ были достоверно выше уровня относительного риска при сохранении терапии ББ (p<0,05). При этом следует отметить, что показатели однородных групп с ОДСН (ББТ 14–20 и ББО 14–20) при наличии инфекции

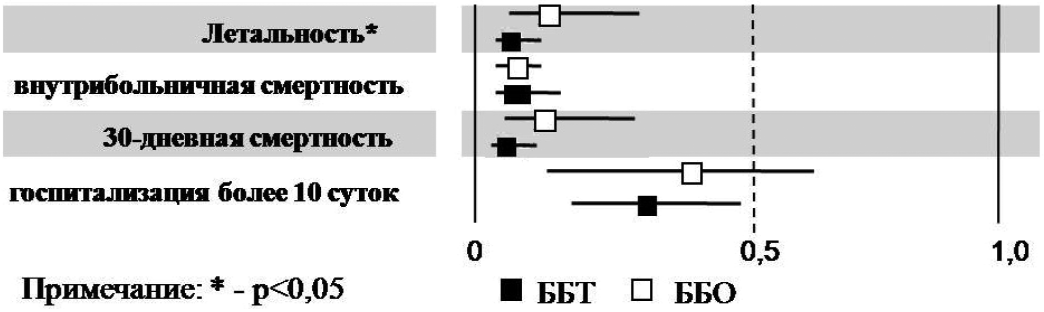


Рис. 3. Результаты лечения больных с ОДСН после выписки из стационара с отменой (ББО) или сохранением терапии ББ (ББТ)

COVID-19 имели статистически достоверную разницу с показателями группы с ОДСН без вирусной инфекции, а также достоверно отличались в зависимости от сохранения или отмены ББ в комплексной терапии. Это говорит о наличии влияния отмены ББ на рост сроков госпитализации и показатели летальности и смертности при ОДСН.

Для выявления эффектов и определения характера взаимосвязи между отменой бета блокаторов, риском осложнений или неблагоприятным исходом, был произведен статистический анализ и сравнение полученных объединённых оценок доли в зависимости от варианта проводимой терапии. При анализе данных большая часть клинических параметров, характеризующих группы, при сравнении их объединённых оценок долей при отмене бета блокаторов (ББО) достоверно отличались от группы сравнения (ББТ) (табл. 1).

Таблица 1.

Анализ объединённых оценок доли параметров групп сравнения с ОДСН с разными вариантами применения бета блокаторов

Параметры	Объединённая оценка доли показателя в группах _Mo%		ОР	95 %ДИ
	ББТ 14_20 (n=624)	ББО 14_20 (n=1518)		
1	2	3	5	6
доля женщин	54	54,3	1,17	1,16–1,18
сопутствующая патология				
гипертония	89,3	88,3	1,11	1,1–1,12
сахарный диабет	49,7	48,8	1,04	1,03–1,05
дислипидемия	49	51,4	1,1	1,09–1,11
ИМ_ПИК	1,6	0,6	0,89	0,88–0,9
ИБС	33,2	33	0,99	0,98–0,993
фибрилляция предсердий	31,1	55,1*	2,72	2,65–2,79
ХБП	23,9	30	1,36	1,34–1,38
ХНМК	13,3	15,7	1,21	1,1–1,23
ХОБЛ	18,6	19,8	1,08	1,07–1,09
ОАСНК	11,5	12,8	1,13	1,12–1,14
исходный статус				
класс III–IV NYHA (%)	27,7	29,7	1,1	1,09–1,11
снижение ФВ	58	61,7	1,17	1,16–1,18
ФВЛЖ	25±3,4	19, ±5,3		
Лечение до госпитализации				
ББ	93,4	98,6	4,98	4,8–5,1
Петлевые диуретики	82	83,7	1,13	1,12–1,14
Тиазидные диуретики	3,8	11,7*	3,35	3,26–3,44
блокаторы рецепторов альдостерона	27,7	24,6	0,85	0,84–0,86
иАПФ	40,5	41	1,02	1,01–1,03
АРА2	26	27	1,05	1,04–1,06
блокаторы Са каналов	21,3	21,3	1	
нитраты	28,7	29,7	1,05	1,04–1,06
Дигоксин	17,5	18,3	1,06	1,05–1,07
антиаритмические	0,3	0,1	0,33	0,31–0,35
Клиника ОДСН				
SpO_2 крови	92±3,5	86±6,2*		

Параметры	Объединённая оценка доли показателя в группах _Mo%		ОР	95 %ДИ
	ББТ 14_20 (n=624)	ББО 14_20 (n=1518)		
ЧСС в минуту	90±9,4	85±12,8*		
ЧДД в минуту	26±3,7	30±7,8*		
САД мм рт.ст.	136±11,3	123±9,6*		
гемоглобин г/л	129±6,7	114±11,2*		
креатинин мг/дл	1,26±0,16	1,5±0,22*		
натрий ммоль/л	141±4,9	135±5,7*		
калий ммоль/л	4,6±1,1	5,1±1,9*		
Д–димер нг/мл	6850	8420*		
Тропонин нг/л	3952	4536*		
фибриноген г/л	7,8	8,6		
NT-proBNP пг/мл	1530	1760*		
СРБ мг/л	136	142		
ИЛ-6 пг/мл	332	338		
госпитализация	83,5	72,9*	0,53	0,51–0,55
лечение в стационаре				
стероиды	6,3	3,8	0,59	0,57–0,61
антикоагулянты	5,1	3,4	0,65	0,64–0,67
антиагреганты	13	0,6*	0,04	0,03–0,05
осложнения	4,3	24,8*	7,34	7,1–7,6
тромбозы_ТЭЛА	0,3	4,2*	14,6	14,1–15,1
геморрагический синдром	3	0,4	0,1	0,09–0,11
желудочковая аритмия	0,8	8*	10,8	10,5–11,1
фибрилляция предсердий		12,2		
инфаркт миокарда_шок		0,1		
летальность	5,9	10,6*	1,89	1,85–1,93
внутрибольнич. смертность	4,6	7,5	1,68	1,65–1,71
30-дневная смертность от всех причин	19,9	28,7*	1,62	1,6–1,65
госпитализация более 10 сут.	30,9	28,9	0,91	0,9–0,92

Примечание: * — p <0,05 — достоверное отличие показателей в группах, Mo% — объединённая оценка доли показателя в группах, ОР — относительный риск

В тоже время уровень фибриногена (ББТ — 7,8 г/л, ББО — 8,6 г/л), СРБ (ББТ — 136 мг/л, ББО — 142 мг/л), ИЛ-6 (ББТ — 332 пг/мл, ББО — 338 пг/мл) в обеих группах был сопоставим, и данные маркёры имели место только в группе с инфекцией COVID-19, что указывает на наличие сочетания ОДСН с системными воспалительными реакциями на фоне COVID-19 и на отсутствие их влияния на уровень провоспалительных маркёров.

При анализе остальных параметров групп, отмечены факторы, влияющие на исход заболевания при отмене ББ с ОР более 1,0. Среди них были выделены такие наиболее значимые факторы (ОР>1,1), как женский пол — ОР 1,17 (95 % ДИ 1,16–1,18), наличие гипертонии — ОР 1,11 (95 % ДИ 1,1–1,12), дислипидемии — ОР 1,1 (95 % ДИ 1,09–1,11), персистирующая форма фибрилляции предсердий — ОР 2,72 (95 % ДИ 1,16–1,18, при p<0,001), ХБП — ОР 1,36 (95 % ДИ 1,34–1,38), ХНМК — ОР 1,21 (95 % ДИ 1,1–1,23), заболевания артерий нижних конечностей (ОАСНК) — ОР 1,13 (95 % ДИ 1,12–1,14), ХСН III–IV класса — ОР 1,1 (95 % ДИ 1,09-1,11) и снижение ФВ ЛЖ <40 % — ОР 1,17 (95 % ДИ 1,16–1,18). При этом все указанные параметры, кроме фибрилляции предсердий имели достоверную схожесть в группах (p>0,05) (рис. 4).

При оценке влияния на исход предшествующей терапии показатель относительного риска возрастал при использовании тиазидных — ОР 3,35 (95 % ДИ 3,26–3,44, при p <0,001) и петлевых диуретиков — ОР 1,13 (95 % ДИ 1,12-1,14), что было связано с исходной тяжестью ХСН и застойными явлениями, требующими дегидратации.

При оценке относительного риска осложнений и летальности на фоне отмены ББ при ОДСН наибольшее влияние на исход оказало развитие осложнений — ОР 7,34 (95 % ДИ 7,1–7,6, при p<0,05), особенно тромбозов — ОР 14,6 (95 % ДИ 14,1–15,1 p<0,05) и желудочковой аритмии — ОР 10,8 (95 % ДИ 10,5–11,1 p<0,01). Также при отмене ББ возрастала летальность — ОР 1,89 (95 %ДИ 1,85–1,93, p<0,05), уровень внутрибольничной — ОР 1,68 (95 % ДИ 1,65-1,71) и 30 дневной смертности — ОР 1,62 (95 % ДИ 1,6–1,65 при p<0,05) (рис. 5).

При сравнении полученных данных с результатами аналогичных исследований удалось сопоставить только показатели относительных рисков летальности и смертности. При анализе данных показателей летальности всформированной объединённой группе ББО были сопоставимы с результатами метаанализа Принса К.В. и соавторов [66] и данными регистра GULF-CARE (2017) [13] (p>0,05).

При этом была отмечена достоверная разница показателя внутрибольничной смертности от всех причин в объединённой группе отмены ББ и группах пациентов, имеющих сочетание ОДСН с COVID-19 [14] и ХОБЛ [1], вошедших в регистр ОСН МФЦ г. Мадрида (2020) и отече-

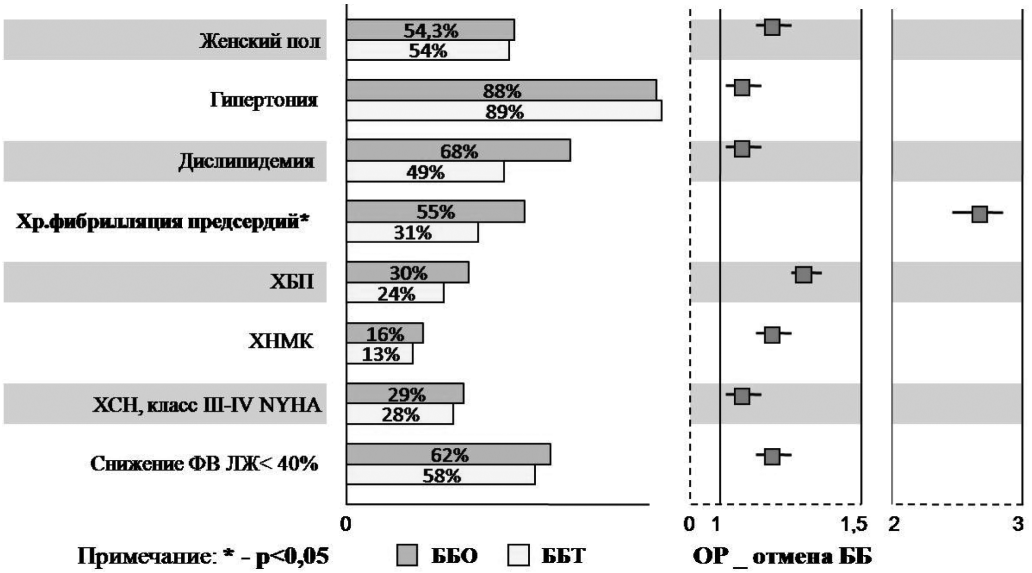


Рис. 4. Сравнительный анализ объединённых оценок доли показателей групп с отменой (ББО) и продолженной терапией ББ (ББТ)

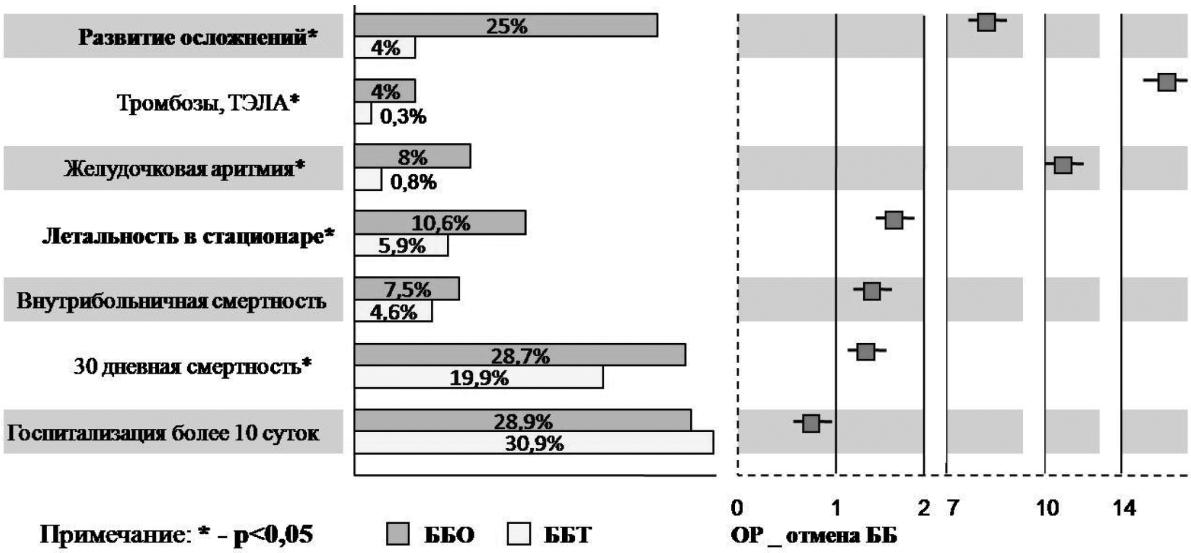


Рис. 5. Сравнительный анализ объединённых оценок доли осложнений и вариантов исхода при отмене (ББО) и терапии ББ (ББТ)

ственного регистра ОРАКУЛ-РФ (2011) [1] (p<0,05). Риск госпитализации более 10 суток в исследуемой объединённой группе ББО имел достоверную разницу с результатами лечения сочетания ОДСН с COVID-19 [67] регистра ОСН г. Мадрид [67] (p <0,05) (табл. 2).

При этом была отмечена достоверная разница показателя внутрибольничной смертности от всех причин в объединённой группе отмены ББ и группах пациентов, имеющих сочетание ОДСН с COVID-19 [14] и ХОБЛ [1], вошедших в регистр ОСН МФЦ г. Мадрида (2020) и отечественного регистра ОРАКУЛ-РФ (2011) [1] (p<0,05). Риск госпитализации более 10 суток в исследуемой объединённой группе ББО имел достоверную разницу с результатами лечения сочетания ОДСН с COVID-19 [67] регистра ОСН г. Мадрид [67] (p <0,05).

Среди факторов, оказывающих незначительное влияние на течение и исход ОДСН (ОР=1,01–1,09) наличие сахарного диабета — ОР 1,04 (95 % ДИ 1,03–1,05), ХОБЛ — ОР 1,08 (95 % ДИ 1,07–1,09), включение в комплексную терапию иАПФ — ОР 1,02 (95 % ДИ 1,01–1,03), антагонистов рецепторов ангиотензина 2 — ОР 1,05 (95 % ДИ 1,04–1,06), нитратов — ОР 1,05 (95 % ДИ 1,04–1,06) и дигоксина — ОР 1,06 (95 % ДИ 1,05–1,07) (p>0,05). Наличие указанных сопутствующих заболеваний и компонентов терапии говорят об исходной тяжести состояния больных, которая определяет высокий риск развития осложнений при ОДСН и увеличивает вероятность летального исхода.

Также при анализе данных обращает на себя, что часть объединённых оценок долей параметров имеет

Таблица 2.

Сравнение относительного риска летальности, смертности и длительной госпитализации при отмене бета блокаторов

Исследования и регистры	Относительный риск (ОР)			
	летальность	смертность		госпитализация >10 сут
		внутрибольничная	30-дневная	
Объединённая группа исследования ББО	1,89 [1,85–1,93]	1,68 [1,65–1,71]	1,62 [1,6–1,65]	0,91 [0,9–0,92]
регистр EAHFE –2014 Миро О. и др. [11]	1,93 [1,2–2,2]	1,77 [1,01–3,09]	1,93 [1,2–3,06]	1,04 [1,02–1,06]
регистр ОСН Мадрид_2020 Рей Дж.Р. и др. [14]	4,16* [3,3–5,0]	4,16* [3,3–5,0]	4,16* [3,3–5,0]	1,46* [1,3–1,6]
регистр ОРАКУЛ–РФ_2011 Арутюнов А.Г. и др. [1]	1,44* [1,41–1,46]	_	_	_
Метаанализ 2000–2015 Принс К.В. и др. [13]	1,78 [1,1–2,3]	3,72* [1,5–9,1]	1,59 [1,03–2,5]	_
регистр GULF–CARE — 2017 Аби Халил С. и др. [7]	2,5 [1,4–3,5]	2,1* [1,6–4,8]	_	_

Примечание: * — p <0,05 — достоверное отличие показателей в группах сравнения с исследуемой группой отмены бета блокаторов (ББО)

относительный риск ниже 1,0, что говорит о возможном снижении рисков неблагоприятных исходов и осложнений на фоне отмены бета блокаторов. К таким факторам с ОР<1,0 относится наличие ИБС — ОР 0,99 (95 % ДИ 0,98–0,993), перенесённый инфаркт миокарда — ОР 0,89 (95 %ДИ 0,88–0,9), применение блокаторов рецепторов альдостерона — ОР 0,85 (95 %ДИ 0,84–0,86) и антиаритмических средств — ОР 0,33 (95 % ДИ 0,31–0,35), применение стероидов — ОР 0,59 (95 % ДИ 0,59–0,61), антикоагулянтов — ОР 0,65 (95 % ДИ 0,64–0,67) и антиагрегантов — ОР 0,04 (95 % ДИ 0,03–0,05), госпитализация с ОДСН — ОР 0,53* (95 % ДИ 0,51–0,55) и сроки госпитализации более 10 суток — ОР 0,91 (95 % ДИ 0,9–0,92) (p*<0,01).

Выявленные особенности положительного влияния ряда факторов на течение и исход ОДСН на фоне отмены ББ не описаны в публикациях и на данный момент требуют дополнительных исследований для уточнения их роли и степени воздействия, что может стать направлением для научных исследований.

Заключение

При отмене бета блокаторов на фоне ОДСН в 25 % случаев отмечают развитие острой фибрилляции предсердий (12 %) и желудочковой аритмии (8 %), геморрагический синдром (10 %), тромбозы и ТЭЛА (4 %), а также признаки ишемии и инфаркта миокарда (3,4 %), а на фоне терапии бета блокаторов осложнения отмечают в 4 % случаев в виде тромбозов (6 %), геморрагического синдрома (3 %*) и желудочковой аритмии (0,9 %). При отмене бета блокаторов при ОДСН в 2,2–2,5 раза возрастает летальность (13 %), внутрибольничная и 30-дневная смертность (12–13 %), а частота длительной госпитализации увеличивается в 1,4 раза. Основные факторы, ухудшающие течение и исход ОДСН при отмене ББ (ОР>1,1) включают острые тромбозы, ТЭЛА и желудочковую аритмию, умеренное влияние на развитие неблагоприятного исхода оказывают гипертония, дислипидемия, персистирующая фибрилляция предсердий, ХСН III–IV класса с ФВЛЖ менее 40 %, ХБП и атеросклероз артерий нижних конечностей. К факторам снижающим риск неблагоприятного исхода ОДСН при отмене ББ (ОР <1,0), можно отнести ИБС, перенесённый инфаркт миокарда, предшествующую терапию блокаторами рецепторов альдостерона и антиаритмическими средствами, применение стероидов, антикоагулянтов, антиагрегантов, и продолжительный (>10 суток) стационарный этап лечения. Наличие осложнений и тяжёлых эффектов отмены ББ при ОДСН определяют необходимость их сохранения в комплексном лечении или возобновления терапии данными средствами в ранние сроки после стабилизации состояния и устранения имеющихся противопоказаний. Выявленные в ходе исследований факторы, снижающие риск развития осложнений и летального исхода при отмене ББ на фоне ОДСН, требуют внимания клиницистов на этапах лечения патологии и открывают возможности дальнейших научных исследований в этой области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арутюнов А.Г., Драгунов Д.О., Арутюнов Г.П. Первое открытое исследование синдрома острой декомпенсации сердечной недостаточности и сопутствующих заболеваний в Российской Федерации. Независимый регистр ОРАКУЛ-РФ // Кардиология. 2015. — Т. 55, № 5. — С. 12–21. doi:10.18565/cardio.2015.5.12-21
2. Закиев В.Д., Воробьёва Н.М., Малая И.П. и др Бета-блокаторы при хронической сердечной недостаточности с сохранной фракцией выброса левого желудочка: возможен ли депрескрайбинг? // Рациональная Фармакотерапия в Кардиологии. — 2023. — Т.19(6). — С. 607–613 — doi:10.20996/1819-6446-2023-2987. EDN JMTTB
3. Рекомендации по ведению пациентов с острой сердечной недостаточностью на догоспитальном и госпитальном этапах оказания медицинской помощи (часть 2) / академик РАН С. Ф. Багненко, академик РАН Ю.С. Полушин, профессор С.Н. Терещенко // Неотложная кардиология. — 2017. — № 1. — С. 34–59.
4. Смирнова Е.А., Седых Е.В. Острая декомпенсация сердечной недостаточности. Актуальные вопросы эпидемиологии, диагностики, терапии // Наука молодых — Eruditio Juvenium. — 2021. — Т9-№2. — С.289–300. doi: 10.23888/ HMJ202192289-300.
5. Терещенко С.Н., Жиров И.В., Ускач Т.М., Саидова М.А. и др. Клинические рекомендации Евразийской ассоциации кардиологов (ЕАК)/ Национальное общество специалистов по заболеваниям миокарда и сердечной недостаточности (НОИСН) по диагностике и лечению хронической сердечной недостаточности (2020) // Евразийский кардиологический журнал. — 2020.— Т.3, №6. — С. 76–79, https://doi.org/10.38109/ 2225–1685-2020-3-6-76.
6. Хроническая сердечная недостаточность. Клинические рекомендации 2020 // Российский кардиологический журнал. 2020. — Т. 25, №11. — С. 4083. doi:10.15829/1560–4071-2020-40837
7. Abi Khalil C., Sulaiman K., Mahfoud Z. et al. GULF-CARE group. Non-withdrawal of beta blockers in acute decompensated chronic and de novo heart failure with reduced ejection fraction in a prospective multicentre study of patients with acute heart failure in the Middle East. // BMJ Open. — 2017. — Jul 9, №7(7)/ — P. 014915. doi: 10.1136/bmjopen-2016-014915. PMID: 28694343; PMCID: PMC5734353.
8. Baran D.A., Grines C.L., Bailey S. et al. SCAI clinical expert consensus statement on the classification of cardiogenic shock: This document was endorsed by the American College of Cardiology (ACC), the American Heart Association (AHA), the Society of Critical Care Medicine (SCCM), and the Society of Thoracic Surgeons (STS) in April 2019 // Catheter Cardiovasc Interv. — 2019. — Jul 1. — V.94(1). — P. 29–37. doi: 10.1002/ccd.28329. Epub 2019 May 19. PMID: 31104355.
9. Cleland J.G.F., Bunting K.V., Flather M.D. et al. Beta-blockers in Heart Failure Collaborative Group. Beta-blockers for heart failure with reduced, mid-range, and preserved ejection fraction: an individual patient-level analysis of double-blind randomized trials // Eur. Heart J. — 2018. — Jan 1/ — V.39(1), — P. 26–35. doi: 10.1093/eurheartj/ehx564. PMID: 29040525; PMCID: PMC5837435.
10. Di Santo P., Mathew R., Jung R.G. et al. Impact of baseline beta-blocker use on inotrope response and clinical outcomes in cardiogenic shock: a subgroup analysis of the DOREMI trial // Crit Care. — 2021. — Aug. — V.10. — №25(1). — P.289–296. doi: 10.1186/s13054-021-03706-2. PMID: 34376218; PMCID: PMC8356445.
11. Miró Ò., Müller C., Martín-Sánchez F.J. et al. BETAWIN-AHF study: effect of beta-blocker withdrawal during acute decompensation in patients with chronic heart failure // Clin. Res. Cardiol. — 2016. — Dec. — V.105 (12). — P.1021–1029. doi: 10.1007/s00392-016-1014-9. Epub 2016 Jul 5. PMID: 27379611.
12. Price S., Platz E., Cullen L. et al. Expert consensus document: Echocardiography and lung ultrasonography for the assessment and management of acute heart failure // Nature Reviews Cardiology. — 2017. — V.14, № 7. — P. 427–440. doi: 10.1038 /nrcardio.2017.56.
13. Prins K.W., Neill J.M., J.O. Tyler Effects of Beta-Blocker Withdrawal in Acute Decompensated Heart Failure: A Systematic Review and Meta-Analysis // JACC Heart Fail. — 2015. — Aug. 3(8). — P.647–653. doi: 10.1016/j.jchf.2015.03.008. PMID: 26251094; PMCID: PMC4777602.
14. Rey J.R., Caro-Codón J., Rosillo S.O. et al. Heart failure in COVID-19 patients: prevalence, incidence and prognostic implications // Eur. J. Heart Fail. — 2020. — Dec.22(12). — P. 2205–2215. doi: 10.1002/ejhf.1990. Epub 2020 Oct 7. PMID: 32833283; PMCID: PMC7461427.
15. Schurtz G., Mewton N., Lemesle G. et al. Beta-blocker use in patients hospitalized with acute heart failure and reduced ejection fraction: a review and expert opinion // Front Cardiovasc. Med. — 2023. — Nov.16, №:10ю — P. 1263–1482. doi: 10.3389/fcvm.2023.1263482. PMID: 38050613; PMCID: PMC10693984.

© Бархатова Наталия Анатольевна (barhatova.2020@mail.ru); Бархатова Екатерина Игоревна (barhatova_katya_75@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.04

ФАКТОРЫ РИСКА РАСШИРЕНИЯ ВОСХОДЯЩЕГО ОТДЕЛА АОРТЫ У БОЛЬНЫХ СЕРОНЕГАТИВНЫМИ СПОНДИЛОАРТРИТАМИ

RISK FACTORS FOR ASCENDING AORTIC DILATION IN PATIENTS WITH SERONEGATIVE SPONDYLARTHRITIDES

V. Bogatyreva
N. Morova

Summary. The article presents the results of a study that evaluated the frequency of ascending aortic dilation in patients with seronegative spondyloarthritides and identified the factors that influence its development. The article also analyzes the relationship between ascending aortic diameter and electrocardiographic intervals in patients with seronegative spondyloarthritides. *Materials and methods*. The study involved 120 patients with seronegative spondyloarthritides who were treated at the Rheumatology Department of the Omsk Regional Clinical Hospital. All patients underwent 12-lead electrocardiography and echocardiography. 26 (21.7 %) of the 120 patients had an enlarged ascending aorta. There was no statistically significant association between HLA B27 gene carriage, disease activity, type of medical therapy, and aortic dilation. The analysis of correlation relationships showed a dependence between the expansion of the ascending aorta and height (r=–0.4, p=0.000005), weight (r=0.4, p=0.000079), age of patients (r=0.5, p=0.000000), and duration of the disease (r=0.3, p=0.013402). The expansion of the ascending aorta in patients with seronegative spondylarthritises was associated with the presence of arterial hypertension (p(U) = 0.0445). The relationship between cardiac rhythm and conduction disorders and the condition of the aorta was analysed.

Keywords: seronegative spondylarthritides, ankylosing spondylitis, psoriatic arthritis, aortitis, ascending aortic dilation, cardiac conduction disorders, and risk factors.

Богатырева Валентина Александровна
Аспирант, ФГБОУ ВО Омский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения РФ;
Врач-ревматолог, ревматологическое отделение БУЗОО Областная клиническая больница
wala.miller1987@mail.ru
Морова Наталия Александровна
доктор медицинских наук, профессор, ФГБОУ ВО Омский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения РФ
nataliya-morova@yandex.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования, в ходе которого проведена оценка частоты расширения восходящего отдела аорты у больных серонегативными спондилоартритами и выявлены факторы, влияющие на её развитие. Проведен анализ между диаметром восходящего отдела аорты и интервалами электрокардиографии у больных серонегативными спондилоартритами. *Материалы и методы*. Обследовано 120 пациентов, страдающих серонегативными спондилоартритами, проходившие лечение в отделении ревматологии Омской областной клинической больницы. Всем больным проводилась электрокардиография в 12 отведениях и эхокардиография. У 26 (21,7 %) человек из 120 выявлено расширение восходящего отдела аорты. Не отмечено статистически значимой ассоциации между носительством гена HLA B27, активностью болезни, видом медикаментозной терапии и расширением аорты. Анализ корреляционных связей показал зависимость между расширением восходящего отдела аорты и ростом (r=– 0,4, p=0,000005), весом (r=0,4, p=0,000079), возрастом больных (r=0,5, p=0,000000) и давностью болезни (r=0,3, p=0,013402). Расширение восходящего отдела аорты у пациентов с серонегативными спондилоартритами было ассоциировано с наличием артериальной гипертензии (p(U) = 0,0445). Проанализирована взаимосвязь между нарушениями ритма и проводимости сердца и состоянием аорты.

Ключевые слова: серонегативные спондилоартриты, анкилозирующий спондилит, псориатический артрит, аортит, расширение восходящего отдела аорты, нарушение проводимости сердца, факторы риска.

При серонегативных спондилоартритах (СнСпА) возникновение патологии сердца не является редкостью. Зачастую именно поражение сердечно-сосудистой системы у данной категории больных осложняет течение основного заболевания. Необходимость ранней диагностики аортита у пациентов с СнСпА не вызывает сомнений. Представляет интерес выяснение связи между расширением аорты и активностью процесса, наличием HLA B27 антигена, видом применяемой лекарственной терапии. Так как нарушения ритма и проводимости сердца легко диагностируются по ЭКГ, в том случае, если они являются проявлением активного процесса, их наличие можно было бы использовать как маркер раннего поражения сердечно-сосудистой системы при СнСпА.

Классическими кардиальными проявлениями анкилозирующего спондилита (АС) считают аортит с аорталь-

ной недостаточностью [1]. Большое количество работ показывают высокую частоту встречаемости расширения аорты при СнСпА [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Примечательно, что при аутопсии пациентов с анкилозирующим спондилитом поражение аорты и клапанов выявляют от 24 до 100 % случаев [9]. В литературных источниках описание аортита, как внескелетного проявления СнСпА, чаще упоминается именно при анкилозирующем спондилите. При псориатической спондилоартропатии аортит описан реже. Дальнейшее изучение патогенеза, понимание роли цитокинов в развитии спондилоартритов повлекло за собой создание генно-инженерных биологических препаратов с доказанной клинической эффективностью [10]. Однако публикаций о влиянии биологических агентов на кардиальные проявления в литературе ограничено лишь единичными случаями [7, 11, 12, 13], нами не найдено исследований на больших выборках. Противоречивы данные о влиянии активности болезни и наличия антигена HLA B27. Ряд авторов пришли к выводу, что клиническая активность болезни не ассоциирована с изменением аорты [14, 15]. При некоторых вариантах спондилоартритов аортит развивается только у HLA B27-позитивных пациентов [16]. По данным Johnsen K и соавторов (2009 год) не показана взаимосвязь аортита с носительством антигена HLA B27 без наличия анкилозирующего спондилита [17]. Исследования многих авторов показывают наличие ассоциации между длительностью заболевания СнСпА и развитием расширения восходящего отдела аорты [18, 19].

Учитывая возможное распространение патологического процесса с аорты на перепончатую часть межжелудочковой перегородки [20], представляет интерес изучение вопроса о вероятности ассоциации между нарушениями ритма и проводимости сердца и аортита.

Цель исследования: оценка частоты расширения восходящего отдела аорты у больных СнСпА и выявление факторов, влияющих на его развитие.

Материалы и методы

Объектом исследования были 120 пациентов, страдающих серонегативными спондилоартритами, проходившие лечение в отделении ревматологии Омской областной клинической больницы. Из них диагноз анкилозирующего спондилита, согласно модифицированным Нью-Йорским критериям 1984 года, установлен 78 (65±4,3 %) пациентам. Псориатический артрит, согласно критериям CASPAR 2006 года, диагностирован у 42 (35±4,3 %) человек. В исследуемой группе было 83 (69,2±4,4 %) мужчины и 37 (30,8±4 %) женщин. Медиана [25-й, 75-й перцентили] возраста больных составили 45,5 (36; 54) лет, медиана продолжительности болезни 9 [3,5; 15] лет. Исследование крови на наличие HLA B27 антигена выполнено у 71 человека из 120, из них HLA B27— позитивными оказались 49 (67,6±4,2 %) пациентов, HLA B27— негативными — 24 (32,4±4,2 %) человека. Высокая клиническая активность заболевания установлена у 89 (74,1±3,9 %) пациентов, низкая активность у 24 (20±3,6 %), в ремиссии были 7 человек из 120 (5,8±2,1 %). Количество пациентов, лечение которых проводилось лишь препаратами группы НПВП, составило 20 (16,5±3,4 %) человек. Базисные синтетические противовоспалительные препараты (сульфасалазин или метотрексат) принимали 52 (43,3±4,5 %) пациента. На терапии генно-инженерными биологическими препаратами находилось 48 (40±4,4 %) человек. Из них терапию этанерцептом получали 12 (25±6,2 %) пациентов, инфликсимабом — 11 (22,9±6,06 %), адалимумабом — 10 (20,8±5,8 %), секукинумабом — 4 (8,4±3,9 %), нетакимабом — (8,4±3,9 %), голимумабом — 3 (6,25±3,4 %), упадацитинибом — 3 (6,25±3,4 %), синепрутогом — 1 (2±2 %) человек. Всем пациентам проведена трансторакальная эхокардиография.

Статистическая обработка данных проведена с использованием статистического пакета Statistica 10. Оценка вида распределения количественных непрерывных данных проведена путём расчёта критерия Шапиро—Уилки. Для сравнения двух групп по количественным показателям использовался U-критерий Манна-Уитни, трех групп — критерий Краскела-Уоллиса. Сопоставление групп по качественным бинарным признакам проведена с помощью двустороннего критерия Фишера. Проведен корреляционный непараметрический анализ по Спирмену. Различия считались достоверными при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты

При анализе ЭхоКГ у больных серонегативными спондилоартритами из 120 человек у 26 выявлено расширение восходящего отдела аорты, что составило 21,7±3,7 %.

Проведен анализ связей ряда факторов с наличием или отсутствием расширения восходящего отдела аорты (таблица 1). При анализе влияния пола на величину восходящего отдела значимых отличий не выявлено. У мужчин расширение зарегистрировано в 57,7±9,6 % ($p=0,4718$) случаев, у женщин в 42,3±9,6 % ($p=0,1593$).

Не отмечено статистически значимой ассоциации между носительством гена HLA B27 и изменением аорты. В группе с расширением аорты антиген обнаружен у 66,6±12,1 %, в группе без расширения в 67,8±6,2 % ($p=0,0909$).

Высокая активность болезни зарегистрирована у 21 человека (80,7±7,7 %) и у 67 (71,2±4,6 %) соответственно ($p=0,4548$).

Таблица 1.
Факторы риска расширения восходящего отдела аорты у пациентов серонегативными спондилоартритами

	Аорта расширена (n=26)	Аорта в норме (n=94)	P для критерия Фишера p(F)/p(U)
Мужской пол	15 (57,7± 9,6 %)	68 (72,3± 4,6 %)	p(F) = 0,4718
Женский пол	11 (42,3± 9,6 %)	26 (27,6± 4,6 %)	p(F) = 0,1593
Наличие гена HLA B27	10 (66,6± 12,1 %)	38 (67,8± 6,2 %)	p(F) = 0,0909
Высокая активность болезни	21 (80,7± 7,7 %)	67 (71,2± 4,6 %)	p(F) = 0,4540
Наличие АГ	16 (61,5±9,5 %)	36 (38,2±5,0 %)	p(U) = 0,0445
Анкилозирующий спондилит	16 (61,5± 9,5 %)	62 (65± 4,9 %)	p(F) = 0,8161
Псориатический артрит	10 (38,5± 9,5 %)	42 (44,7± 5,1 %)	p(F) = 0,6576
Терапия НПВП	3 (11,5± 6,2 %)	17 (18± 3,9 %)	p(F) = 0,5596
Терапия БПВП	13 (50± 9,8 %)	39 (41,4± 5,0 %)	p(F) = 0,5052
Терапия ГИБП	10 (38,5± 9,5 %)	38 (40,4± 5,0 %)	p(F) = 1,0000
Нарушение ритма и проводимости сердца	13 (50± 3,6 %)	34 (36± 4,9 %)	p(F) = 0,2571
Недостаточность аортального клапана	8 (30,7± 9 %)	11 (11±3,4 %)	p(F) = 0,0306

Выявлено, что пациентов с наличием артериальной гипертензии было достоверно больше в группе с расширением аорты, чем в группе без расширения, это 61,5±9,5 % и 38,2±5,0 % соответственно, p=0,0445 (Рисунок 1).

Проанализировано влияние диагноза, значимых различий не выявлено. В группе пациентов с расширением больных анкилозирующим спондилитом было 16 человек (61,5±9,5 %), в группе без расширения 62 человека (65±4,9 %), p=0,8161. Пациенты с псориатическим артритом имели расширение в 38,5±9,5 % случаев и в 44,7±5,1 % расширение отсутствовало, p=0,6576.

Проанализировано влияние вида терапии на величину восходящего отдела аорты. Пациенты, полу-

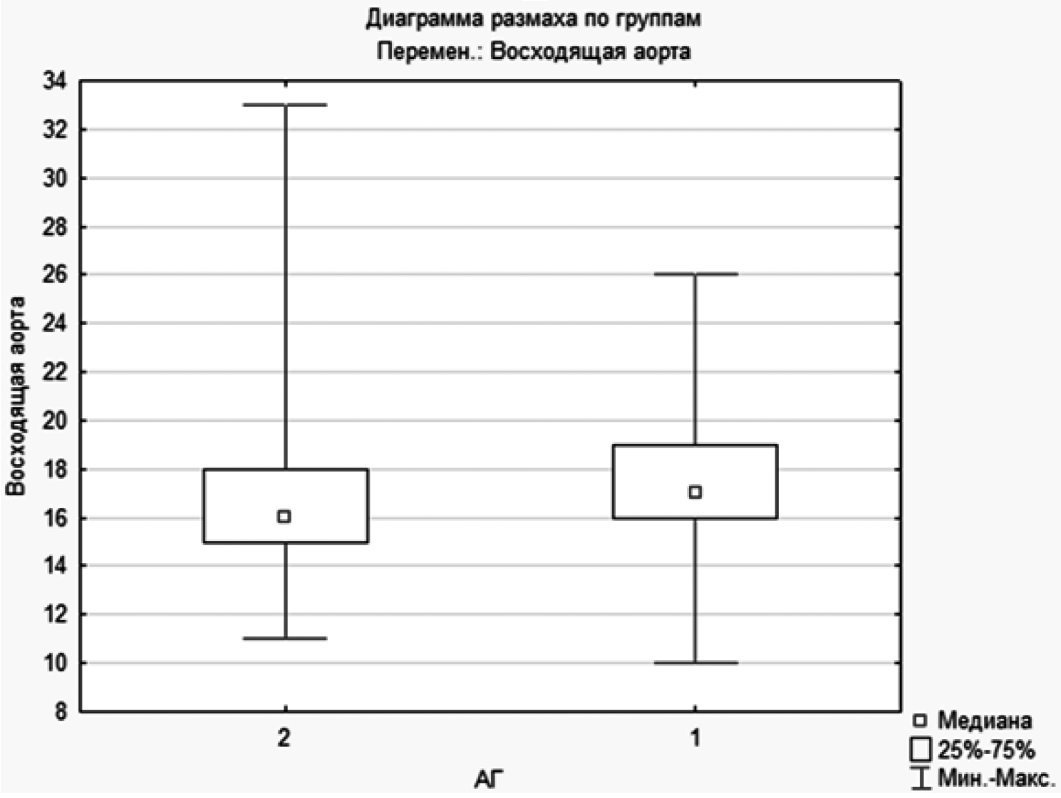


Рис. 1. Диаграмма размаха восходящего отдела аорты у пациентов с наличием АГ (1) и без АГ (2) в группе пациентов с СнСпА

чающие терапию только препаратами группы НПВП, имели расширение аорты в 11,5±6,2 % случаях, пациенты на БПВТ в 50±9,8 % случаев, на терапии ГИБТ в 38,55±9,5 %. Анализ ассоциации не показал значимых различий (p>0,05).

Представляло интерес, могут ли быть нарушения ритма и проводимости сердца предиктором расширения восходящего отдела аорты. При анализе связей отмечено, что в группе с расширением аорты нарушения ритма и проводимости встретились в 50±3,6 % случаев, а в группе с нормальной аортой в 36±4,9 %, однако статистической значимости по критерию Фишера не достигнуто (p=0,2751). Корреляционных связей между диаметром аорты и интервалами ЭКГ не определено. (таблица 2).

Достоверно чаще в группе с расширением аорты встретилась недостаточность аортального клапана 30,7±9 % против 11±3,4 % в группе без расширения (p=0,0306).

Таблица 2.

Анализ корреляционных связей между расширением восходящего отдела аорты и интервалами ЭКГ у больных СнСпА

	Коэффициент корреляции Спирмена (R)	P для коэффициента корреляции Спирмена (R)
PQ	0,003378	0,970787
QRS	–0,204395	0,025137
QT	0,032787	0,722217
ЧСС, ударов в минуту	–0,154902	0,091159

Анализ корреляционных связей показал зависимость расширения корня аорты от роста, веса, возраста больных и продолжительности болезни (Рисунок 2). В группе пациентов с длительностью болезни менее 10 лет расширение аорты показано у 46,1±9,7 %, нормальная аорта была у 58,5±5,0 % пациентов. В группе больных

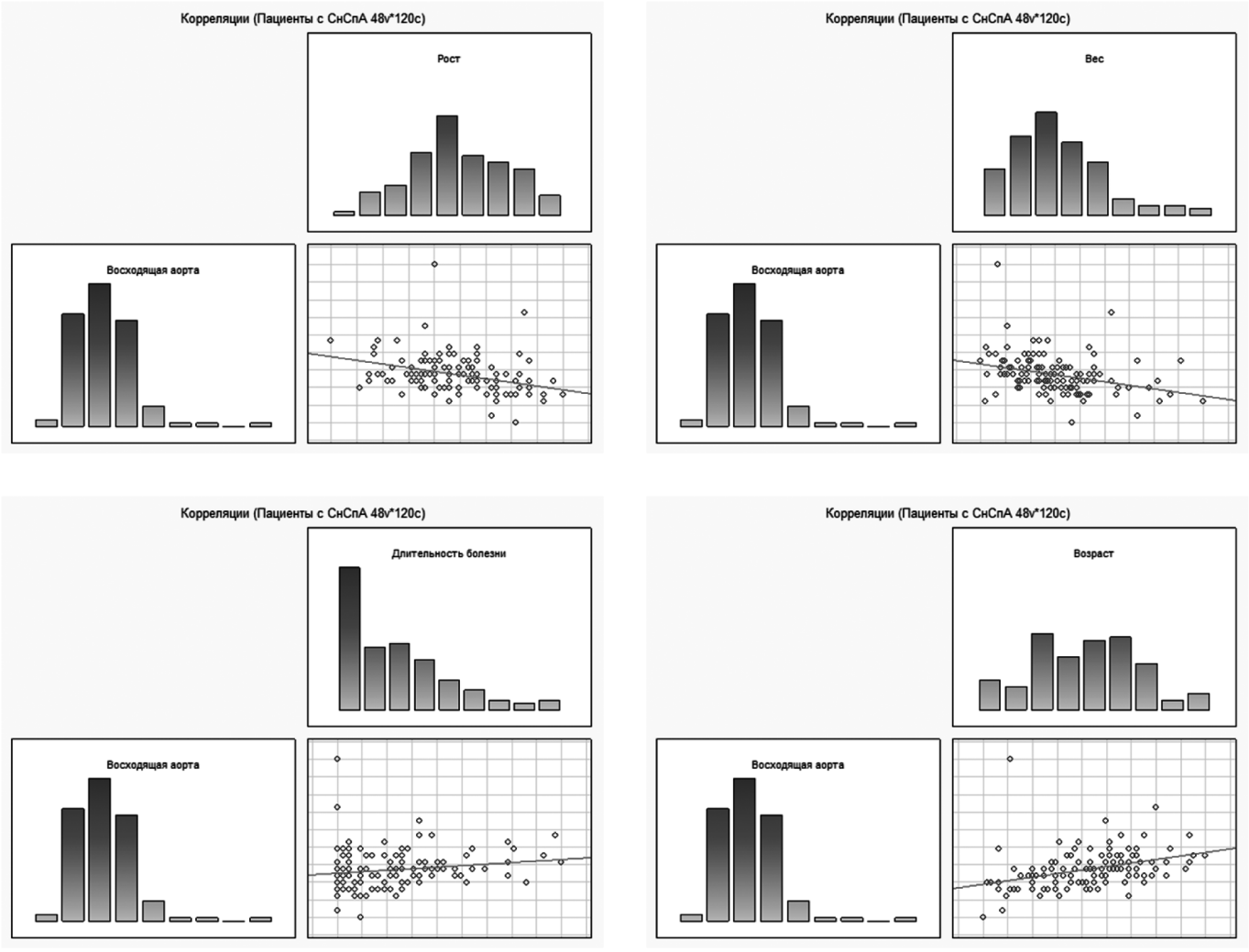


Рис. 2. Анализ корреляционных связей между расширением восходящего отдела аорты и ростом, весом, возрастом пациентов, продолжительностью болезни

с продолжительностью болезни более 10 лет расширение аорты отмечено у 53,8±5,1 %, нормальная аорта — у 38,2±5,0 % обследованных. Корреляции с уровнем лабораторных маркеров воспаления, таких как СОЭ и СРБ, не выявлено (Таблица 3).

Таблица 3.

Анализ корреляционных связей между расширением восходящего отдела аорты и ростом, весом, возрастом, продолжительностью болезни, лабораторными маркерами воспаления (СОЭ, СРБ)

	Коэффициент корреляции Спирмена (R)	P для коэффициента корреляции Спирмена (R)
Рост, см	–0,4	0,000005
Вес, кг	0,4	0,000079
Возраст, годы	0,5	0,000000
Давность болезни, годы	0,3	0,013402
Уровень СОЭ, мм/час	0,05	0,542784
Уровень СРБ, мг/л	0,07	0,401951

Проведенный анализ зависимости между структурно-функциональными показателями сердца, определяемыми при проведении ЭхоГК и расширением восходящего отдела аорты у больных СнСпА выявил статистически значимую тенденцию к увеличению систолического и диастолического размера левого желудочка (Таблица 4).

Таблица 4.

Структурно-функциональные показатели сердца и расширение восходящего отдела аорты у больных СнСпА

ЭхоКГ параметры	Аорта расширена (n=26)	Нормальная аорта (n=94)	P для критерия Манна-Уитни, p(U)
КДР, мм/м^2	**26 (24;29)**	**25 (23;26)**	**p(U) = 0,0596**
КСР, мм/м^2	**17 (16;19)**	**16 (15;17)**	**p(U) = 0,0283**
ФВ, %	65 (62;68)	64 (60;68)	p(U) = 0,9129
Масса миокарда, г/ м^2	112 (92;137)	96 (80;110)	p(U) = 0,5025
Правый желудочек, мм/м^2	13 (12;15)	12 (11;14)	p(U) = 0,2518

Обсуждение

У здоровых взрослых диаметр аорты обычно не превышает 40 мм и постепенно сужается от проксимального к дистальному отделу [21]. Под влиянием возраста, массы тела, роста, площади поверхности тела диаметр аорты может меняться [22, 23, 24]. Согласно данным Vriz O и соавторов [25], скорость расширения аорты в зрелом возрасте составляет около 0,9 мм для мужчин и 0,7 мм для женщин в течение каждого десятилетия жизни. Учитывая, что медиана возраста больных нашей когорты пациентов (45,5 лет) только перешагнула рубеж зрелости [26], соотнесем найденную корреляционную связь между возрастом и расширением аорты в исследуемой группе именно с наличием СнСпА.

В воспалительный процесс при СнСпА вовлекается восходящий отдел аорты, луковица аорты на протяжении примерно первых 3 см с вовлечением в патологический процесс аортальных створок, синусов Вальсальвы, а в ряде случаев и таких расположенных рядом структур, как перепончатая часть межжелудочковой перегородки и передняя створка митрального клапана [20]. Отсутствие аортита — один из критериев ремиссии анкилозирующего спондилита [27]. Но даже после купирования воспаления сохраняются структурные изменения, которые представляют собой последствия воспалительного процесса, а не проявление его активности [28]. Высокая частота встречаемости поражения аорты показана многими авторами [29]. По данным Годзенко А.А. и соавторов, изменения аорты выявлены у 35,6 % респондентов [1]. В более поздних работах автор (2017 г.) изменения аорты обнаружил уже у 41,2 % обследуемых. У 71 из 172 человек с СнСпА, которым выполнялась ЭхоКГ, выявлены изменения аорты и клапанов сердца в виде утолщения и/или дилатации [16]. Зарубежные авторы в своих публикациях пытаются привлечь внимание к поражению сердца при анкилозирующем спондилите как к частому и серьезному проявлению [30,31]. Результаты нашей работы также демонстрирует достаточно высокую частоту встречаемости расширения восходящего отдела аорты у пациентов СнСпА (21,7 %). В реальной клинической практике у многих больных диагностика аортитов запаздывает ввиду отсутствия специфических клинических проявлений и патогномоничных лабораторных признаков [32]. Чаще изменения аорты выявляются уже на поздних стадиях болезни, что связано с ограниченной возможностью использования высокоточных визуализирующих методов, таких как МРТ и ПЭТ, а применяемая для диагностики трансторакальная эхокардиография позволяет обнаружить зачастую уже только необратимые структурные изменения, такие как дилатация и утолщение стенок аорты [33]. C. Roldan и соавторы в своем исследовании благодаря проведению чрезпищеводной эхокардиографии добились самой высокой частоты выявляемости (82 %) изменений аорты [3]. Однако использовать данный метод в рутинной практике, соблюдая концепцию «польза—риск», невозможно.

Исследование Groppa L. и соавторов (2011 год) показывает, что недостаточность аортального клапана при серонегативных спондилоартритах возникает в 42,8 % случаев [34]. Формирование аортальной недостаточности связано не только с относительной недостаточно-

стью ввиду аортита с последующей дилатацией корня аорты, но и фиброзирующим вальвулитом [25, 35]. Однако есть и иное мнение. По данным F. Brunner и соавторов, частота аортальной регургитации, нарушений сердечной проводимости и диастолической дисфункции не повышена у больных АС в сравнении с популяционной [36]. По обзорным данным D. Lautermann и J. Braun, частота аортальной регургитации при АС составляет всего 4–10 % [2]. Наше исследование демонстрирует достоверно высокую частоту встречаемости недостаточности аортального клапана в группе с расширением аорты.

Дискутабельным остается вопрос о влиянии активности заболевания на расширение восходящего отдела аорты. Ряд авторов утверждают, что некоторые системные кардиологические синдромы при АС, в том числе аортит, ассоциируются с активностью болезни [37]. E. Klingberg и соавторы в своем исследовании показали, что как исходно, так и на протяжении мониторинга за больными с анкилозирующим спондилитом с поражением сердца СОЭ было достоверно выше, в сравнении с больными без поражения сердца [30]. Годзенко А.А. и соавторы (2017 год) в своем исследовании выявили, что прогрессирование аортальной недостаточности было сопряжено с повышением уровня СОЭ, однако корреляционная зависимость достаточно низка (r=0,280) [38]. Ряд авторов описывают клинические случаи, где тяжелая кардиальная патология, потребовавшая хирургического вмешательства, возникла у пациентов без ярких системных проявлений активного воспаления [11]. Интересен клинический опыт зарубежных коллег, где у молодого мужчины 36 лет, имеющего в анамнезе дважды протезированный аортальный клапан по поводу его недостаточности, после проведенной третьей операции (операция Бентала), в гистологическом материале выявлены признаки аортита. Дальнейшее обследование выявило двусторонний сакроилиит и умеренную воспалительную боль в спине, уровень СОЭ и СРБ при этом были в норме [39]. В нашей работе наличие расширения аорты также не зависело от уровня лабораторных маркеров воспаления, таких как СОЭ и СРБ. Возможно, это обусловлено тем, что расширенная аорта — это исход, а не признак активного воспаления у пациентов нашей выборки.

В отличие от противоречий в оценке влияния активности, авторы в изученных нами работах солидарны в отношении наличия зависимости между продолжительностью болезни и изменениями в аорте. Согласно данным литературы, во всем мире наблюдается несвоевременная диагностика СнСпА, средняя задержка постановки диагноза составляет 6,7 лет [40]. Соответственно, диагностика поражений аорты тоже запаздывает. В ряде случаев изменения в аорте опережают аксиальные проявления СнСпА. Бывает и так, что впервые о диагнозе СнСпА задумываются именно врачи кардиологи [11, 41]. Частота изменения в аорте медленно нарастает по мере увеличения длительности болезни, достигая 50 % и более при продолжительности заболевания 15–20 лет [3,42]. Результаты проспективного исследования Годзенко А. и соавторов продемонстрировали прогрессирование патологических изменений аорты и клапанов сердца у большинства пациентов — 27 из 45 (60 %) — в виде нарастания дилатации аорты, степени клапанной регургитации, утолщения клапанов [43]. Результаты нашего исследования совпадают с данными литературы, показывая наличие статистически значимой корреляционной зависимости между продолжительностью болезни и расширением аорты (r=0,3 p=0,013402). Японскими авторами описаны случаи тяжелых аневризм грудного отдела аорты при спондилоартритах [44, 45]. Нет сомнений в необходимости ранней оценки и динамического наблюдения за состоянием структур сердца у больных СнСпА с целью выявления пациентов, которым может потребоваться хирургическое лечение во избежание жизнеугрожающих состояний.

Мы выявили тенденцию к статистически значимому (p=0,0909) влиянию антиген HLA B27 на расширение аорты. В группе с расширением он обнаружен у 66,6 %, в группе без расширения в 67,8. Среди больных АС, наблюдавшихся в ФГБНУ НИИР им. В.А. Насоновой, 98 % обследуемых с нарушением ритма и проводимости и 97,5 % с поражением аорты и клапанов сердца имели антиген HLA B27 [16]. Зарубежные авторы выделяют ассоциированный с HLA B27 сердечный синдром, включающий поражение корня аорты и нарушения проводимости [2]. Вероятно, если бы охват генетическим исследованием в нашей выборке был больше, то и процент случаев HLA B27-позитивности в группе с расширением аорты увеличился.

Выбор тактики лечения при наличии поражения сердечно-сосудистой системы представляет определенные сложности. Традиционная терапия, которая включает регулярную физическую активность и нестероидные противовоспалительные препараты, могут усугубить патологию сердца и сосудов [12]. Применение базисных противовоспалительных препаратов, включая метотрексат, сульфасалазин, лефлуномид, неэффективно как способ лечения поражения сердца у данной категории пациентов [46–49]. Успешное лечение СнСпА генно-инженерными биологическими препаратами дает повод задуматься, эффективно ли их применение при поражении аорты у пациентов этой группы заболеваний. Пока такие исследования в изученной литературе немногочисленны и чаще представлены лишь клиническими наблюдениями. На животных моделях было доказано, что аортит, так же как и другие проявления СнСпА, развивается при участии фактора некроза опухоли альфа и семейства интерлейкинов. Эффект ингибиторов фактора некроза опухоли альфа в отношении аортита при анки-

лозирующем спондилите продемонстрирован и клинически [13]. В клиническом наблюдении Гайдуковой И.З. и соавторов показана возможность контролировать как позвоночные, так и внескелетные проявления АС (аортит, миокардит) с применением комплексного лечения, включающего секукинумаб [12]. В исследовании 2017 года Годзенко А.А. и соавторов в группе пациентов с АС 16 из 45 пациентов получали ГИБТ. Прогрессирование дилатации аорты наблюдалось реже в группе пациентов, получающих биологические препараты, в сравнении с группой, где пациенты получали стандартное лечение (r=–0,329; p=0,03) [38]. В нашем исследовании терапию биологическими агентами получали 48 человек из 120. Ассоциативных связей при корреляционном анализе не выявлено, что может быть обусловлено правильно подобранным и своевременно начатым лечением. Выбор в пользу ГИБП закономерен у пациентов после протезирования аортального клапана, либо установки кондуита восходящего отдела аорты. Такие пациенты вынуждены находиться на антикоагулянтной терапии, и сочетание их с НПВС, как препаратов патогенетической терапии, опасно развитием кровотечений [7].

СнСпА являются заболеваниями, ассоциирующимися с повышением риска развития артериальной гипертензии [50, 51]. Частота встречаемости артериальной гипертензии в этой группе пациентов по данным разных авторов колеблется от 13,4 до 33,5 % случаев. Сведений о изучении взаимосвязи частоты расширения восходящего отдела аорты и наличия артериальной гипертензии при СнСпА в изученной литературе нам не встретилось. Собственное исследование показывает достоверно более частое расширение аорты у пациентов СнСпА с наличием артериальной гипертензии.

В работе Годзенко А.А. и соавторов отмечено частое сочетание аортита и аортальной регургитации с нарушением проводимости сердца. Частота атриовентрикулярной блокады у пациентов с изменениями аорты и клапанов сердца в их исследовании оказалась достоверно выше, чем у больных без них. С другой стороны, частота изменений аорты и клапанов сердца у больных с атриовентрикулярной блокадой оказалась также достоверно больше, чем у пациентов без блокады (p=0,0027) [1]. В нашей работе не выявлено корреляции между диаметром аорты и интервалами ЭКГ у больных СнСпА.

Выводы

Расширение восходящего отдела аорты является частым внескелетным проявлением СнСпА.

Выявлена зависимость расширения восходящего отдела аорты от роста, веса, возраста больных и давности болезни, не выявлено значимых различий от уровня СОЭ и СРБ.

Не показано связи между наличием антигена HLA B27 и расширением восходящего отдела аорты.

Расширение восходящего отдела аорты у пациентов с СнСпА было ассоциировано с наличием артериальной гипертензии.

Не выявлено влияния вида медикаментозной терапии на развитие расширения восходящего отдела аорты у больных СнСпА.

Нарушение ритма и проводимости сердца — частое проявление у пациентов с расширением аорты в группе СнСпА независимо от состояния аорты. Не выявлена корреляция между диаметром аорты и интервалами ЭКГ у больных СнСпА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Годзенко А.А., Бочкова А.Г., Корсакова Ю.О., Бунчук Н.В., Мач Э.С. Поражение сердца при анкилозирующем спондилите. Научно— практическая ревматология. 2009. Т. 47. № 4. С. 4–10.
2. Lautermann D., Braun J. Анкилозирующий спондилит — кардиальные проявления. Clin. Exp. Rheumatol., 2002, 20, 6 (suppl 28), 511–515.
3. Roldan C.A., Chavez J., Wiest P.W. et al. Aortic root disease and valve disease associated with ankylosing spondylitis. J Am Coll Cardiol 1998; 32: 1397–404.
4. Сердечно— сосудистые изменения при серонегативном спондилоартрите / М. Стоика, А. Скорпан, О. Сарбу [и др.] // One Health & Risk Management. — 2022. — Т. 3, № 2. — С. 18–23. — DOI 10.38045/ohrm.2022.2.03
5. Groppa L., ş.a. Analiza morbidităţii cardiovasculare în artrita psoriazică. Analele Ştiinţifice ale USMF „N. Testemiţanu". 2011; 3(12): 104–109
6. Bengtsson K., et al. Risk of cardiac rhythm disturbances and aortic regurgitation in different spondyloarthritis subtypes in comparison with general population: a register— based study from Sweden. Ann Rheum Dis. 2018; 77(4): 541–548. doi:10.1136/ annrheumdis— 2017–212189.
7. Аортит при анкилозирующем спондилите: возможности диагностики и лечения / А.А. Годзенко, А.Г. Бочкова, О.В. Мухортова [и др.] // Научно— практическая ревматология. — 2013. — Т. 51, № 4. — С. 451–455. — EDN RCEKAL.
8. Owlia M.B., Mostafavi Pour Manshadi S.M., Naderi N. Сердечные проявления ревматологических заболеваний: обзорная статья. ISRN Rheumatol. 2012; 2012: 463620. doi:
9. Эрдес Ш.Ф. Основные принципы терапии анкилозирующего спондилита (болезни Бехтерева). Научно— практическая ревматология. 2013; 51(6): 685–95.
10. Bartoloni E., Alunno A., Valentini V., et al. Targeting Inflammation to Prevent Cardiovascular Disease in Chronic Rheumatic Diseases: Myth or Reality? Front Cardiovasc Med 2018; (5): 177.

11. Клинический случай тяжелой недостаточности аортального клапана вследствие анкилозирующего спондилита / Н.В. Реброва, А.С. Крапивина, Н.Н. Связова [и др.] // Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины. — 2025. — Т. 40, № 1. — С. 166–176. — DOI 10.29001/2073–8552— 2025— 40— 1— 166–176. — EDN BTWKNA.
12. Трудности подбора генно— инженерной терапии у пациента с поражением сердечно— сосудистой системы при анкилозирующем спондилите (болезни Бехтерева) / И.З. Гайдукова, И.В. Сидорчук, А.Л. Чудинов, О.В. Инамова // РМЖ. Медицинское обозрение. — 2024. — Т. 8, № 2. — С. 89–93. — DOI 10.32364/2587–6821– 2024– 8– 2– 6. — EDN AJTXJB.
13. Matsuki T., Isoda K., Horai R., et al. Involvement of tumor necrosis factor— α in the development of T cell— dependent aortitis in interleukin— 1 receptor antagonist— deficient mice. Circulation. 2005; 112:1323–31. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.105.564658
14. Сайфутдинов Р.Г., Ахунова Р.Р., Сибгатулин Т.Б., Семенова О.М. Анкилозирующий спондилит (клинический случай). Дневник казанской медицинской школы. 2015; 1: 58–71.
15. Акрамова Н.Т. Изменения в сердечно сосудистой системе у больных с анкилозирующим спондилоартритом / Н.Т. Акрамова, Г.Б. Саидрасулова // Электронный инновационный вестник. — 2020. — № 1(12). — С. 18–23. — EDN YIENON.
16. Частота и тяжесть внескелетных проявлений анкилозирующего спондилита / А.А. Годзенко, А.Г. Бочкова, О.А. Румянцева [и др.] // Научно-практическая ревматология. — 2017. — Т. 55, № 2. — С. 169–176. — DOI 10.14412/1995–4484– 2017–169–176. — EDN YSTSTL.
17. Johnsen K., Mähönen M., Lunde P. Prevalence estimation and follow— up of aortic regurgitation subjects in a Norwegian Sami population. Scand Cardiovasc J 2009; 43: 176–80.
18. Moyssakis I., Gialafos E., Vassiliou V.A., Boki K., Votteas V., Sfikakis P.P., Tzelepis G.E. Myocardial performance and aor tic elasticity are impaired in patients with ankylosing spondylitis. Scand J Rheumatol. 2009; 38(3): 216–221.
19. Roldan C.A., Chavez J., Wiest P.W. Aortic root disease associated with ankylosing spondylitis. J.Am. Col. Cardiol. 1998, 32(5): 1397–1404
20. Аортит — немое проявление, серьезные последствия / Н.В. Кондрикова, О.А. Трубникова, А.И. Герман [и др.] // Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний. — 2017. — Т. 6, № 4. — С. 148–154. — EDN ZTNHEV.
21. Рабочая группа по диагностике и лечению заболеваний аорты Европейского общества кардиологов Рекомендации ESC по диагностике и лечению заболеваний аорты 2014 // Российский кардиологический журнал. — 2015. — Т. 20, № 7. — С. 7–72. — EDN UCAZ
22. Devereux R.B., de Simone G., Arnett D.K., Best L.G., Boerwinkle E., Howard B.V., Kitzman D., Lee E.T., Mosley T.H. Jr., Weder A., Roman M.J. Normal limits in relation to age, body size and gender of two- dimensional echocardiographic aortic root dimensions in persons ≥15 years of age. Am J. Cardiol. 2012; 110: 1189–1194.
23. Kalsch H., Lehmann N., Mohlenkamp S., Becker A., Moebus S., Schmermund A., Stang A., Mahabadi A.A., Mann K., Jockel K.H., Erbel R., Eggebrecht H. Body- surface adjusted aortic reference diameters for improved identification of patients with thoracic aortic aneurysms: results from the population-based Heinz Nixdorf Recall study. Int J Cardiol. 2013; 163: 72–78.
24. Rogers I.S., Massaro J.M., Truong Q.A., Mahabadi A.A., Kriegel M.F., Fox C.S., Thanassoulis G., Isselbacher E.M., Hoffmann U., O'Donnell C.J. Distribution, determinants, and normal reference values of thoracic and abdominal aortic diameters by computed tomography (from the Framingham Heart Study). Am J. Cardiol. 2013; 111: 1510–1516.
25. Vriz O., Driussi C., Bettio M., Ferrara F., D'Andrea A., Bossone E. Aorticrio— dimensions, and stiffness in healthy subjects. Am J Cardiol. 2013. 112: 1224–1229.
26. Пристром М.С. Взгляд на проблему преждевременного старения: подходы к профилактике / М.С. Пристром, М.В. Штонда, И.И. Семененков // Лечебное дело: научно-практический терапевтический журнал. — 2021. — № 1(76). — С. 5–24. — EDN MSIOAR.
27. Гайдукова И.З., Ребров А.П., Коротаева Т.В. и др. Ремиссия при аксиальных спондилоартритах — определение и инструменты оценки (рекомендации Экспертной группы по изучению спондилоартритов при Общероссийской общественной организации «Ассоциация ревматологов России»). Научно— практическая ревматология. 2018; 56(1): 10–14.
28. Novaro G.M., Erim T., Pinski S.L. Spondyloarthropathy — associat ed aortitis and massive thickening of the aortic— mitral curtain: diagnosis by echocardiography. Cardiology 2006; 106: 98–101.
29. Янышева А.В. Псориатический артрит и риск развития кардиоваскулярной патологии / А.В. Янышева, В.В. Бадокин // Сибирский медицинский журнал (Иркутск). — 2008. — Т. 81, № 6. — С. 8–13. — EDN JWBSSV.
30. Klingberg E., Sveä lv B., Tä ng M., et al. Aortic regurgitation is common in ankylosing spondylitis: Time for routine echocardiography evaluation? Am J Med. 2015 Nov; 128(11): 1244–50. doi: 10.1016/j.amjmed.2015.04.032. Epub 2015 Jun 4.
31. Heslinga S.C., et al. High Prevalence of Cardiac Disease in Patients with Ankylosing Spondylitis 2015 ACR\ARHR Annual Meeting. September 29, 2015. 30. Van der Linden S, Valk
32. Slobodin G., Khateeb A., Rimar D. et al. Aortitis in patients with psoriatic arthropathy: report of two cases and review of the literature. Rheumatol Rep 2014; 6(1): 5579.
33. Ребров А.П. Кардиоваскулярная патология у больных анкилозирующим спондилитом / А.П. Ребров, И.З. Гайдукова, Д.А. Поддубный // Научно-практическая ревматология. — 2012. — Т. 50, № 2. — С. 100–105. — EDN OYLRGH.
34. Groppa L., et al. Actualities in Cardiac Disorders in Patients with Ankylosing Spondylitis. Curierul Medical. 2011; 1(319): 3–6.
35. Chetrit M., Khan M.A., Kapadia S. State of the art management of aortic valve disease in ankylosing spondylitis. Curr. Rheumatol. Rep. 2020; 22(6): 23
36. Brunner F., Kunz A., Weber U., Kissling R. Ankylosing spondylitis and heart abnormalities: do cardiac conduction disorders, valve regurgitation and diastolic dysfunction occur more often in male patients with diagnosed ankylosing spondylitis for over 15 years than in the normal population. Clin Rheumatol. 2006 Feb; 25(1): 24–9. doi: 10.1007/s10067– 005– 1117– 6. Epub 2005 Oct 25.
37. Василенко Е.А., Мазуров В.И., Гайдукова И.З. и др. Влияние интерлейкина-17 на патогенез и риски развития сердечно-сосудистых заболеваний при спондилоартритах. РМЖ. 2020; 11:39–42.

38. Прогрессирование патологии аорты и клапанов сердца у больных анкилозирующим спондилитом / А.А. Годзенко, Ю.О. Корсакова, О.А. Румянцева [и др.] // Научно— практическая ревматология. — 2017. — Т. 55, № 5. — С. 509–513. — DOI 10.14412/1995–4484–2017– 509–513. — EDN YPXQWB.
39. Eder L., Sadek M., McDonald— Blumer H., Gladman D.D. Aortitis and spondyloarthritis — an unusual presentation: case report and review of the literature. Semin Arthritis Rheum. 2010 Jun; 39(6): 510– 4. doi: 10.1016/j.semarthrit.2008.11.004. Epub 2009 Feb 13. PMID: 19217648.
40. Zhao S.S., Pittam B., Harrison N.L., Ahmed A.E., Goodson N.J., Hughes D.M. Diagnostic delay in axial spondyloarthritis: a systematic review and meta-analysis. Rheumatology (Oxford). 2021; 60(4): 1620–1628.
41. Looi J., Pui K., Hart H. et al. Valvulitis and aortitis associated with ankylosing spondylitis: early detection and monitoring response to therapy using cardiac magnetic resonance imaging. Int J Rheum Dis 2011; 14: 56–8.
42. Акрамова Н.Т. Исследование поражения сердечно-сосудистой системы у больных с анкилозирующим спондилоартритом / Н.Т. Акрамова, Г.Б. Саидрасулова // Электронный инновационный вестник. — 2020. — № 1(12). — С. 24–31. — EDN IZLPFQ.
43. Godzenko A., Korsakova Y., Bochkova A., et al. Progression of aortic and valve abnormalities in patients with ankylosing spondylitis. Annual European Congress of Rheumatology EULAR; 2016, Abstracts. AB0666.
44. Kawasuji M., Hetzer R., Oelert H., Stauch G., Borst H.G. Aortic valve replacement and ascending aorta replacement in ankylosing spondylitis: report of three surgical cases and review of the literature. Thorac Cardiovasc Surg. (1982) 30: 310–4. doi: 10.1055/s– 2007–1022414
45. Stamp L., Lambie N., O'Donnell J. HLA–B27 associated spondyloarthropathy and severe ascending aortitis. J. Rheumatol. (2000) 27: 2038–40.
46. Derakhshan M.H., Goodson N.J., Packham J.C. et al. Increased Risk of Hypertension Associated with Spondyloarthritis Disease Duration: Results from the ASAS—COMOSPA Study. J. Rheumatol. 2019; 46(7): 701–709. DOI: 10.3899/jrheum.180538.
47. Ramiro S., Nikiphorou E., Sepriano A. et al. ASAS–EULAR recommendations for the management of axial spondyloarthritis: 2022 update. Ann Rheum Dis. 2023; 82(1): 19–34. DOI: 10.1136/ard–2022–223296.
48. Ревматология. Фармакотерапия без ошибок: руководство для врачей. Под ред. Мазурова В.И., Лесняк О.М. М.: Е- ното; 2017.
49. Гайдукова И.З., Ребров А.П., Лапшина С.А. и др. Применение нестероидных противовоспалительных препаратов и генно-инженерных биологических препаратов для лечения аксиальных спондилоартритов. Рекомендации экспертной группы по изучению спондилоартритов при Общероссийской общественной организации «Ассоциация ревматологов России». Научно-практическая ревматология. 2017; 55(5): 474–484. DOI: 10.14412/1995–4484–2017–474–484.
50. Гайдукова И.З. Кардиоваскулярная патология при спондилоартритах клинико-функциональные взаимосвязи, особенности течения и лечения: специальность 14.01.04 «Внутренние болезни»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора медицинских наук / Гайдукова Инна Зурабиевна. — Саратов, 2016. — 22 с. — EDN ZQICSP.
51. Кардиоваскулярная патология при спондилоартритах (обзор литературы) Корой П.В., Гладких Н.Н., Ягода А.В., Дудов Т.Р., Козакова С.А. Медицинский алфавит. 2024. № 29. С. 56–60.

© Богатырева Валентина Александровна (wala.miller1987@mail.ru); Морова Наталия Александровна (nataliya-morova@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.07

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ НАИБОЛЕЕ ИНФОРМАТИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ И КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ОПИСАНИЯ ЖИДКОСТНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ, ОСЛОЖНЯЮЩИХ ТЕЧЕНИЕ ОСТРОГО ДЕСТРУКТИВНОГО ПАНКРЕАТИТА

USE OF A MATHEMATICAL MODEL TO IDENTIFY THE MOST INFORMATIVE ULTRASONIC AND CRYSTALLOGRAPHIC FEATURES TO DESCRIBE FLUID FORMATIONS COMPLICATING THE COURSE OF ACUTE DESTRUCTIVE PANCREATITIS

A. Gorpinich
R. Shatalov

Summary.The aim of this study was to explore the feasibility of using a mathematical model to identify the most informative ultrasound and crystallographic features for describing fluid formations complicating acute destructive pancreatitis (ADP). A scoring system for evaluating the crystallographic pattern of fluid formations and ultrasound data for ADP complicated by the development of fluid formations was developed in a group of 36 patients. To differentiate fluid formations complicating ADP, we performed pancreatic ultrasound, followed by crystallographic evaluation of the fluid formation aspirate and evaluation of the resulting data using a scoring system. A multiparameter linear mathematical model was used to develop the scoring system. This mathematical model allows us to identify the most informative ultrasound and crystallographic features describing fluid formations that complicate the course of acute destructive pancreatitis, assign points to each feature, and determine the role of the sum of these points in the differential diagnosis of fluid formations (acute pseudocyst, acute fluid collection, pancreatic abscess). The mathematical model used allowed us to identify the most informative ultrasound and crystallographic features describing fluid formations that complicate the course of acute destructive pancreatitis, assign points to each feature, and determine the role of the sum of these points in the differential diagnosis of fluid formations (acute pseudocyst, acute fluid collection, pancreatic abscess). Timely diagnosis of these complications allows us to determine the optimal treatment strategy for patients at an early stage of their development, depending on the nature of the fluid formation.

Keywords: mathematical model, acute destructive pancreatitis, differential diagnosis of fluid formations.

Горпинич Александр Борисович
доктор медицинских наук, профессор, ФГАОУ ВО Государственный университет просвещения, г. Москва
doc.goralex@mail.ru
Шаталов Роман Петрович
кандидат медицинских наук, врач-хирург, БУЗ Орловской области Орловская областная клиническая больница, г. Орел
shatalovrp@mail.ru

Аннотация. Целью исследования явилось изучение возможности применения математической модели для выявления наиболее информативных ультразвуковых и кристаллографических признаков описания жидкостных образований, осложняющих течение острого деструктивного панкреатита (ОДП). В группе из 36 пациентов, была создана бальная система оценки кристаллографической картины жидкостных образований и данных УЗИ при ОДП, осложненном развитием жидкостных образований. Для дифференциальной диагностики жидкостных образований, осложняющих течение ОДП выполняли УЗИ поджелудочной железы с последующей кристаллографической оценкой аспирата жидкостного образования и оценкой полученных данных по бальной системе. С целью разработки бальной системы нами использована многопараметрическая линейная математическая модель. Данная математическая модель позволяет выявить наиболее информативные ультразвуковые и кристаллографические признаки описания жидкостных образований, осложняющих течение ОДП, присвоить баллы каждому из признаков, определить роль суммы этих баллов в дифференциальной диагностике жидкостных образований (острая ложная киста, острое скопление жидкости, панкреатический абсцесс). Использованная математическая модель позволила выявить наиболее информативные ультразвуковые и кристаллографические признаки описания жидкостных образований, осложняющих течение ОДП, присвоить баллы каждому из признаков, определить роль суммы этих баллов в дифференциальной диагностике жидкостных образований (острая ложная киста, острое скопление жидкости, панкреатический абсцесс). Своевременная диагностика указанных осложнений позволяет на ранних сроках их развития определить оптимальную тактику лечения больных в зависимости от природы жидкостного образования.

Ключевые слова: математическая модель, острый деструктивный панкреатит, дифференциальная диагностика жидкостных образований.

Введение

В настоящее время диагностика и лечение острого панкреатита продолжают оставаться одними из самых сложных и дискутабельных разделов неотложной хирургии органов брюшной полости [1,2]. При этом, данные литературы свидетельствуют о прогрессирующем росте заболеваемости и возрастании числа больных с острым деструктивным панкреатитом (ОДП) [3,4]. В то же время отсутствуют четкие рекомендации по дифференцированию жидкостных образований при ОДП, т.к. ведущие клинические и лабораторные проявления различных осложнений острого панкреатита схожи, а традиционно используемые методы инструментальной диагностики не всегда позволяют достоверно дифференцировать форму ОДП и жидкостных образований, осложняющих его течение [5,6]. Их дифференцировка важна, т.к. лечение отличается в зависимости от типа скопления [7, 8].

Одним из наиболее перспективных направлений оптимизации анализа медицинских данных, является создание математических моделей прогнозирования [9].

Математическое моделирование представляет собой систему математических выражений, описывающих свойства, взаимосвязи, структурные и функциональные параметры объектов моделирования [10].

Цель исследования

Изучить возможности применения математической модели для выявления наиболее информативных ультразвуковых и кристаллографических признаков описания жидкостных образований, осложняющих течение острого деструктивного панкреатита.

Материал и методы исследования

Проведено исследование по изучению применения математической модели для выявления наиболее информативных ультразвуковых и кристаллографических признаков описания жидкостных образований, осложняющих течение острого деструктивного панкреатита.

В группе из 36 пациентов, была создана бальная система оценки кристаллографической картины жидкостных образований и данных УЗИ при ОДП, осложненном развитием жидкостных образований.

Для дифференциальной диагностики жидкостных образований, осложняющих течение ОДП выполняли УЗИ поджелудочной железы с последующей кристаллографической оценкой аспирата жидкостного образования и оценкой полученных данных по бальной системе. С целью разработки бальной системы нами использована многопараметрическая линейная математическая модель:

$$Y(x_1, x_2, \ldots x_{141}) = C_0 + \sum_{i=1}^{141} C_i * x_i,$$

где: $Y(..)$ — вычисленные баллы больного; x_i — независимая переменная заболевания; C_i — коэффициенты многопараметрической линейной математической модели.

Данная математическая модель позволяет выявить наиболее информативные ультразвуковые и кристаллографические признаки описания жидкостных образований, осложняющих течение ОДП, присвоить баллы каждому из признаков, определить роль суммы этих баллов в дифференциальной диагностике жидкостных образований (острая ложная киста, острое скопление жидкости, панкреатический абсцесс).

Мы ставили оптимизационную многофакторную задачу по целям:

1) Наименьшее число значимых коэффициентов многопараметрической линейной математической модели, описывающей три группы заболеваний;
2) В среднем коэффициенты многопараметрической линейной математической модели по абсолютной величине должны иметь минимально возможное значение;
3) Наименьшее отклонение суммарного числа баллов больного от средней величины по группе заболевания;
4) Наибольшее возможное удаление средних баллов по группе заболеваний;
5) Равномерное удаление средних баллов по группе заболеваний друг от друга.

Пункты целевой функции оптимизационной задачи расставлены по степени важности (величине веса в целевой функции).

Программа оптимизации многофакторной математической модели написана на языке Pascal в интегрированной системе Delphi-7. Используется метод штрафных функций и рандомизации исходных данных для анализа устойчивости вычисленных коэффициентов многопараметрической математической модели. Сама программа состоит из двух основных блоков:

а) блок случайного перебора параметров математической модели, выбор наилучшего набора параметров модели и передача его в блок регулярного поиска;
б) блок регулярного поиска, работающий по методу конфигураций Розенброка (иногда называют

«метод вращения осей координат»), являющийся очень эффективным в случае сложных многопараметрических задач оптимизации.

Результаты исследования и их обсуждение

При проведении УЗИ поджелудочной железы определяли количество жидкостных образований, контуры, наличие капсулы, форму, эхогенность структуры жидкостного образования, ее однородность и оценивади указанные показатели следующим образом в баллах:

- наличие одного очага жидкостного образования — 1 балл;
- наличие множественных жидкостных образований — 3 балла;
- четкие ровные контуры жидкостного образования — 1 балл;
- четкие неровные контуры жидкостного образования — 2 балла;
- нечеткие контуры жидкостного образования — 3 балла;
- нечеткие и неровные контуры жидкостного образования — 4 балла;
- определяется капсула жидкостного образования — 2 балла;
- капсула жидкостного образования не визуализируется — 3 балла;
- капсула жидкостного образования утолщена — 4 балла;
- округлая форма жидкостного образования — 1 балл;
- овальная форма жидкостного образования — 2 балла;
- неправильная форма жидкостного образования — 4 балла;
- гиперэхогенность структуры жидкостного образования — 2 балла;
- гипоэхогенность или изоэхогенность структуры жидкостного образования — 3 балла;
- неоднородная эхогенность структуры жидкостного образования — 4 балла;
- отсутствие включений в структуре жидкостного образования — 1 балл;
- наличие равномерно расположенных включений в структуре жидкостного образования — 2 балла;
- наличие единичных беспорядочно расположенных включений в структуре жидкостного образования — 3 балла;
- наличие множественных беспорядочно расположенных включений в структуре жидкостного образования — 4 балла.

Полученные при оценке результатов УЗИ баллы суммировали. Затем проводили кристаллографическое исследование аспирата жидкостного образования. При этом определяли соотношение площади белковой зоны фации к общей площади фации, расположение трещин, однородность зоны кристаллизации и оценивали указанные показатели следующим образом в баллах:

- соотношение площади белковой зоны к общей площади фации меньше 0,4–1 балл;
- соотношение площади белковой зоны к общей площади фации от 0,4 до 0,6–2 балла;
- соотношение площади белковой зоны к общей площади фации больше 0,6–3 балла;
- радиальное расположение трещин по всей площади фации — 1 балл;
- хаотичное расположение трещин на площади, составляющей до 10 % площади фации — 2 балла;
- хаотичное расположение трещин на площади, составляющей 20–50 % площади фации — 3 балла;
- хаотичное расположение трещин на площади, превышающей 50 % площади фации — 4 балла;
- однородная зона кристаллизации — 1 балл;
- наличие в зоне кристаллизации одного участка другого цвета и/или структуры на площади менее или равной 25 % площади зоны кристаллизации — 2 балла;
- наличие в зоне кристаллизации одного участка другого цвета и/или структуры на площади более 25 % и менее 50 % площади зоны кристаллизации — 3 балла;
- наличие в зоне кристаллизации двух и более участков другого цвета и/или структуры — 4 балла.

Полученные при оценке результатов кристаллографического исследования баллы суммировали. При сумме баллов, полученных при оценке результатов УЗИ поджелудочной железы, от 7 до 11 и сумме баллов, полученных при оценке результатов кристаллографического исследования, от 3 до 5 диагностировали острую ложную кисту. При сумме баллов, полученных при оценке результатов УЗИ поджелудочной железы, от 12 до 16 и сумме баллов, полученных при оценке результатов кристаллографического исследования, от 6 до 8 диагностировали острое скопление жидкости. При сумме баллов, полученных при оценке результатов УЗИ поджелудочной железы, от 17 до 23 и сумме баллов, полученных при оценке результатов кристаллографического исследования, от 9 до 11 диагностировали панкреатический абсцесс. В ходе исследования необходимо проводить оба способа исследования, так как любое из них, выполненное отдельно, является недостаточно информативным.

В результате нашего исследования 15 пациентов были отнесены в группу с острой ложной кистой, 12 пациентов в группу с острым скоплением жидкости и 9 пациентов — с панкреатическим абсцессом. Поставленный диагноз во всех случаях совпал с заключительным клиническим диагнозом.

Заключение

Использованная математическая модель позволила выявить наиболее информативные ультразвуковые и кристаллографические признаки описания жидкостных образований, осложняющих течение ОДП, присвоить баллы каждому из признаков, определить роль суммы этих баллов в дифференциальной диагностике жидкостных образований (острая ложная киста, острое скопление жидкости, панкреатический абсцесс). Своевременная диагностика указанных осложнений позволяет на ранних сроках их развития определить оптимальную тактику лечения больных в зависимости от природы жидкостного образования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуликян Г.Н., Пахомова Р.А., Козлов В.В. Применение методики атомно-силовой микроскопии для сравнения острого панкреатита средней тяжести и тяжелого течения в ранние сроки заболевания // Доказательная гастроэнтерология. 2025. Т.14. №3. С.29–34. https://doi.org/10.17116/dokgastro20251403129
2. Алиев С.А., Алиев Э.С. Малоинвазивные технологии в хирургии инфицированного панкреонекроза: возможности и перспективы// Вестник хирургии имени И.И. Грекова. 2017. Т.176. №6. С.106–110. https://doi.org/10.24884/0042-4625-2017-176-6-106-110
3. Гуликян Г.Н., Швец Л.И. Актуальные вопросы диагностики деструктивного острого панкреатита // Московский хирургический журнал. 2024. №2. С.116–123. https://doi.org/10.17238/2072-3180-2024-2-116-123
4. Мальцев В.О., Яшнов А.А., Коновалова О.Г., Юмцунова Ч., Черешнева О.И., Вдовина М.Г. Проблемы современной диагностики острого панкреатита (обзор) // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. 2024. — №04/2. — С. 183–187 DOI 10.37882/2223–2966.2024.4–2.24
5. Ремизов С.И., Андреев А.В., Дурлештер В.М., Габриэль С.А., Засядько О.В. Модифицированный метод чрескожного дренирования острых некротических скоплений у пациентов с инфицированным панкреонекрозом //Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова. 2023. №11. С.47–55. https://doi.org/10.17116/hirurgia202311147
6. Эктов В.Н., Ходорковский М.А., Федоров А.В. Лучевые методы визуализации в диагностике и оценке тяжести острого панкреатита. Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология // 2021.Т.195. №11. С. 42–51. DOI: 10.31146/1682–8658-ecg-195-11-42-51
7. Хоха В.М. Скопления при остром панкреатите // Новости хирургии. 2013. Т. 21, № 2. С. 111–118. https://elib.vsmu.by/handle/123/4715
8. Acute pancreatitis classification working group. Classification of acute pancreatitis-2012: revision of the Atlanta classification and definition by international consensus / P.A. Banks, T.L. Bollen, C. Dervenis, H.G. Gooszen, C.D. Johnson, M.G. Sarr, G.G. Tsiotos, S.S. Vege // Gut. — 2013. — Vol. 1, № 62. — P. 102–111. https://doi.org/10.1136/gutjnl-2012-302779
9. Цуканов А.В., Иванов И.С., Горюшкин Е.И., Пономарева И.В. Методы прогнозирования и моделирования в хирургии // Современные проблемы науки и образования. 2023. №4. С. 1–10. DOI: https://doi.org/10.17513/spno.32747
10. Валитов Д.Р., Кубряк А.И., Беляева М.Б. Сравнительный анализ MATLAB и Mathcad в контексте математического моделирования // Научное обозрение. Технические науки. 2024. № 3. С. 5–9; URL: https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1468 (дата обращения: 29.05.2025). DOI: https://doi.org/10.17513/srts.1468

© Горпинич Александр Борисович (doc.goralex@mail.ru); Шаталов Роман Петрович (shatalovrp@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.11

ЛЕЧЕНИЕ СОЛИТАРНОГО МЕТАСТАЗА В ЛЕГКОМ МЕТОДОМ ЛОКАЛЬНОЙ МИКРОВОЛНОЙ АБЛЯЦИИ ПОД КОНТРОЛЕМ ПДКТ В ОТДЕЛЕНИИ АНГИОГРАФИИ. КЛИНИЧЕСКИЙ ПРИМЕР

TREATMENT OF A SOLITARY LUNG METASTASIS USING LOCAL MICROWAVE ABLATION UNDER PDCT GUIDANCE IN THE ANGIOGRAPHY DEPARTMENT. A CLINICAL CASE REPORT

A. Zagorulko
M. Chernyaev
G. Nistratov
S. Rykov

Summary. Distant metastasis to internal organs is the most common and difficult to treat tumor process. Distant lesions include the liver, lungs, and brain.

Historically, surgical resection of a portion of the affected lung has been the gold standard of treatment for patients with lung metastases. However, even patients who have undergone complete resection have a high recurrence rate and may require multiple surgeries [1]. Repeat thoracotomy increases surgical risks and results in the removal of normally functioning lung tissue. Surgery may not be possible in patients with severe comorbidities and limited pulmonary reserve. Thus, this technique is promising, effective, and technically feasible for use in many institutions across the country.

Objective: To evaluate the safety and efficacy of treating patients with inoperable recurrent metastatic lung tumors using localized microwave therapy.

Keywords: lung metastasis, flat-panel computed tomography (CT), angiography, and microwave ablation.

Загорулько Алексей Иванович
кандидат медицинских наук,
врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению, врач сердечно-сосудистый хирург, №2 филиал Онкоцентр №1 ГКБ имени С.С. Юдина ДЗ Москвы;
Ассистент, ФГАОУ ВО Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва
alexrus80@yandex.ru
Черняев Михаил Викторович
кандидат медицинских наук, доцент,
Российский университет дружбы народов;
врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению, ФГБУ «НМИЦ ТПМ», г. Москва
Нистратов Григорий Павлович
кандидат медицинских наук,
врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению, №2 филиал Онкоцентр №1 ГКБ имени С.С. Юдина ДЗ Москвы
hyppokrat-g@mail.ru
Рыков Станислав Павлович
врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению, №2 филиал Онкоцентр №1 ГКБ имени С. С. Юдина ДЗ Москвы
stanislas.rukov@yandex.ru

Аннотация. Наиболее частым и трудно поддающимся лечению опухолевого процесса является отдаленное метастазирование во внутренние органы. Отдаленными поражениями являются печень, легкие и головной мозг.

Исторически у пациентов с метастазами легких золотым стандартом лечения валяется хирургическая резекция части пораженного легкого. Однако даже у пациентов, перенёсших полную резекцию, высока частота рецидивов, и может потребоваться несколько операций [1]. Повторная торакотомия повышает операционные риски и приводит к удалению нормально функционирующей лёгочной ткани. Хирургическое вмешательство может быть невозможно у пациентов с тяжёлыми сопутствующими заболеваниями и ограниченным лёгочным резервом. Таким образом, данная методика перспективна, эффективна и технически возможна во многих учреждениях страны.

Цель: оценка безопасности и эффективности лечения пациентов с неоперабельными повторными метастатическими опухолями легких с помощью местных локальных микроволновых воздействий.

Ключевые слова: метастаз в легкое, плоскодетекторная компьютерная томография (ПДКТ), ангиография, микроволновая абляция.

Актуальность

Чрескожная абляция под визуальным контролем — это минимально инвазивный метод лечения солидных опухолей. В 2000 году Дюпюи и соавт. [2] сообщили о первом клиническом применении радиочастотной абляции для лечения первичного рака легких. Далее метод стал использоваться для лечения пациентов с первичными и вторичными опухолями легких, которым противопоказано хирургическое вмешательство. В исследовании проведенном Okan Akhan с соавторами у пациентов с метастазами в лёгких показатели общей выживаемости в течение одного, двух, трёх, четырёх и пяти лет составили 90 %, 73 %, 59 %, 55 % и 38 % соответственно [6]. Ленчиони и др. [7] сообщили, что общая выживаемость составила 92 % в течение одного года и 64 % в течение двух лет в группе из 20 пациентов с метастазами в лёгких. В другом исследовании, продемонстрировавшем долгосрочные результаты радиочастотной абляции метастазов в лёгких, общая выживаемость в течение трёх и пяти лет составила 60 % и 45 % соответственно [8].

Преимуществами чрескожной абляции является низкий риск осложнений, сохранение функции легких, поскольку окружающая паренхима легких не повреждается [3,4]. Данный метод полезен для пациентов с ограниченным лёгочным резервом, у больных, отказавшихся от проведения хирургического лечения, а также у пациентов с мультифокальными или двусторонними метастазами. Повторяемость процедуры является большим преимуществом (5). В первых статьях авторы использовали метод радиочастотной абляции, но в последнее десятилетие микроволновая абляция продемонстрировала преимущества, которые позволяют улучшить результаты лечения. Наиболее важными преимуществами являются создание более высоких температур. При воздействии микроволновым излучением температура в ткани превышает 150°C, в то время как при радиочастотной абляции максимальная температура составляет 100–120°C. Микроволновая абляция в меньшей степени зависит от эффекта теплоотведения, который возникает при расположении опухоли рядом с крупными кровеносными сосудами и отсутствует необходимость использования нейтрального (дисперсионного) электрода, без которого не обходится применение радиочастотной абляции.

Изначально процесс имплантации электрода в образование (опухоль) и результат абляции проводился под контролем компьютерной томографии (КТ). Это создавало некоторые неудобства в операции, поскольку кабинет КТ не предназначен для проведения оперативного лечения, а значит после «правильного» локального расположения иглы электрода в опухоли пациента необходимо было транспортировать в операционную. С развитием ангиографического оборудования и появления технологии плоскодетекторной компьютерной томографии (ПДКТ) [9] данное вмешательство стало возможным производить в условиях рентгеноперационной. Грамотно выполненное ПДКТ на ангиографическом аппарате улучшает результативность применения этого метода лечения. Все вмешательства проходят с обязательным выполнением плоскодетекторной компьютерной томографии, так как она обеспечивает отличную навигацию и снижает объем вводимого контрастного вещества [10].

Клинический пример

В данном литературном обзоре мы представляем клинический пример лечения пациента с солитарным метастазом правого легкого. Основным методом лечения проведена микроволновая абляции очага опухоли под контролем ПДКТ в условиях рентгенографической операционной.

Пациентка Х. с диагнозом саркома тела матки T2N0M0 II ст. Из анамненза: проведена экстирпация матки с придатками в 2004 году. Прогрессирование в 2012 году — появление метастазов в левом легком. В 2012г. — атипичная резекция верхней доли левого легкого. Прогрессирование в 2016 году — метастазы в правое легкое. 26.01.2016 г. — торакотомия справа, резекция верхней и нижней доли правого легкого. Прогрессирование в 2022 году — новообразование в правом легком. 11.10.2022 год — Краевая резекция нижней доли (S6) правого легкого. 18.11.2022 г. до 01.03.2023 г. — проведено 5 курсов ПХТ по схеме: доксорубицин 50–75 мг/м в 1-й день цикл 21 день. При выполнении КТ от 10.08.2025 года — прогрессирование, образование в области послеоперационных изменений правого легкого.

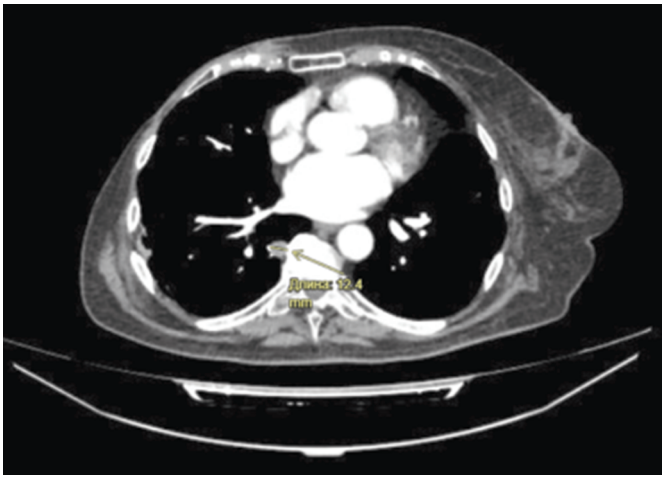


Рис. 1. Томограмма с образованием в нижней доле правого легкого

Онкологический консилиум от 16.09.2025 года, «учитывая прогрессирование заболевания, рекомендовано проведение микроволновой абляции солитарного образования».

Оперативное лечение

Проведен ЭТН (эндотрахеальный наркоз), положение пациента на животе. Под контролем ПДКТ заведен и позиционирован электрод в опухолевое образование правого лёгкого. На рисунке 2 представлена ангиографическая томографическая картинка расположения иглы в грудной полости и опухоли от абляционного аппарата.

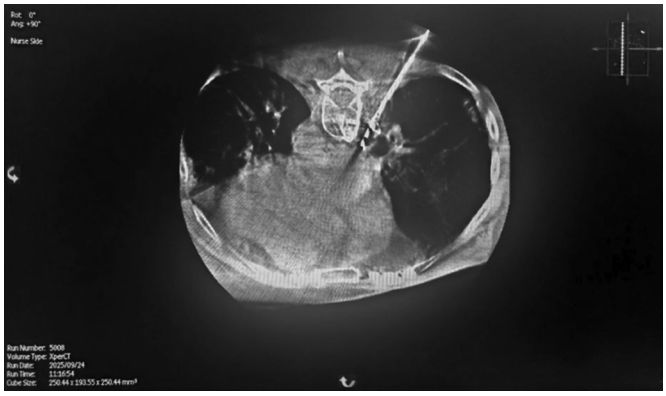


Рис. 2. ПДКТ-контроль позиционирование электрода в образовании

Проведена абляция (микроволновое воздействие) мощностью 80 Вт в течение 15 минут. Контроль зоны абляции с помощью ПДКТ — подтверждена зона абляции превышающая размер образования. После процедуры электрод удален, пункционный ход коагулирован (аблирован) в течение 60 секунд. При проведении контрольной ПДКТ признаков гемо и пневмоторакса не выявлено. Пациент переводится в палату пробуждения в сознании на самостоятельном дыхании.

Ранний послеоперационный период протекал без осложнений. В отделение проводилась симптоматическая и анальгетическая терапия. Пациентка выписана из стационара на 4-е сутки в удовлетворительном состоянии.

Через 1 месяц выполнена контрольная компьютерная томография органов грудной клетки, по результатам которой в S10 правого легкого субплеврально (паравертебрально) в области послеоперационных скобок — ранее определяемое образование округлой формы 12 мм трансформировалось в звездчатый участок фиброза 45,9х55,7 мм. Легкие резецированы. Отмечаются поствоспалительные фиброзные изменения.

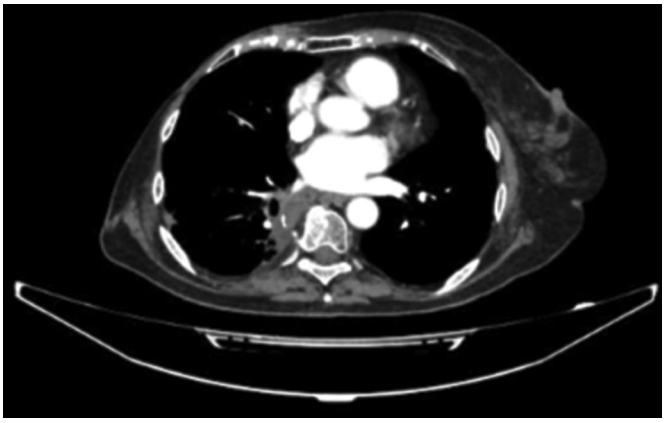


Рис. 3. Томограмма органов грудной клетки через 1 месяц после проведения микроволной абляции

Заключение

По своей сути микроволновое воздействие на пораженные ткани является передача энергии опухоли с захватом здоровых тканей. Под воздействием высокой температуры происходит денатурация всех белков и клеток, попавших в поле излучения. Распространение энергии в микроволновой игле происходи диппольно от кончика иглы к проксимальному ее сегменту на расстояние 2–3–4 см (это зависит от размера иглы). Механизм теплоотведения позволяет использование данного метода около крупных сосудов, например, разрешена абляция очагов в печени, находящихся возле воротной вены. В нашем клиническом примере был проведен междисциплинарный консилиум, где всеобщим мнением пришли к общему знаменателю — микроволновая абляция. Помимо выполненных ранее операций на грудной полости у этой пациентки, метастаз опухоли располагался в непосредственной близости возле позвоночного столба, рис 1. Избыточная термическая энергия могла привести к непоправимым последствиям.

Таким образом микроволновая абляция образований лёгких — это безопасный и эффективный метод лечения, который позволяет лечить пациентов с тяжелыми сопутствующими заболеваниями и ранее перенесенными операциями на легочной ткани без ухудшения вентиляционной функции с минимальным количеством тяжёлых осложнений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ketchedjian A., Daly B., Luketich J., Fernando H.C. Minimally invasive techniques for managing pulmonary metastases: video-assisted thoracic surgery and radiofrequency ablation. Thorac Surg Clin. 2006; 16:157–165. doi: 10.1016/j.thorsurg.2005.11.002.
2. Dupuy D.E., Zagoria R.J., Akerley W., Mayo-Smith W.W., Kavanagh P.V., Safran H. Percutaneous radiofrequency ablation of malignancies in the lung. AJR Am J Roentgenol. 2000; 174:57–59. doi: 10.2214/ajr.174.1.1740057.
3. Dupuy D.E., Goldberg S.N. Image-guided radiofrequency tumor ablation: challenges and opportunities-part II. J Vasc Interv Radiol. 2001; 12:1135–1148. doi: 10.1016/s1051-0443(07)61670-4.
4. Pereira P.L., Masala S. Standards of practice: guidelines for thermal ablation of primary and secondary lung tumors. Cardiovasc Intervent Radiol. 2012; 35:247–254. doi: 10.1007/s00270-012-0340-1

5. Hiraki T., Mimura H., Gobara H., et al. Repeat radiofrequency ablation for local progression of lung tumors: does it have a role in local tumor control? J Vasc Interv Radiol. 2008; 19:706–711. doi: 10.1016/j.jvir.2007.12.441.
6. Akhan O., Güler E., Akıncı D., Çiftçi T., Köse I.Ç. Radiofrequency ablation for lung tumors: outcomes, effects on survival, and prognostic factors. Diagn Interv Radiol. 2016 Jan-Feb;22(1):65–71. doi: 10.5152/dir.2015.14378. PMID: 26611111; PMCID: PMC4712901.
7. Lencioni R., Crocetti L., Cioni R., et al. Response to radiofrequency ablation of pulmonary tumours: a prospective, intention-to-treat, multicentre clinical trial (the RAPTURE study) Lancet Oncol. 2008; 9:621–628. doi: 10.1016/S1470-2045(08)70155-4.
8. Chua T.C., Sarkar A., Saxena A., Glenn D., Zhao J., Morris D.L. Long-term outcome of image-guided percutaneous radiofrequency ablation of lung metastases: an open-labeled prospective trial of 148 patients. Ann Oncol. 2010; 21:2017–2022. doi: 10.1093/annonc/mdq098.
9. A.I. Zagorulko, G.P. Nistratov, A.K. Golubcev, D.V. Kozlov, S.P. Rykov. The role of brachiocephalic artery angiography and FD-CT in the diagnosis of metastatic nodules of the neck and tumors of the carotid glomus. International Journal of Interventional Cardioangiology. 2024; 79 (4): 61–75. https://doi.org/10.24835/1727-818X-79-61.
10. A.I. Zagorulko, D.V. Kozlov, S.P. Rykov, S.Ch. Egodage. Stagewise treatment of kidney cancer — superselective embolization with the use of flat panel computed tomography and subsequent surgical resection. International Journal of Interventional Cardioangiology. 2022; 70 (3): 28–36. ISSN 2587–6198 (Online).

© Загорулько Алексей Иванович (alexrus80@yandex.ru); Черняев Михаил Викторович;
Нистратов Григорий Павлович (hyppokrat-g@mail.ru); Рыков Станислав Павлович (stanislas.rukov@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.17

КЛИНИКО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МРРШМ КАК ФАКТОРЫ ПРОГНОЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ ХИМИОЭМБОЛИЗАЦИИ МАТОЧНЫХ АРТЕРИЙ

CLINICAL AND MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF LOCALLY ADVANCED CERVICAL CANCER AS PREDICTORS OF THE EFFECTIVENESS OF UTERINE ARTERY CHEMOEMBOLIZATION

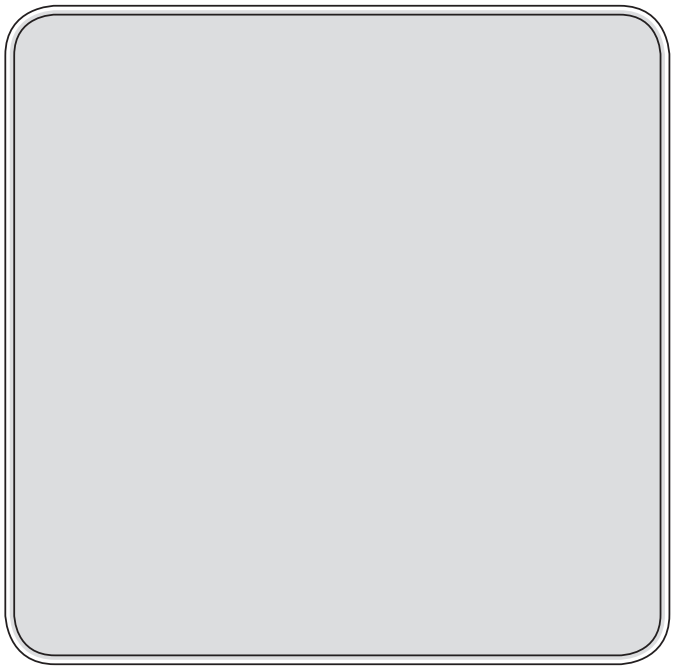
G. Guliyeva
L. Mkrtchyan
V. Kucherov
L. Krikunova
S. Ivanov
A. Kaprin

Summary. Locally advanced cervical cancer (LACC) remains a pressing problem in gynecological oncology, characterized by a high risk of relapse and progression even with standard chemoradiotherapy. Uterine artery chemoembolization (UAC) is considered a promising area of complex treatment, but its effectiveness is largely determined by the clinical and morphological characteristics of the tumor. *Materials and methods.* A retrospective and prospective study was conducted of 108 patients with stage IIA–IIIB LACC who underwent treatment in 2018–2022. The main group (n=60) received UAC followed by chemoradiotherapy (CRT), the control group (n=48) — CRT only. Efficacy was assessed according to RECIST 1.1 criteria, relapse-free survival (RFS) and overall survival (OS) — according to the Kaplan–Meier method. Univariate and multivariate regression analysis and ROC analysis were used to analyze prognostic factors. *Results*. The use of CEMA + CRT provided a significantly higher frequency of complete tumor regression (70.0 % versus 38.0 %; p = 0.001), a significant decrease in the SCC level and a decrease in the residual tumor volume. Three-year RFS was 73.4 % in the main group and 34.7 % in the control (p = 0.003). Independent unfavorable prognostic factors were stage IIIB, tumor volume > 80 cm^3, low differentiation degree (G3), adenocarcinoma and SCC level > 5.5 ng/ml. The constructed prognostic model showed high accuracy (AUC 0.78–0.82; sensitivity 72–80 %; specificity 73–75 %). *Conclusions*. Clinical and morphological characteristics of the tumor are of key importance in predicting the effectiveness of CEMA in patients with MRCC. Their comprehensive consideration allows identifying high-risk groups, personalizing treatment tactics, and justifying the use of CEMA as part of combined therapy programs.

Keywords: cervical cancer, uterine artery chemoembolization, clinical and morphological characteristics, relapse-free survival, SCC antigen, prognostic model.

Кулиева Гюнель Закир кызы
врач радиотерапевт, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба, филиал, ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр радиологии
gunelka2010@yandex.ru
Мкртчян Лиана Сирекановна
доктор медицинских наук, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба, филиал, ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр радиологии
Кучеров Валерий Владимирович
кандидат медицинских наук, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба, филиал, ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр радиологии
Крикунова Людмила Ивановна
доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник отделения реабилитации, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба, филиал, ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр радиологии
Иванов Сергей Анатольевич
доктор медицинских наук, профессор, член корреспондент РАН; директор, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба, филиал, ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр радиологии; ФГАОУ ВО Российский университет дружбы народов
Каприн Андрей Дмитриевич
доктор медицинских наук, академик РАН, генеральный директор, ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр радиологии; Российский университет дружбы народов; Московский научно-исследовательский онкологический институт им. П.А. Герцена, филиал, ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр радиологии

Аннотация. Местно-распространённый рак шейки матки (МРРШМ) остаётся актуальной проблемой онкогинекологии, характеризующейся высоким риском рецидивов и прогрессирования даже при применении стандартной химиолучевой терапии. Химиоэмболизация маточных артерий (ХЭМА) рассматривается как перспективное направление комплексного лечения, однако её эффективность во многом определяется клинико-морфологическими характеристиками опухоли. *Материалы и методы*. Проведено ретроспективно-проспективное исследование 108 пациенток с МРРШМ стадий IIA–IIIB, проходивших лечение в 2018–2022 гг. Основная группа (n=60) получала ХЭМА с последующей химиолучевой терапией (ХЛТ), контрольная группа (n=48) — только ХЛТ. Эффективность оценивалась по критериям



RECIST 1.1, безрецидивная (БРВ) и общая выживаемость (ОВ) — по методу Каплана–Майера. Для анализа прогностических факторов применялись одно- и многофакторный регрессионный анализ, ROC-анализ. *Результаты*. Применение ХЭМА+ХЛТ обеспечило достоверно более высокую частоту полной регрессии опухоли (70,0 % против 38,0 %; p=0,001), значимое снижение уровня SCC и уменьшение остаточного объёма новообразования. Трёхлетняя БРВ составила 73,4 % в основной группе и 34,7 % в контроле (p=0,003). Независимыми неблагоприятными факторами прогноза явились стадия IIIB, объём опухоли >80 см^3, низкая степень дифференцировки (G3), аденокарцинома и уровень SCC >5,5 нг/мл. Построенная прогностическая модель показала высокую точность (AUC 0,78–0,82; чувствительность 72–80 %; специфичность 73–75 %). *Выводы*. Клинико-морфологические характеристики опухоли имеют ключевое значение в прогнозировании эффективности ХЭМА у пациенток с МРРШМ. Их комплексный учёт позволяет выделять группы высокого риска, персонализировать тактику лечения и обосновывать применение ХЭМА в составе комбинированных программ терапии.

Ключевые слова: рак шейки матки, химиоэмболизация маточных артерий, клинико-морфологические характеристики, безрецидивная выживаемость, SCC-антиген, прогностическая модель.

Введение

Рак шейки матки (РШМ) остаётся одной из наиболее значимых медико-социальных проблем современной онкогинекологии. Несмотря на развитие программ скрининга и широкое внедрение вакцинации против вируса папилломы человека (ВПЧ), заболевание продолжает занимать одно из ведущих мест среди злокачественных новообразований женской репродуктивной системы [1, 2]. По данным Всемирной организации здравоохранения, ежегодно в мире выявляется свыше 600 тысяч новых случаев РШМ, при этом около 340 тысяч женщин умирают от данной патологии [3, 4]. В структуре онкологической заболеваемости у женщин РШМ занимает четвёртое место, уступая лишь раку молочной железы, колоректальному раку и раку лёгкого [5, 6].

Эпидемиологическая ситуация в Российской Федерации остаётся напряжённой. Так, в 2021 году зарегистрировано более 15 тысяч новых случаев РШМ, что составило 5,2 % в общей структуре злокачественных опухолей у женщин [7]. Примечательно, что более 60 % пациенток составляют женщины в возрасте до 50 лет, то есть в периоде активной репродуктивной и трудовой деятельности. Несмотря на некоторое снижение смертности, обусловленное улучшением диагностики и расширением доступности специализированной помощи, в 2021 году от РШМ умерли свыше 5,8 тысяч женщин [7].

Особое значение имеет проблема местнораспространённого рака шейки матки (МРРШМ), характеризующегося инвазией опухоли в параметрий, влагалище или регионарные лимфатические узлы. Более чем у 30 % пациенток заболевание впервые диагностируется на стадии III, причём около половины из них имеют признаки лимфогенного метастазирования [8, 9]. Прогноз у данной категории больных остаётся неблагоприятным даже при применении современных методов терапии, включающих дистанционную и внутриполостную лучевую терапию, химиолучевое и таргетное лечение. При больших размерах опухоли и вовлечении лимфатических узлов риск рецидива и прогрессирования значительно возрастает [10, 11]. Стандартом лечения в настоящее время является сочетанная химиолучевая терапия с использованием препаратов платины, однако её эффективность ограничена высокой токсичностью и отсутствием гарантированного долгосрочного контроля заболевания [12].

В поиске новых терапевтических решений перспективным направлением рассматривается химиоэмболизация маточных артерий (ХЭМА). Метод сочетает локальное введение химиопрепаратов с одновременной ишемизацией опухолевой ткани, что обеспечивает высокую локальную концентрацию цитостатиков при снижении системной токсичности и нарушении кровоснабжения новообразования [13, 14]. Первоначально ХЭМА применялась преимущественно для купирования кровотечений при гинекологических опухолях, однако в последние годы активно исследуется её роль как компонента предлучевой подготовки в рамках радикальных схем лечения [15, 16]. Вместе с тем остаются дискуссионными вопросы оптимального интервала между ХЭМА и химиолучевой терапией, её влияния на безрецидивную выживаемость и критериев отбора пациенток [17, 18].

При этом эффективность химиоэмболизации маточных артерий в составе комплексного лечения может существенно варьировать в зависимости от индивидуальных особенностей опухолевого процесса. Ключевую роль в прогнозировании исходов играют клинико-морфологические характеристики — стадия заболевания, объём и форма роста опухоли, степень её дифференцировки, морфологический вариант, уровень SCC и ВПЧ-статус. Их оценка необходима для отбора пациенток, которые могут получить наибольшую пользу от применения ХЭМА, а также для персонализации схем терапии.

Цель статьи

Анализ клинико-морфологических характеристик местно-распространённого рака шейки матки как факторов прогноза эффективности химиоэмболизации маточных артерий.

Материалы и методы

Исследование выполнено на базе отделения лучевых и комбинированных методов лечения гинекологических заболеваний МРНЦ им. А.Ф. Цыба — филиала ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России. Работа носила ретроспективно-проспективный характер и была направлена на оценку эффективности и переносимости комбинированного лечения местно-распространённого рака шейки матки (МРРШМ) с использованием химиоэмболизации маточных артерий (ХЭМА).

В исследование включены 108 женщин в возрасте от 24 до 74 лет с морфологически подтверждённым диагнозом рак шейки матки стадий IIA–IIIB (T2a–3bN0–1M0), проходивших лечение в 2018–2022 гг. Средний возраст в основной группе (ХЭМА+ХЛТ) составил 46,9 ± 11,3 года, в контрольной (ХЛТ) — 45,0 ± 10,1 года (p=0,368). Большинство пациенток (66,7 %) находились в репродуктивном возрасте до 49 лет. Все пациентки подписали информированное согласие. Протокол исследования был одобрен локальным этическим комитетом.

Пациентки были разделены на две группы:
- основная группа (n=60) — получали ХЭМА с последующим курсом сочетанной химиолучевой терапии (ХЛТ);
- группа контроля (n=48) — получали стандартную радикальную ХЛТ без этапа эмболизации.

Клинико-морфологическая характеристика пациенток

Регулярное наблюдение у гинеколога отмечали лишь 17,6 % больных, при этом каждая четвертая пациентка не посещала врача более 5 лет, что подтверждает высокий уровень запущенности заболевания.

Основные жалобы включали кровянистые выделения и профузные маточные кровотечения, которые встречались у 38,3 % пациенток основной группы и у 6,3 % группы контроля (p <0,05). У трёх женщин (5 %) диагноз РШМ был установлен во время беременности.

Стадия заболевания. Распределение стадий соответствовало классификациям FIGO (2009) и TNM (8-е издание):

IIA2 — 5 случаев (4,6 %);

IIB — 20 случаев (18,5 %);

IIIB — 83 случая (76,9 %).

Примечательно, что в основной группе чаще выявлялись пациентки с T2bN1M0 (43,3 % против 22,9 % в контроле, p=0,04).

Поражение регионарных лимфатических узлов выявлено у 73,3 % пациенток основной группы и у 62,5 % в группе контроля (p=0,29), причём двусторонний характер лимфогенного метастазирования отмечался у 68,2 % и 46,7 % больных соответственно. Морфологическая структура опухоли в целом характеризовалась преобладанием плоскоклеточного рака (90,7 %), в то время как аденокарцинома встречалась значительно реже (9,3 %). В основной группе доминировали опухоли со средней степенью дифференцировки (78,0 %), тогда как в контрольной чаще определялись высокодифференцированные формы (75,0 %; p <0,001).

По характеру роста в обеих группах преимущественно регистрировались смешанные формы опухоли (65,0 % и 72,9 % соответственно), реже эндофитные (18,7–30 %) и экзофитные (5–8 %). Варианты распространения процесса в большинстве случаев включали вагинально-параметральный и вагинально-параметрально-маточный тип инфильтрации (около 30–37 %), при этом двустороннее поражение параметриев диагностировано у 50% пациенток основной группы и у 62 % в группе контроля.

Средний объём опухоли по данным ультразвукового исследования составил 75,3 ± 24,4 см^3 в основной группе и 69,2 ± 24,2 см^3 в контрольной (p>0,05), наиболее часто регистрировались новообразования объёмом 50–80 см^3 (71–72 %). По данным магнитно-резонансной томографии объём опухоли также оказался несколько выше в основной группе (74,0 ± 31,5 см^3 против 53,2 ± 31,1 см^3), хотя различия не достигли статистической значимости (p=0,066).

Средний уровень опухолевого маркёра SCC до начала лечения составил 12,6 ± 17,3 нг/мл (0,41–70) в ос-

новной группе и 10,6 ± 12,0 нг/мл (0,8–33,7) в контрольной, статистически значимых различий не выявлено (p=0,707). Вирус папилломы человека высокого канцерогенного риска определялся у большинства больных: у 87,5 % в основной группе и у 84,6 % в контрольной. Наиболее часто встречался 16-й тип ВПЧ, который выявлялся в 38,3 % и 18,7 % случаев соответственно.

Среди факторов риска обращает на себя внимание высокая частота курения: регулярный стаж курения имели 47,2 % женщин, при этом каждая третья пациентка курила более 20 лет; различий между группами выявлено не было. Сопутствующая патология диагностирована у 65,8 % пациенток, чаще всего это были заболевания эндокринной (20,4 %) и сердечно-сосудистой системы (19,4 %). Основные характеристики отображены в сводной таблице 1.

Таблица 1.

Основные клинико-морфологические характеристики пациенток

Характеристика	Основная группа (ХЭМА+ХЛТ, n=60)	Контрольная группа (ХЛТ, n=48)	p-value
Возраст, лет (M±SD)	46,9 ± 11,3	45,0 ± 10,1	0,368
Пациентки <49 лет, %	72 %	62 %	н/д
Основные жалобы: кровотечения, %	38,30 %	6,30 %	<0,05
Стадия IIA2	5,00 %	2,10 %	<0,05
Стадия IIB	15,00 %	23,00 %	>0,05
Стадия IIIB (в т.ч. T2bN1M0)	80,0 % (T2bN1M0 — 43,3 %)	75,0 % (T2bN1M0 — 22,9%)	0,04*
Поражение лимфоузлов, %	73,30 %	62,50 %	0,29
Двустороннее поражение ЛУ, %	68,20 %	46,70 %	>0,05
Плоскоклеточный рак	88,00 %	94,00 %	0,507
Аденокарцинома	12,00 %	6,00 %	>0,05
Степень дифференцировки G1	10,00 %	75,00 %	<0,001
Степень дифференцировки G2	78,00 %	10,00 %	<0,001
Степень дифференцировки G3	3,00 %	8,00 %	0,403
Смешанная форма роста	65,00 %	72,90 %	>0,05
Эндофитная форма роста	30,00 %	18,70 %	>0,05
Экзофитная форма роста	5,00 %	8,30 %	>0,05
Объём опухоли (УЗИ), $см^3$ (M±SD)	75,3 ± 24,4	69,2 ± 24,2	>0,05
Объём 50–80 $см^3$, %	71,70 %	70,80 %	>0,05
SCC, нг/мл (M±SD)	12,6 ± 17,3	10,6 ± 12,0	0,707
ВПЧ (+), %	87,50 %	84,60 %	>0,05
Курение, %	47,00 %	46,00 %	>0,05
Сопутствующая патология, %	68,30 %	68,80 %	>0,05

Анализ клинико-морфологических характеристик показал, что группы были сопоставимы по возрасту, распространённости заболевания, форме роста опухоли, объёму по данным УЗИ и уровню SCC. Существенные различия отмечены по частоте профузных кровотечений, большей доле пациенток молодого возраста, по доле пациенток со стадией T2bN1M0 — перечисленные признаки больше в основной группе; а также по степени дифференцировки опухоли: в основной группе преобладали опухоли G2, тогда как в контрольной чаще встречались высокодифференцированные формы (G1).

Методика химиоэмболизации маточных артерий

Процедура выполнялась в условиях рентгеноперационной с использованием ангиографической установки. Доступ осуществлялся по методике Сельдингера через общую бедренную артерию под местной анестезией. После пункции и установки интродьюсера производилась катетеризация внутренней подвздошной артерии, затем — суперселективная катетеризация маточной артерии с обеих сторон с помощью микрокатетеров.

После подтверждения положения катетера ангиографически осуществлялась инфузия химиопрепарата — цисплатина в дозе 50 мг/$м^2$, разведённого в изотоническом растворе. Медленное введение препарата обеспечивало высокую локальную концентрацию цитостатика в опухолевом очаге при минимальном системном воздействии.

Завершающим этапом выполнялась эмболизация питающих сосудов с использованием йодсодержащего контрастного масляного препарата (липиодол), который создавал эффект «депо» для химиопрепарата и одновременно вызывал ишемию опухолевой ткани за счёт

прекращения кровотока. В ряде случаев для усиления ишемизирующего эффекта дополнительно применялись микросферы или частицы поливинилалкоголя.

По завершении процедуры проводился контрольный ангиографический снимок для подтверждения адекватности окклюзии и исключения нежелательных коллатеральных путей кровоснабжения опухоли. В раннем послеоперационном периоде пациентки находились под динамическим наблюдением в условиях стационара для своевременного выявления возможных осложнений (болевой синдром, лихорадка, ишемические реакции органов малого таза).

Через 10–14 дней после вмешательства выполнялись контрольные методы визуализации (УЗИ с допплерометрией и/или МРТ), что позволяло оценить изменения в кровоснабжении опухоли, динамику её размеров и наличие зон ишемического некроза. На основании полученных данных принималось решение о начале следующего этапа лечения — сочетанной химиолучевой терапии.

ХЛТ проводилась в рамках радикального курса, который включал дистанционное облучение области малого таза в режиме фракционирования 2,0 Гр до суммарной дозы 46–50 Гр с одновременным еженедельным введением цисплатина (40 мг/м^2), а при метастатическом поражении лимфоузлов — с последующим «бустом» до 56–60 Гр. Далее выполнялась внутриполостная брахитерапия источником Ir-192 (4 фракции по 7–7,5 Гр) до суммарной дозы 28–30 Гр. Общая эквивалентная доза на первичный очаг составляла 80–90 Гр.

Ответ опухоли оценивали по критериям RECIST 1.1. (полный ответ, частичный ответ, стабилизация, прогрессирование). Безрецидивная (БРВ) и общая выживаемость (ОВ) рассчитывались по методу Каплана–Майера. Переносимость терапии оценивалась по шкалам RTOG/EORTC и CTCAE v.5.0.

Для статистического анализа использовались методы параметрической и непараметрической статистики (t-тест, критерий Манна–Уитни, χ^2, точный критерий Фишера). Для оценки прогностической значимости факторов применялись одно- и многофакторный регрессионный анализ, ROC-анализ. Различия считали статистически значимыми при $p \leq 0,05$. Непосредственная эффективность лечения в зависимости от клинико-морфологических характеристик.

Результаты

Сравнительный анализ показал преимущество использования ХЭМА в сочетании с ХЛТ по сравнению со стандартной радикальной ХЛТ. Полная регрессия опухоли достигнута у 70,0 % пациенток основной группы против 38,0 % в группе контроля (p=0,001), что соответствовало почти четырёхкратному увеличению шанса достижения полного ответа (OR=3,89; 95 % ДИ: 1,74–8,69). Частичная регрессия, напротив, чаще наблюдалась в контрольной группе (62,0 % против 30,0 %).

Дополнительно было установлено, что возраст оказывал влияние на результаты терапии в основной группе: у женщин старше 44 лет вероятность полной регрессии была значительно выше (OR=3,08; 95 % ДИ: 1,39–6,84; p=0,005).

Анализ эффективности в зависимости от стадии заболевания показал, что при стадиях IIA2 и IIB показатели полной регрессии были сопоставимы между группами, однако при IIIB стадии различия оказались статистически значимыми: 64,6 % против 27,8 % (p <0,001).

Зависимость результатов от морфологического типа опухоли продемонстрировала более высокую эффективность ХЭМА у больных с плоскоклеточным раком (73,6 % против 43,2 %; p=0,004), тогда как при аденокарциноме статистически значимых различий не выявлено. Среди форм роста наибольший эффект отмечался при экзофитной форме: полная регрессия достигнута у 100 % пациенток основной группы против 25 % в контроле (p <0,05).

Уровень SCC после лечения снизился в основной группе с 9,3 ± 14,4 до 1,7 ± 3,8 нг/мл (p=0,002), тогда как в контрольной статистически значимого снижения не отмечено (p=0,433). Конечные значения SCC также различались между группами: 1,7 ± 3,8 против 6,5 ± 2,5 нг/мл (p=0,011).

По данным УЗИ, объём опухоли уменьшился с 75,3 ± 24,4 до 14,6 ± 7,7 см^3 в основной группе и с 69,5 ± 24,4 до 25,5 ± 11,1 см^3 в контрольной (p=0,003). Данные МРТ подтвердили значимое уменьшение объёма опухоли у пациенток, получавших ХЭМА.

Через три года наблюдения общая выживаемость составила 92,1 % в основной группе и 66,7 % в группе контроля (p=0,084). Хотя различие не достигло статистической значимости, тенденция свидетельствует в пользу комбинированного подхода.

Более выраженные различия отмечены в безрецидивной выживаемости: на сроке 3 лет БРВ составила 73,4 % в основной группе против 34,7 % в группе контроля (p=0,003). Анализ показал, что низкая степень дифференцировки (G3), объём опухоли >80 см^3 и уровень SCC >5,5 нг/мл были независимыми неблагоприятными прогностическими факторами.

Частота прогрессирования после ХЭМА+ХЛТ составила 30,0 % против 64,6 % в группе контроля (p <0,001). При этом локорегионарные рецидивы отмечались

у 20,0 % пациенток основной группы и у 45,8 % контрольной (p=0,005). Отдалённые метастазы встречались чаще в группе контроля (18,8 % против 10,0 %), но различия не достигли статистической значимости (p=0,192).

Основным побочным эффектом терапии стала индуцированная миелосупрессия, которая отмечалась в обеих группах, однако чаще у пациенток основной группы (лейкопения у 78,3 % против 37,5 %). Лучевые реакции со стороны слизистой шейки матки также встречались чаще после ХЭМА (51,6 % против 31,2 %; p=0,02), но преимущественно не превышали II степени и не требовали прекращения терапии. Поздние осложнения (циститы, ректиты, эпителииты) встречались с одинаковой частотой в обеих группах и носили управляемый характер.

Основные результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Сводные результаты исследования в группах

Показатель	Основная группа (ХЭМА+ХЛТ, n=60)	Контрольная группа (ХЛТ, n=48)	p-value
Полная регрессия опухоли	70,0 % (42)	38,0 % (18)	0,001
Частичная регрессия опухоли	30,0 % (18)	62,0 % (30)	0,001
Снижение уровня SCC после лечения	9,3 → 1,7 нг/мл (p=0,002)	12,9 → 6,5 нг/мл (p=0,433)	0,011
Остаточный объём опухоли (УЗИ)	75,3 → 14,6 см³ (p<0,001)	69,5 → 25,5 см³ (p=0,002)	0,003
3-летняя общая выживаемость (ОВ)	92,10 %	66,70 %	0,084
3-летняя безрецидивная выживаемость (БРВ)	73,40 %	34,70 %	0,003*
Прогрессирование заболевания (всего)	30,0 % (18)	64,6 % (31)	<0,001
Локорегионарные рецидивы	20,0 % (12)	45,8 % (22)	0,005
Отдалённые метастазы	10,0 % (6)	18,8 % (9)	0,192
Лейкопения (любая степень)	78,30 %	37,50 %	<0,05
Лучевые реакции слизистой (эпителииты)	51,60 %	31,20 %	0,02

Таким образом, использование ХЭМА в составе комплексного лечения позволяет достичь большей частоты полной регрессии опухоли, выраженного снижения уровня SCC и уменьшения остаточного объёма опухоли. Наиболее важным клиническим результатом стало достоверное улучшение 3-летней безрецидивной выживаемости и снижение частоты локорегионарных рецидивов. При этом профиль осложнений оставался приемлемым и не препятствовал проведению радикальной программы лечения.

Дополнительно был проведен анализ прогностических факторов, в результате чего было показано, что ряд клинико-морфологических характеристик имел значимое влияние на эффективность лечения. Так, при стадии IIIB вероятность достижения полной регрессии была достоверно выше в основной группе (64,6 % против 27,8 %; p <0,001), что подчёркивает преимущества ХЭМА у пациенток с распространёнными формами заболевания. Объём опухоли >80–85 см³ ассоциировался с повышенным риском неполного ответа и снижением безрецидивной выживаемости: у таких больных частота рецидивов возрастала более чем в два раза.

Степень дифференцировки также показала прогностическую значимость: при G3 частота прогрессирования была выше, а трёхлетняя БРВ снижалась почти в три раза по сравнению с G1–G2 (25 % против 87 %; p <0,001). Морфологический вариант опухоли оказал влияние на исходы: при плоскоклеточном РШМ частота полной регрессии составила 73,6 % в основной группе, тогда как при аденокарциноме — лишь 42,9 %.

Особое значение имел уровень SCC до начала терапии. При значениях выше 5,5 нг/мл риск рецидива возрастал в 2,1 раза (p=0,008), тогда как у пациенток с более низкими показателями трёхлетняя БРВ достигала 89,5 %.

Таким образом, стадия заболевания, объём и морфологические характеристики опухоли, степень дифференцировки и уровень SCC могут рассматриваться как ключевые предикторы эффективности ХЭМА. Их комплексный учёт позволяет выделить группу пациенток, наиболее чувствительных к данному виду терапии, и оптимизировать подходы к комбинированному лечению.

Прогностическая модель

На основании одно- и многофакторного анализа была построена модель вероятности неполного ответа опухоли на комбинированное лечение. Независимыми прогностически значимыми факторами оказались — стадия заболевания IIIB, объём опухоли >80 см³, низкая степень дифференцировки (G3), аденокарцинома и уровень SCC >5,5 нг/мл.

Модель продемонстрировала высокую точность — площадь под ROC-кривой (AUC) составила 0,78–0,82 при чувствительности 72–80 % и специфичности 73–75 %. Это говорит о возможности выделения групп высокого риска и персонализированного выбора тактики лечения, включая обоснование применения ХЭМА.

На рисунке 1 изображена ROC-кривая прогностической модели.

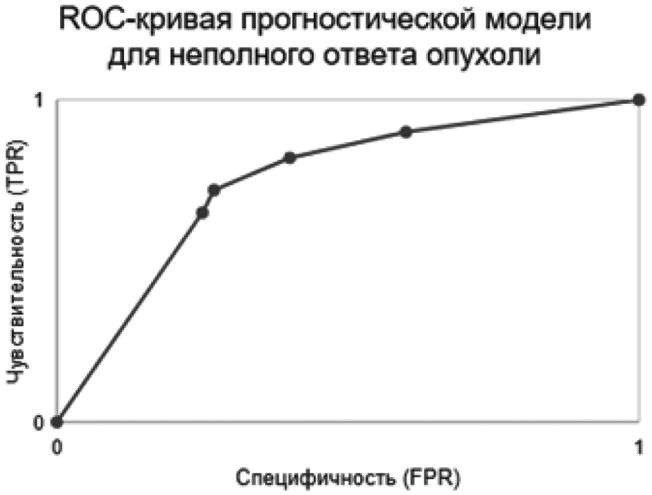


Рис. 1. ROC-кривая прогностической модели

Для дополнительной верификации был проведён многофакторный регрессионный анализ, результаты которого представлены в таблице 3.

Таблице 3.

Влияние клинико-морфологических факторов

Фактор-прогноз	OR / HR (95% ДИ)	p
Стадия IIIB	2,8 (1,4–5,6)	0,005
Объём опухоли >80 см^3	2,6 (1,7–3,9)	<0,001
Степень дифференцировки G3	2,9 (1,9–4,4)	<0,001
Аденокарцинома	2,3 (1,1–4,6)	0,025
SCC >5,5 нг/мл	2,1 (1,4–3,2)	0,008

Характеристики модели AUC (ROC) = 0,78–0,82; Чувствительность = 72–80 %; Специфичность = 73–75 %.

Таким образом, полученная модель обладает высокой прогностической ценностью и позволяет на основании совокупности клинико-морфологических характеристик выделять подгруппы пациенток с повышенным риском рецидива. Применение данного подхода открывает перспективы для персонализации лечения и более обоснованного выбора химиоэмболизации маточных артерий в составе комбинированных программ терапии местно-распространённого рака шейки матки.

Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют высокую прогностическую ценность клинико-морфологических характеристик у пациенток с МРРШМ, получавших комбинированное лечение с включением химиоэмболизации маточных артерий.

Наше исследование показало, что неблагоприятными предикторами эффективности ХЭМА+ХЛТ являются IIIB стадия, объем опухоли более 80 см^3, низкая степень дифференцировки (G3), аденокарцинома и уровень SCC >5,5 нг/мл. Эти данные согласуются с литературными сведениями о значимости стадии и объема опухоли как ключевых факторов риска прогрессирования [19, 20, 21]. В метаанализах и крупных когортных исследованиях также показано, что низкая степень дифференцировки ассоциирована со снижением опухоль-специфической выживаемости [22].

Кроме того, важным результатом нашего исследования стало подтверждение роли SCC как биомаркера прогноза: пациенты с исходным уровнем >5,5 нг/мл имели более худшие показатели БРВ. Аналогичные результаты приводят Choi K.H. и соавт. (2019), а также Ryu H.K. и др. (2015), где повышение SCC до и после лечения предсказывало рецидив [23, 24].

В дополнение, сравнение с отечественными данными (Косенко И.А., 2012; Бабаева Н.А., 2018) показывает близкие тенденции — преобладание плоскоклеточного РШМ и худший прогноз при аденокарциномах [25, 26]. По нашим результатам также получилось, что аденокарцинома ассоциировалась со снижением БРВ, что соответствует данным зарубежных авторов [27].

Относительно тактики лечения, в литературе обсуждается возможность применения ХЭМА в комбинации с ХЛТ как способа повышения локального контроля и снижения риска кровотечений [28, 29]. В нашей когорте включение ХЭМА позволило достичь более высокой частоты полной регрессии и трехлетней БРВ по сравнению с группой ХЛТ. Эти данные дополняют немногочисленные публикации, подтверждающие перспективность ХЭМА в комплексных программах терапии [30, 31].

Сопоставление полученных данных с литературой свидетельствует, что учет клинико-морфологических характеристик имеет ключевое значение для прогнозирования исходов комбинированного лечения МРРШМ. Выявленные факторы могут служить основой для персонализации подходов к выбору схемы терапии, включая обоснование применения ХЭМА.

Заключение

Клинико-морфологические характеристики опухоли являются определяющими факторами прогноза при применении химиоэмболизации маточных артерий у пациенток с местно-распространённым раком шейки матки. Учёт стадии заболевания, объёма и степени дифференцировки опухоли, морфологического варианта и уровня SCC позволяет более точно прогнозировать эффективность лечения и выделять группы высокого риска. Это открывает возможности для персонализированного выбора тактики терапии и оптимизации комбинированных программ лечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Arbyn M., Weiderpass E., Bruni L., et al. Estimates of incidence and mortality of cervical cancer in 2018: a worldwide analysis // Lancet Glob Health. — 2020. — Vol. 8, №2. — P. e191–e203.
2. Sung H., Ferlay J., Siegel R.L., et al. Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries // CA Cancer J Clin. — 2021. — Vol. 71, №3. — P. 209–249.
3. Bray F., Ferlay J., Soerjomataram I., et al. Global cancer statistics 2020 // CA Cancer J Clin. — 2021. — Vol. 71. — P. 209–249.
4. World Health Organization. Cervical cancer. — WHO, 2020. URL: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cervical-cancer
5. Vu M., Yu J., Awolude O.A., Chuang L. Cervical cancer worldwide // Curr Probl Cancer. — 2018. — Vol. 42, №5. — P. 457–465.
6. Zhang X.R., He L., Lu L., et al. Epidemiological trends of cervical cancer in China: an age-period-cohort analysis // J Cancer. — 2021. — Vol. 12, №3. — P. 716–726.
7. Каприн А.Д., Старинский В.В., Шахзадова А.О. Злокачественные новообразования в России в 2023 году (заболеваемость и смертность). М.: МНИОИ им. П.А. Герцена — филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2024. 276 с.
8. Cohen P.A., Jhingran A., Oaknin A., Denny L. Cervical cancer // Lancet. — 2019. — Vol. 393. — P. 169–182.
9. Liu Y., Li H., Yang G., et al. Current status and future perspectives of cervical cancer treatment // J Cancer Res Clin Oncol. — 2022. — Vol. 148. — P. 1381–1393.
10. Mayadev J.S., Atienza T., Hendry W., et al. Radiation therapy for cervical cancer: executive summary of an ASTRO clinical practice guideline // Pract Radiat Oncol. — 2022. — Vol. 12, №1. — P. 13–25.
11. Shrivastava S., Mahantshetty U., Engineer R., et al. Critical analysis of outcomes in patients with recurrent cervical cancer // Int J Gynecol Cancer. — 2018. — Vol. 28, №5. — P. 1025–1030.
12. Gopu P., Rathod S., Mahantshetty U. A review of contemporary evidence on chemoradiotherapy in locally advanced cervical cancer // Int J Gynecol Cancer. — 2021. — Vol. 31, №7. — P. 962–971.
13. Важенин А.В., Куркин Н.В., Бабаева Н.А., и др. Эмболизация маточных артерий в комплексном лечении больных с раком шейки матки // Вестник современной клинической онкологии. — 2011. — Т. 4, №3. — С. 12–16.
14. Куркин Н.В., Важенин А.В., Солодкий В.А. Химиоэмболизация как компонент комбинированного лечения местнораспространённого рака шейки матки // Онкогинекология. — 2019. — Т. 17, №1. — С. 23–27.
15. Nogueira-García D., Huber S., Rennings A.J., et al. Uterine artery embolization for gynecologic malignancies: indications and outcomes // Cardiovasc Intervent Radiol. — 2015. — Vol. 38. — P. 588–597.
16. Aishanjiang D., Aili A., Azhati B., et al. Comparative efficacy and safety of interventional chemoembolization and chemoradiotherapy for cervical cancer // Int J Clin Oncol. — 2021. — Vol. 26, №8. — P. 1557–1565.
17. Wang S.G., Liu Y.Y., Li H.Y., et al. Downregulation of survivin mRNA expression in cervical cancer tissue by transcatheter arterial chemoembolization // Asian Pac J Cancer Prev. — 2017. — Vol. 18, №10. — P. 2799–2804.
18. Tanaka T., Terai Y., Ono Y.J., et al. Preoperative chemoembolization improves prognosis in patients with stage IB2-IIB cervical cancer // Int J Clin Oncol. — 2018. — Vol. 23, №5. — P. 890–897.
19. Sun C., Liu H., Zhang Y. et al. Tumor volume regression during chemoradiotherapy as a prognostic factor in patients with locally advanced cervical cancer. Oncol. Lett. 2022;24(1):238.
20. Lee K.C., Chen C.C., Wang L. et al. Tumor volume change during definitive chemoradiotherapy and its impact on outcomes in cervical cancer patients. Gynecol. Oncol. 2017;147(3):522–528.
21. Peng Q.H., Han L., Li L. et al. Prognostic factors for recurrence in patients with locally advanced cervical cancer treated with concurrent chemoradiotherapy. BMC Cancer. 2022; 22:563.
22. Matsuo K., Machida H., Mandelbaum R.S. et al. Prognostic significance of histologic type in early-stage cervical cancer: a population-based study. Gynecol. Oncol. 2018;149(3):484–490.
23. Choi K.H., Kim J.H., Park J.Y. et al. Prognostic value of pretreatment squamous cell carcinoma antigen in patients with cervical cancer treated with concurrent chemoradiotherapy. Int. J. Gynecol. Cancer. 2019;29(3):512–519.
24. Ryu H.K., Baek J.S., Kang W.D. et al. Prognostic value of squamous cell carcinoma antigen in patients with locally advanced cervical cancer treated with chemoradiotherapy. Obstet. Gynecol. Sci. 2015;58(2):128–136.
25. Косенко И.А., Кузнецов В.В., Митрофанова И.В. и др. Комплексное лечение больных местнораспространённым раком шейки матки с использованием химиоэмболизации маточных артерий. Вопросы онкологии. 2012;58(6):729–734.
26. Бабаева Н.А., Солодкий В.А., Иванов С.А. и др. Эффективность химиоэмболизации маточных артерий в комбинированном лечении больных раком шейки матки. Онкология. Журнал им. П.А. Герцена. 2018;7(5):36–41.
27. Bullard T., Cohen P.A., McKenzie N.D. et al. Adenocarcinoma of the cervix: a review of prognostic factors and treatment outcomes. Gynecol. Oncol. 2019;152(1):172–178.
28. Tanaka T., Morishige K., Tanaka Y. et al. Impact of transarterial chemoembolization on survival in patients with locally advanced cervical cancer. J. Vasc. Interv. Radiol. 2018;29(3):400–407.
29. Aishanjiang D., Li X., Wu H. et al. Clinical outcomes of uterine artery chemoembolization combined with radiotherapy in cervical cancer patients. Int. J. Gynecol. Cancer. 2021;31(6):867–874.
30. Куркин Н.В., Павлов В.Н., Воронин С.Н. и др. Химиоэмболизация маточных артерий в комплексном лечении больных раком шейки матки. Акушерство и гинекология. 2019; 8:92–97.
31. Важенин А.В., Крикунова Л.И., Дудко Е.А. и др. Химиоэмболизация маточных артерий в лечении злокачественных опухолей шейки матки. Опухоли женской репродуктивной системы. 2012;8(3):34–38.

© Кулиева Гюнель Закир кызы (gunelka2010@yandex.ru); Мкртчян Лиана Сирекановна; Кучеров Валерий Владимирович; Крикунова Людмила Ивановна; Иванов Сергей Анатольевич; Каприн Андрей Дмитриевич
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.18

ПРИМЕНЕНИЕ КИСЛОТОСОДЕРЖАЩЕЙ ПРИСЫПКИ В МЕСТНОМ ЛЕЧЕНИИ ГНОЙНЫХ РАН

THE USE OF ACID-CONTAINING POWDER IN THE LOCAL TREATMENT OF PURULENT WOUNDS

S. Kurbanova
A. Smolkina
S. Chebykin
R. Evseev
E. Slesareva
E. Birch

Summary. The aim of the study was to clinically evaluate the effectiveness of various local therapy regimens using external antibacterial drugs and acid—containing powder in the complex surgical treatment of purulent wounds. The work was performed based on the Department of Maxillofacial surgery of the Ulyanovsk Regional Clinical Hospital in the period from November 2022 to January 2025. 100 patients were examined, divided into two groups: with standard treatment and with the use of a developed patented acid-containing powder. The diagnosis included a clinical examination, microbiological and histological examinations. All patients underwent surgical drainage with various schemes of external therapy. In the group using a combination of 3 % lactic and ascorbic acids in combination with a combined water-soluble external antibacterial drug (antibiotic, repair stimulant and local anesthetic), a faster formation of granulations and epithelialization was noted with a lower degree of inflammation. There was a statistically significant activation of reparative processes ($p < 0.001$), a decrease in drug load and a reduction in hospitalization time with a good cosmetic result.

Keywords: odontogenic infection, phlegmon, submandibular area, purulent wound, local therapy, antibacterial ointment, drainage, wound healing.

Курбанова Сабина Габибуллаевна
старший преподаватель, ФГБОУ ВО Ульяновский государственный университет
mailto:asg4@yandex.ru
Смолькина Антонина Васильевна
доктор медицинских наук, профессор, ФГБОУ ВО Ульяновский государственный университет
smolant1@yandex.ru
Чебыкин Сергей Геннадьевич
Аспирант, ФГБОУ ВО Ульяновский государственный университет
sergeychebykin63@yandex.ru
Евсеев Роман Михайлович
кандидат медицинских наук, доцент, ФГБОУ ВО Ульяновский государственный университет
ramashka_13@inbox.ru
Слесарева Елена Васильевна
доктор медицинских наук, доцент, ФГБОУ ВО Ульяновский государственный университет
gistology2@mail.ru
Берч Екатерина Дмитриевна
старший преподаватель, ФГБОУ ВО Ульяновский государственный университет
berched@mail.ru

Аннотация. Цель исследования — клиническая оценка эффективности различных схем местной терапии с применением наружных антибактериальных препаратов и кислотосодержащей присыпки в комплексном хирургическом лечении гнойных ран. Работа выполнена на базе отделения челюстно-лицевой хирургии областной клинической больницы г. Ульяновска в период с ноября 2022 по январь 2025 года. Обследовано 100 пациентов, разделённых на две группы: со стандартным лечением и с применением разработанной запатентованной кислотосодержащей присыпки. Диагностика включала клинический осмотр, микробиологическое и гистологическое исследования. Всем пациентам проведено хирургическое дренирование с различными схемами наружной терапии. В группе с применением комбинации 3 % молочной и аскорбиновой кислот в сочетании с комбинированным водорастворимым наружным антибактериальным препаратом (антибиотик, стимулятор репарации и местный анестетик) отмечено более быстрое формирование грануляций и эпителизации при меньшей выраженности воспаления. Выявлена статистически значимая активация репаративных процессов ($p < 0{,}001$), снижение медикаментозной нагрузки и сокращение сроков госпитализации при хорошем косметическом результате.

Ключевые слова: одонтогенная инфекция, флегмона, подчелюстная область, гнойная рана, местная терапия, антибактериальная мазь, дренирование, заживление ран.

Введение

Инфекции глубоких отделов лица и шеи остаются актуальной проблемой клинической практики, в частности в челюстно-лицевой хирургии. Данные состояния нередко требуют экстренного хирургического вмешательства и в ряде случаев представляют непосредственную угрозу для жизни пациента [1,2]. В большинстве наблюдений инфекции данной локализации имеют одонтогенное происхождение [3]. При отсутствии своевременной диагностики и адекватной терапии одонтогенные инфекции (ОИ) могут приводить к развитию тяжёлых, а иногда и жизнеугрожающих осложнений, включая медиастинит, сепсис, некротизирующий фасциит и остеомиелит.

Среди анатомических пространств, подверженных распространению ОИ, подчелюстная область занимает особое место. Это связано с её анатомической близостью к крупным сосудистым структурам и дыхательным путям [1–5]. Прогрессирующий отёк и инфильтрация тканей в данной зоне способны в короткие сроки привести к нарушению проходимости верхних дыхательных путей, что требует немедленного стационарного лечения с участием челюстно-лицевого хирурга [6,7].

По данным литературы, наиболее частыми причинами развития ОИ являются осложнённый кариес, перикоронарит, острые и хронические формы пародонтита, а также осложнения стоматологических вмешательств. Наиболее значимыми этиологическими зубами, как правило, являются вторые и третьи моляры нижней челюсти, которые чаще других служат источником распространённых флегмонозных процессов [8–12].

Лечение одонтогенных инфекций глубоких пространств основывается на двух ключевых принципах: устранении первичного очага инфекции, включая удаление причинного зуба, и выполнении адекватного хирургического дренирования поражённых анатомических областей. Данные мероприятия сопровождаются обязательной медикаментозной терапией, включающей инфузионную поддержку, анальгетики, жаропонижающие и противовоспалительные препараты [13–15].

Определение источника инфекции осуществляется на основании комплексной оценки анамнеза, клинических данных и результатов лучевых методов исследования. Знание анатомических особенностей подчелюстной и шейной областей имеет принципиальное значение для прогнозирования путей распространения воспалительного процесса. В оптимальных условиях удаление очага инфекции должно выполняться в максимально ранние сроки [16,17]. Вместе с тем в клинической практике встречаются ситуации, при которых немедленное хирургическое вмешательство затруднено, например при выраженном тризме или активном гнойном перикоронарите [18]. В подобных случаях обоснованным является проведение предварительной консервативной терапии, направленной на стабилизацию состояния пациента и уменьшение выраженности воспалительной реакции [9,19,20].

Сроки хирургического вмешательства по удалению гнойного очага должны определяться индивидуально, с учётом клинической картины, однако лечебная тактика должна оставаться максимально ранней и активной. Своевременное дренирование позволяет предотвратить распространение инфекции в глубокие отделы шеи и существенно снизить риск развития тяжёлых осложнений даже на стадии флегмонозного воспаления [21].

Объём и доступ хирургического вмешательства зависят от глубины и локализации гнойного процесса в мягких тканях шеи. Учитывая потенциальную угрозу дыхательным путям и высокую вероятность неблагоприятных исходов, лечение одонтогенных инфекций данной локализации остаётся одной из наиболее сложных и ответственных задач современной челюстно-лицевой хирургии.

Цель

Клинически оценить эффективность различных схем местной терапии с применением наружных антибактериальных препаратов с кислотосодержащей присыпкой в комплексном хирургическом лечении.

Материалы и методы

Проведён анализ 100 клинических случаев одонтогенных флегмон (2022–2024 гг.) в отделении челюстно-лицевой хирургии Ульяновской областной клинической больницы, являющейся клинической базой медицинского факультета им. Т.З. Биктимирова Ульяновского государственного университета. Локализация воспалительного процесса включала дно полости рта (подчелюстную и подподбородочную области), а также шею (поднижнечелюстное и окологлоточное пространства). Диагностический алгоритм включал клинический осмотр, оценку тяжести состояния пациентов, микробиологическое исследование раневого отделяемого и гистологический анализ биоптатов.

Все пациенты были госпитализированы в экстренном порядке и получали специализированное хирургическое лечение в соответствии с утверждёнными клиническими протоколами. В зависимости от схемы местной терапии пациенты были распределены на две сопоставимые группы. В первой группе (n = 56) после хирургического вмешательства при местной обработке раны применяли комбинированный водорастворимый наружный

антибактериальный препарат, включающий антибиотик, стимулятор репаративных процессов и местный анестетик. Во второй группе (n = 54) в комплексном местном лечении гнойных ран использовали разработанную и запатентованную кислотосодержащую присыпку [22] в сочетании с комбинированным водорастворимым наружным антибактериальным препаратом.

Особенностью настоящего исследования являлось внедрение в клиническую практику новой схемы местного лечения, основанной на применении 3 % молочной и аскорбиновой кислот в соотношении 1:1 с последующим нанесением комбинированного антибактериального препарата при гнойно-воспалительных заболеваниях шеи и челюстно-лицевой области.

Статистический анализ проводился с использованием программы StatTech v. 4.9.5. Количественные показатели оценивали на соответствие нормальному распределению с помощью критерия Колмогорова–Смирнова. Перед включением в исследование все пациенты были подробно проинформированы о целях, методах и объёме предполагаемого лечения. Письменное информированное согласие на участие в исследовании, обработку персональных медицинских данных и публикацию клинических материалов получено в соответствии с принципами Хельсинкской декларации (2013).

Результаты

В результате проведенного исследования сравнения методик по некоторым показаниям, а именно наличия нейтрофилов в крови, появление более ранней грануляции и эпителизации отмечена статистическая достоверность (табл.1.).

Таблица 1.

Описательная статистика количественных переменных в зависимости от схемы местной терапии

Показатели	Группа 1 — стандартная местная терапия	Группа 2 — кислотосодержащая присыпка + стандартная местная терапия	p
Возраст, Me [IQR]	51,00 [34,00; 69,25]	53,00 [36,25; 66,00]	0,830
Индекс массы тела, M (SD)	28,15 (4,61)	27,95 (4,62)	0,678
Площадь раны, см^2, Me [IQR]	15,04 [8,99; 22,77]	13,85 [8,64; 23,32]	0,460
Число вовлечённых клетчаточных пространств, Me [IQR]	0,50 [0,00; 1,00]	1,00 [0,00; 1,00]	0,166
Лейкоциты исходно, $\times 10^9$/л, M (SD)	11,29 (2,78)	11,50 (3,00)	0,488
Нейтрофилы, %, M (SD)	74,97 (7,75)	73,18 (8,17)	0,036*
С-реактивный белок исходно, мг/л, Me [IQR]	34,75 [19,07; 54,82]	34,70 [19,20; 55,67]	0,815
СОЭ исходно, мм/ч, M (SD)	29,82 (13,63)	30,60 (14,72)	0,605
Прокальцитонин, нг/мл, Me [IQR]	0,12 [0,07; 0,22]	0,13 [0,08; 0,22]	0,515
Глюкоза исходно, ммоль/л, Me [IQR]	6,50 [5,00; 7,90]	6,70 [5,00; 7,70]	0,842
Креатинин, мкмоль/л, M (SD)	85,72 (23,12)	81,01 (23,95)	0,062
Альбумин исходно, г/л, Me [IQR]	37,35 [34,40; 39,80]	36,15 [33,52; 38,48]	0,013*
Дни до операции, Me [IQR]	3,00 [1,00; 4,00]	2,00 [1,00; 3,00]	0,171
Длительность антибактериальной терапии, дни, Me [IQR]	9,00 [6,00; 12,00]	9,00 [6,25; 11,75]	0,629
Площадь раны на 2-е сутки, см^2, Me [IQR]	13,73 [8,00; 19,76]	12,25 [7,45; 20,57]	0,423
Площадь раны на 4-е сутки, см^2, Me [IQR]	12,20 [7,22; 17,41]	10,88 [6,59; 18,34]	0,344
Площадь раны на 7-е сутки, см^2, Me [IQR]	10,16 [6,08; 15,24]	9,03 [5,47; 15,44]	0,265
Площадь раны на 10-е сутки, см^2, Me [IQR]	8,25 [5,10; 13,16]	7,45 [4,54; 12,64]	0,200
Болевой синдром исходно (ВАШ 0–10), Me [IQR]	6,00 [5,00; 7,00]	6,00 [4,00; 6,00]	0,255
Боль на 2-е сутки (ВАШ 0–10), Me [IQR]	4,00 [3,00; 5,00]	4,00 [3,00; 5,00]	0,073
Боль на 4-е сутки (ВАШ 0–10), Me [IQR]	3,00 [2,00; 4,00]	3,00 [2,00; 4,00]	0,315
Боль на 7-е сутки (ВАШ 0–10), Me [IQR]	2,00 [1,00; 3,00]	2,00 [1,00; 3,00]	0,322
Боль на 10-е сутки (ВАШ 0–10), Me [IQR]	1,00 [0,00; 2,00]	1,00 [0,00; 2,00]	0,340
День появления грануляций, Me [IQR]	3,00 [3,00; 4,00]	3,00 [2,00; 4,00]	<0,001*

Показатели	Группа 1 — стандартная местная терапия	Группа 2 — кислотосодержащая присыпка + стандартная местная терапия	p
День эпителизации, Me [IQR]	15,00 [12,75; 18,25]	13,00 [10,00; 17,00]	<0,001*
Длительность госпитализации, койко-дни, Me [IQR]	9,00 [6,00; 11,00]	8,00 [5,00; 10,00]	0,017*

Примечание. Группа 1 — стандартная схема местной терапии с применением комбинированного водорастворимого наружного антибактериального препарата. Группа 2 — применение кислотосодержащей присыпки (3 % молочная и аскорбиновая кислоты в соотношении 1:1) в сочетании со стандартной схемой местной терапии.
* — различия достоверны (p≤0,05).

Были проанализированы два клинических случая пациентов с острыми гнойно-воспалительными процессами одонтогенного происхождения, локализованных в глубоких отделах лица и шеи с разной методикой лечения.

Клинический случай 1

Пациентка А., 37 лет, госпитализирована 06.02.2023 г. в отделение челюстно-лицевой хирургии с жалобами на отёк дна полости рта и языка, болезненное глотание, ограниченное открывание рта (тризм) и эпизоды озноба. Из анамнеза установлено, что за несколько суток до госпитализации пациентке был удалён верхний моляр по поводу обострения хронического периодонтита, после чего отмечалось прогрессирующее нарастание воспалительных явлений. При объективном осмотре выявлены клинические признаки одонтогенной флегмоны дна полости рта.

После выполнения хирургического вскрытия и дренирования подчелюстного и подподбородочного пространств раневой очаг был тщательно промыт антисептическими растворами (3 % раствор перекиси водорода, 0,9 % раствор натрия хлорида) и высушен. В дальнейшем в рану одномоментно наносили комбинированный водорастворимый наружный антибактериальный препарат, направленный на воздействие на гнойно-некротические массы и снижение выраженности воспалительного процесса. Препарат равномерно распределяли тонким слоем (до 0,2 мм) по всей площади раневой поверхности с последующим наложением стерильных марлевых салфеток и фиксацией бинтом. Повторные перевязки с нанесением препарата выполнялись через день. Общая продолжительность местного лечения составила 15 суток.

На фоне проводимой терапии отмечались уменьшение отёка мягких тканей, очищение раневой поверхности, нормализация температуры тела и восстановление функции глотания. По данным гистологического исследования биоптатов из зоны поражения выявлено выраженное гнойное воспаление с формированием полости распада и очаговыми кровоизлияниями, что отражало тяжесть воспалительного процесса на начальном этапе заболевания (рис. 1).

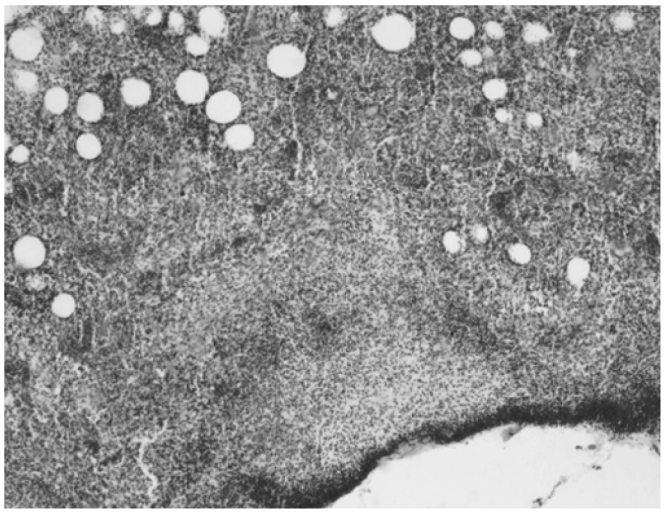


Рис. 1. На границе с гиподермой обширный очаг гнойного воспаления с формирующейся полостью распада. По периферии среди лейкоцитарного инфильтрата небольшие очаги кровоизлияний

Клинический случай 2

Пациентка Б., 42 лет, госпитализирована 17.04.2024 г. с диагнозом «флегмона шеи». В анамнезе — удаление дистопированного нижнего моляра, после чего развились боли и выраженный отёк, распространявшийся на нижнюю щёчную и поднижнечелюстную области, сопровождавшиеся нарастанием интоксикационного синдрома, повышением температуры тела до 38,9 °С, тризмом и затруднением глотания.

Пациентке выполнено экстренное хирургическое вмешательство, включавшее классический разрез в подбородочной области, ревизию гнойных полостей, их санацию и установку дренажей.

В первом клиническом случае в качестве средства местной терапии применяли комбинированный водорастворимый наружный антибактериальный препарат, что способствовало очищению раневой поверхности и формированию эпителизации к 15-м суткам лечения. По данным гистологического исследования в зоне поражения сохранялись признаки распада тканей и активного воспалительного процесса, что отражало исходную тяжесть гнойно-воспалительного поражения.

Во втором клиническом случае использовали комбинированную схему местного лечения, включавшую нанесение кислотосодержащей присыпки (3 % молочная и аскорбиновая кислоты в равных пропорциях) с последующим применением водорастворимого комбинированного наружного антибактериального препарата. Применение данной схемы сопровождалось сопоставимыми сроками заживления, однако эпителизация раневой поверхности наступала в среднем на 2 суток раньше и характеризовалась меньшей выраженностью воспалительных изменений по данным морфологического исследования (рис. 2).

Кислотосодержащую присыпку наносили тонким слоем непосредственно на раневую поверхность, после чего выполняли аппликацию комбинированного антибактериального препарата. Перевязки проводили с интервалом 48 часов, общий курс местного лечения составил 13 суток. Уже к 9–10-м суткам отмечалась выраженная положительная динамика в виде исчезновения инфильтрации, активной эпителизации и отсутствия гнойного отделяемого.

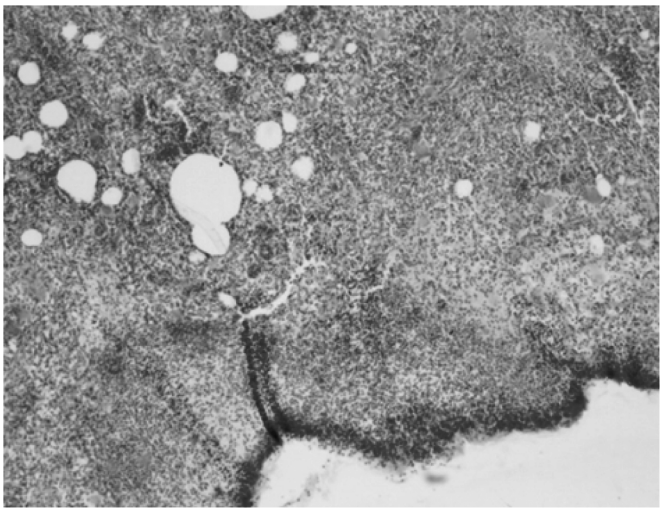


Рис. 2. На границе с гиподермой выявляется очаг гнойного воспаления с небольшими участками кровоизлияний

При применении схемы местной терапии с нанесением кислотосодержащей композиции на раневую поверхность с интервалом 48 часов гистологическое исследование поражённой анатомической области выявило восстановление всех слоёв кожи, умеренно выраженную воспалительную инфильтрацию и признаки активной регенерации тканей, что свидетельствовало об эффективности использованной схемы местного лечения.

Клинически видна более раннее отделяемое гноя и хорошая грануляция (рис 3.)

В обоих случаях отмечалась положительная динамика: устранение болевого синдрома, нормализация температуры, исчезновение тризма. Микробиологическое исследование выявило Fusobacteriumnucleatum, как доминирующий патоген.

Ниже представлена сравнительная таблица 2, отражающая ключевые клинико-лабораторные характеристики, методы лечения и исходы у двух пациенток с одонтогенными флегмонами различной локализации.

Обсуждения

Результаты представленных клинических наблюдений у пациентов с одонтогенными флегмонами подчелюстной и шейной локализации демонстрируют типичное течение гнойно-воспалительного процесса и эффективность комплексного лечения. Полученные данные подтверждают полимикробную природу данных инфекций с доминированием анаэробной микрофлоры, в частности Fusobacterium nucleatum, выявленного в обоих клинических случаях. Это согласуется с литературными данными, указывающими на ведущую роль анаэробных микроорганизмов, таких как Fusobacterium, Peptostreptococcus и Prevotella, в патогенезе одонтогенных инфекций и воспалительных процессов глубоких отделов лица и шеи.

В обоих клинических случаях заболевание развилось после удаления моляров, что соответствует данным литературы о высокой частоте развития одонтогенных флегмон на фоне воспалительных осложнений после экстракции зубов, особенно в области моляров нижней челюсти. Пациенткам была проведена комплексная те-



Рис. 3. фотографии пациентки на 1, 5, 8 день лечения

Таблица 2.

Сравнительный анализ клинических наблюдений при одонтогенных флегмонах

Параметр	Клинический случай 1 (пациентка А.)	Клинический случай 2 (пациентка Б.)
Дата госпитализации	06.02.2023	17.04.2024
Возраст, лет	37	42
Локализация гнойно-воспалительного процесса	Дно полости рта (подчелюстная и подподбородочная области)	Шея (поднижнечелюстная и нижняя щёчная области)
Клинический диагноз	Одонтогенная флегмона дна полости рта	Одонтогенная флегмона шеи
Причинный фактор	Удаление верхнего моляра по поводу обострения хронического периодонтита	Удаление дистопированного нижнего моляра
Основные симптомы при поступлении	Отёк дна полости рта и языка, болезненное глотание, тризм, озноб	Отёк нижней щёчной и поднижнечелюстной областей, температура до 38,9 °C, тризм, затруднение глотания
Хирургическая тактика	Вскрытие и дренирование подчелюстного и подподбородочного пространств	Классический разрез в подбородочной области, ревизия гнойных полостей, санация и установка дренажей
Схема местной терапии	Стандартная местная терапия с применением комбинированного водорастворимого наружного антибактериального препарата	Кислотосодержащая присыпка (3 % молочная и аскорбиновая кислоты, 1:1) в сочетании со стандартной местной терапией
Кратность перевязок	1 раз в 48 часов	1 раз в 48 часов
Продолжительность местного лечения, дни	15	13
Данные гистологического исследования	Выраженное гнойное воспаление, полость распада, очаговые кровоизлияния	Умеренная воспалительная инфильтрация, сохранность всех слоёв кожи, признаки активной регенерации
Результаты микробиологического исследования	Анаэробная микрофлора с доминированием Fusobacterium nucleatum	Анаэробная микрофлора с доминированием Fusobacterium nucleatum
Системная антибактериальная терапия	Комбинированная антибиотикотерапия в соответствии с клиническими рекомендациями	Комбинированная антибиотикотерапия в соответствии с клиническими рекомендациями
Срок госпитализации, койко-дни	13	15
Исход лечения	Полная эпителизация, купирование воспалительного процесса, выписана без осложнений	Полная эпителизация, купирование воспалительного процесса, выписана без осложнений

рапия, включающая системную антибактериальную терапию в соответствии с клиническими рекомендациями, а также своевременное хирургическое вскрытие и дренирование поражённых анатомических пространств.

Отличительной особенностью представленных наблюдений являлось применение различных схем местной терапии. В первом случае использовалась стандартная схема местного лечения с применением комбинированного водорастворимого наружного антибактериального препарата. Во втором случае была применена комбинированная схема, включавшая кислотосодержащую присыпку в сочетании со стандартной местной терапией. Выявленные различия в характере течения раневого процесса нашли подтверждение при гистологическом исследовании: в первом случае сохранялись признаки выраженного гнойного воспаления с формированием полости распада, тогда как во втором случае воспалительный процесс характеризовался меньшей агрессивностью, сохранностью всех слоёв кожи и признаками активной регенерации тканей.

Полученные результаты подтверждают, что своевременное и комплексное лечение, включающее адекватное хирургическое вмешательство, рациональную системную антибиотикотерапию и обоснованный выбор методов местного воздействия, обеспечивает благоприятный клинический исход и снижает риск развития осложнений. Данные выводы согласуются с результатами исследований Bakir S. et al. [5] и Wang L.F. et al. [9], в которых показано, что ранняя активная лечебная тактика с выполнением дренирования и применением системной антибактериальной терапии способствует уменьшению частоты осложнений и ускорению репаративных процессов.

Таким образом, представленные клинические наблюдения подчёркивают значимость комплексного и дифференцированного подхода к лечению флегмон глубоких отделов лица и шеи с учётом анатомической локализации, микробиологического профиля возбудителей и динамики воспалительного процесса.

Заключение

Представленные клинические наблюдения подчелюстных и шейных одонтогенных флегмон подтверждают высокую потенциальную агрессивность данных инфекционных процессов, особенно при позднем обращении за медицинской помощью. В обоих случаях отмечалось быстрое прогрессирование воспаления после удаления моляров, что обусловило необходимость срочной госпитализации и проведения комплексного лечения. Лечебная тактика включала раннее хирургическое вскрытие и адекватное дренирование поражённых анатомических пространств в сочетании с системной и местной антимикробной терапией. Дифференцированный подход к выбору схем местного лечения, эффективность которых была подтверждена клинико-морфологическими данными, способствовал ускорению репаративных процессов, снижению выраженности воспаления и предупреждению развития осложнений. Таким образом, клинический опыт демонстрирует, что своевременное комплексное вмешательство, основанное на анатомо-топической оценке и микробиологической диагностике, позволяет достичь стабильного благоприятного исхода при одонтогенных флегмонах лица и шеи.

Выводы

1. Применение комбинированной схемы местного лечения с использованием кислотосодержащей присыпки способствовало ускорению процессов грануляции и эпителизации раневой поверхности ($p < 0,001$), а также снижению медикаментозной нагрузки на пациента за счёт уменьшения потребности в анальгетиках и системной антибактериальной терапии.
2. Использование разработанного метода местного лечения гнойных ран позволяет сократить сроки пребывания пациентов в стационаре при сохранении благоприятного косметического результата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ксембаев С.С., Агатиева Э.А., Торгашова О.Е., Иванов О.А. Сравнительная оценка эффективности методов дренирования при одонтогенных флегмонах / С.С. Ксембаев, Э.А. Агатиева, О.Е. Торгашова, О.А. Иванов // Российская стоматология. — 2023. — Т. 16. — № 2. — С. 32–34.
2. Косарев К.В., Касумов З.Р., Кулинцова Я.В. Обзор современных препаратов, применяемых для лечения гнойно-воспалительных заболеваний ЧЛО и профилактики послеоперационных осложнений / К.В. Косарев, З.Р. Касумов, Я.В. Кулинцова // Вестник науки. — 2025. — Т. 1. — № 6. — С. 1987–1992.
3. Covarrubias S.C., Campos P.R. Submandibular approach: optimizing drainage of submandibular phlegmon / S.C. Covarrubias, P.R. Campos // Acta Scientiarum Dental Sciences. — 2024. — Vol. 8. — № 4. — P. 60–64.
4. Han X., An J., Zhang Y., Gong X., He Y. Risk factors for life-threatening complications of maxillofacial space infection / X. Han, J. An, Y. Zhang, X. Gong, Y. He // Journal of Craniofacial Surgery. — 2016. — Vol. 27. — P. 385–390.
5. Bakir S., Tanriverdi M.H., Gün R., Yorgancilar A.E., Yildirim M., Tekbaş G. Deep neck space infections: a retrospective review of 173 cases / S. Bakir [et al.] // American Journal of Otolaryngology. — 2012. — Vol. 33. — P. 56–63.
6. Mathew G.C., Kumar Ranganathan L., Gandhi S., Jacob E., Singh I., Solanki M. Odontogenic maxillofacial space infections at a tertiary care center in North India: a five-year retrospective study / G. C. Mathew [et al.] // International Journal of Infectious Diseases. — 2012. — Vol. 16. — P. e296–e302.
7. Zhang C., Tang Y., Zheng M., Yang J., Zhu G., Zhou H. Maxillofacial space infection experience in West China: a retrospective study of 212 cases / C. Zhang [et al.] // International Journal of Infectious Diseases. — 2010. — Vol. 14. — P. e414–e417.
8. Wabik A., Hendrich B. K., Nienartowicz J., Guziński M., Sąsiadek M. J. Odontogenic inflammatory processes of head and neck in computed tomography examinations / A. Wabik [et al.] // Polish Journal of Radiology. — 2014. — Vol. 79. — P. 431–438.
9. Wang L.F., Kuo W.R., Tsai S.M., Huang K.J. Characterizations of life-threatening deep cervical space infections: a review of one hundred ninety-six cases / L.F. Wang [et al.] // American Journal of Otolaryngology. — 2003. — Vol. 24. — P. 111–117.
10. He D., Qian Y., Zhou L., Qi H., Liu Y. Multifunctional irrigation-assisted vacuum drainage versus traditional drainage in the treatment of odontogenic deep fascial infection / D. He [et al.] // Infection and Drug Resistance. — 2021. — Vol. 14. — P. 3571–3580.
11. Alotaibi N., Cloutier L., Khaldoun E., Bois E., Chirat M., Salvan D. Criteria for admission of odontogenic infections at high risk of deep neck space infection / N. Alotaibi [et al.] // European Annals of Otorhinolaryngology, Head and Neck Diseases. — 2015. — Vol. 132. — № 5. — P. 261–264.
12. Азимбаев Н.М., Ешиев А.М., Бакыт А., Ешиев Д.А. Современные подходы к лечению гнойных ран дна полости рта и шеи / Н.М. Азимбаев [и др.] // Medical Science. — 2024. — Т. 25. — № 1. — С. 6–10.
13. Григорьян А.Ю., Бежин А.И., Панкрушева Т.А., Жиляева Л.В., Мишина Е.С., Чекмарева М.С. Экспериментальная оценка особенностей течения раневого процесса при использовании оригинального раневого покрытия / А.Ю. Григорьян [и др.] // Сибирское медицинское обозрение. — 2023. — № 3 (141). — С. 93–99.
14. Rakhimov Z.K., Muxammedov Z.Z. Etiopathogenesis of purulent inflammatory disease of the face and jaw area and mechanisms of its origin / Z.K. Rakhimov, Z.Z. Muxammedov // Journal of New Century Innovations. — 2024. — Vol. 53. — № 1. — P. 93–98.
15. Urakov A., Urakova N., Fisher E., Shchemeleva A., Stolyarenko A., Martiusheva V., Zavarzina M. Antiseptic pyolytics and warming wet compresses improve the prospect of healing chronic wounds / A. Urakov [et al.] // Exploration of Medicine. — 2023. — Vol. 4. — № 5. — P. 747–754.
16. Muradova R.R., Nuralieva R.M., Khaydarov M.M. Optimization of ways to clear burn wounds from purulent-necrotic masses in children / R.R. Muradova, R.M. Nuralieva, M.M. Khaydarov // Research Journal of Trauma and Disability Studies. — 2022. — Vol. 1. — № 12. — P. 137–140.

17. Gurevich K., Urakov A., Fisher E., Shubina Z. Alkaline hydrogen peroxide solution as a multifunctional drug for treating purulent diseases / K. Gurevich [et al.] // Journal of Pharmaceutical Research International. — 2022. — Vol. 34. — № 30. — P. 13–20.
18. Atepileva A., Ogay V., Kaukabayeva G., Nurkina A., Mukhambetova A., Balgazarov S. [et al.] Exploring the antibacterial and regenerative properties of a two-stage alginate wound dressing in a rat model / A. Atepileva [et al.] // Biomedicines. — 2024. — Vol. 12. — № 9. — P. 2122.
19. Chuliev M. Improving the principle of diagnostics and treatment of purulent inflammatory diseases in children based on classifications / M. Chuliev // Science and Innovation. — 2024. — Vol. 3. — № D3. — P. 150–155.
20. Atoeva M.A. Ways to optimize local treatment of purulent-inflammatory diseases in the face and oral cavity / M.A. Atoeva // European Journal of Modern Medicine and Practice. — 2024. — Vol. 4. — № 6. — P. 99–104.
21. Rustamova G.A., Ten V.I., Rustamov A.A. Optimization of local treatment of patients with phlegmon of the face and neck using modern antiseptics / G.A. Rustamova, V.I. Ten, A.A. Rustamov // The American Journal of Medical Sciences and Pharmaceutical Research. — 2020. — Vol. 2. — № 11. — P. 42–52.
22. Курбанова С.Г., Смолькина А.В. Патент Российской Федерации № 2847933. — 2024.

© Курбанова Сабина Габибуллаевна (asg4@yandex.ru); Смолькина Антонина Васильевна (smolant1@yandex.ru);
Чебыкин Сергей Геннадьевич (sergeychebykin63@yandex.ru); Евсеев Роман Михайлович (ramashka_13@inbox.ru);
Слесарева Елена Васильевна (gistology2@mail.ru); Берч Екатерина Дмитриевна (berched@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.22

РОЛЬ ВНЕКЛЕТОЧНЫХ ВЕЗИКУЛ В ПАТОГЕНЕЗЕ ИШЕМИЧЕСКОГО ИНСУЛЬТА В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И КЛИНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

THE ROLE OF EXTRACELLULAR VESICLES IN THE PATHOGENESIS OF ISCHEMIC STROKE: EXPERIMENTAL AND CLINICAL STUDIES (LITERATURE REVIEW)

I. Lomova
M. Tikhonova

Summary. The review analyzes the role of extracellular vehicles (EVs)—nanoparticles secreted by all cells (endothelium, neurons, glia, and blood cells) in the development of ischemic stroke (IS). EVs transport proteins, lipids, microRNAs, and other «cargoes,» serving as a means of intercellular communication. In IS, the cells of the neurovascular unit and blood cells change their EV secretion profile. These EVs are involved in the initiation and maintenance of pathological processes: endothelial dysfunction, proinflammatory activation, apoptosis, disruption of the blood-brain barrier, and hypercoagulability. In clinical studies circulating EVs levels and composition, as well as vesicle-born microRNAs, correlate with the presence, severity, and volume of infarction and prognosis of ischemic stroke, offering promising tools for early diagnosis and monitoring. Experimental studies have shown that EVs of some cells (astrocytes, mesenchymal stem cells) have neuroprotective properties, transferring protective molecules and mitochondria to damaged neurons. The creation of engineered EVs loaded with therapeutic molecules (microRNA, neurotrophic factors, etc.) or mitochondria opens new possibilities for the development of targeted neuroprotective and reparative stroke therapy.

Keywords: ischemic stroke, extracellular vesicles, stroke markers, neuroprotection, mitochondria transfer, microRNA, targeted therapies for ischemic stroke.

Ломова Ирина Павловна
кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник НИЛ цереброваскулярной патологии научно-исследовательского центра ФГБУ Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова МЧС России, г. Санкт-Петербург
irpalo@mail.ru
Тихонова Маргарита Борисовна
клинический ординатор, ФГБНУ Российский центр неврологии и нейронаук, г. Москва
atsuna@mail.ru

Аннотация. Обзор литературы посвящен анализу роли внеклеточных везикул (ВВ) — наночастиц, выделяемых всеми клетками (эндотелием, нейронами, глией, клетками крови) в развитии ишемического инсульта (ИИ). ВВ переносят белки, липиды, микроРНК и другие «грузы», выполняя роль межклеточной коммуникации. При ИИ клетки нейроваскулярной единицы и клетки крови изменяют профиль секреции ВВ. Эти ВВ участвуют в запуске и поддержании патологических процессов: эндотелиальной дисфункции, провоспалительной активации, апоптоза, нарушения целостности гематоэнцефалического барьера, гиперкоагуляции. В клинических исследованиях обнаружено, что уровни и состав циркулирующих ВВ, а также переносимые везикулами микроРНК коррелируют с наличием, тяжестью, объемом инфаркта и прогнозом ИИ и представляют перспективные инструменты для ранней диагностики и мониторинга. В экспериментальных работах выявлено, что ВВ некоторых клеток (астроцитов, мезенхимальных стволовых клеток) обладают нейропротекторными свойствами, перенося защитные молекулы и митохондрии к поврежденным нейронам. Создание инженерных ВВ, наполненных терапевтическими молекулами (микроРНК, нейротрофическими факторами и др.) или митохондриями, открывает новые возможности для разработки таргетной нейропротективной и репаративной терапии ИИ.

Ключевые слова: ишемический инсульт, внеклеточные везикулы, маркеры инсульта, нейропротекция, перенос митохондрий, микроРНК, таргетная терапия инсульта.

Введение

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) являются основной причиной инвалидности и смертности в мире [1]. На долю ишемического инсульта (ИИ) приходится более 85 % всех острых нарушений мозгового кровообращения [2]. Существует высокая потребность в быстрой и надежной диагностике ИИ для использования в полной мере эффекта реперфузионной терапии и скорейшего применения нейропротекторных стратегий. Благодаря исследованиям последних лет установлена значительная роль в патогенезе ССЗ внеклеточных везикул (ВВ). ВВ являются клеточными производными — наночастицами, которые выделяются для контакта с ближайшими и удаленными клетками конститутивно, их спектр и состав меняется при развитии патологического процесса, стрессе, активации [3]. Воспаление и эндотелиальная дисфункция лежат в основе всех сердечно-сосудистых событий. Исследования Hirsch Y et al. показали потенциальную роль ВВ, как связующего

звена этих патогенетических процессов [4]. ВВ, выделенные из крови и других жидкостей организма, в качестве средства «жидкой биопсии» могут являться маркером для ранней диагностики, мониторирования и предсказания исходов при ССЗ [5, 6].

Понятие термина «внеклеточные везикулы», классификация, внутреннее содержимое

В соответствии с рекомендациями Международного общества внеклеточных везикул (MISEV), под термином «внеклеточные везикулы» (ВВ) подразумевается гетерогенная популяция клеточных частиц, не обладающих способностью к самостоятельному делению [7]. Эти структуры представляют собой естественные продукты клеточной секреции, ограниченные липидным бислоем, в который встроены трансмембранные белки и белки, ассоциированные с липидами. Классификация ВВ традиционно основывается на их биогенезе и размере. Выделяют три основных типа: 1) экзосомы (30–150 нм) — наиболее мелкие везикулы, формирующиеся внутри клетки в процессе созревания эндосом и образования многовезикулярных телец. Их высвобождение во внеклеточную среду регулируется механизмами эндосомального сортировочного комплекса, необходимого для транспорта (ESCRT); 2) микровезикулы (МВ), или эктосомы (100–1000 нм) — частицы среднего размера, которые образуются путём прямого отпочкования от плазматической мембраны. Их высвобождение происходит как конститутивно, так и в результате активации клетки. Ключевой особенностью МВ является экспозиция на их поверхности анионных фосфолипидов, в первую очередь фосфатидилсерина (ФС). Это придаёт везикулам выраженную прокоагулянтную активность, поскольку ФС служит платформой для сборки и активации теназных и протромбиназных комплексов, что в итоге усиливает генерацию тромбина [8]; 3) апоптотические тельца (800–5000 нм) — самые крупные ВВ, которые образуются в ходе фрагментации клеток, подвергающихся апоптозу. Кроме размеров, для характеристики ВВ важное значение имеет их протеомный состав, в частности наличие на поверхности специфических маркеров. К основным классам таких белков относятся: тетраспанины (CD9, CD63 CD81); гетеротримерные G-белки; интегрины и молекулы клеточной адгезии; белки, связывающие фосфатидилсерин; рецепторы факторов роста. Именно трансмембранные белки, такие как тетраспанины, наиболее часто используются в качестве валидационных маркеров для идентификации и подтверждения наличия ВВ в образце, поскольку они характерны для большинства везикул вне зависимости от типа клеток-продуцентов [7, 9].

Содержимое, так называемые «грузы» ВВ, состоят из широкого спектра молекулярных соединений, таких как нуклеиновые кислоты, белки и липиды, которые варьируют в зависимости от подтипов ВВ, клеточного происхождения и стимулов микроокружения [10].

Ключевыми из выявляемых в составе внеклеточных везикул РНК, имеющими непосредственное отношение к патогенезу сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ), являются микроРНК (miR) [11]. МикроРНК — это класс малых некодирующих молекул РНК длиной 19–22 нуклеотида. Их функция заключается в посттранскрипционном регулировании экспрессии генов за счёт комплементарного связывания с матричными РНК (мРНК). Это взаимодействие ведёт к деградации целевой мРНК или блокаде её трансляции [12]. Важно, что в системном кровотоке ВВ выступают в роли защитных носителей микроРНК, предохраняя их от разрушения под действием циркулирующих рибонуклеаз [13].

Виды ВВ, выделяемых клетками крови и эндотелием, их участие в межклеточной коммуникации при ССЗ

Наиболее многочисленной популяцией циркулирующих ВВ являются тромбоцитарные везикулы. Для них характерна экспрессия специфичных маркеров: CD41, CD42a, CD42b, CD61, CD62P (P-селектин). Эти ВВ участвуют в регуляции гемостаза, воспалительных реакций и состояния сосудистой стенки. Особый интерес представляют прокоагулянтные субпопуляции тромбоцитарных ВВ, экспрессирующие на поверхности фосфатидилсерин (ФС, выявляется аннексином V) и тканевой фактор (ТФ). Именно они обладают высокой протромботической активностью, ускоряя образование тромбина и формирование тромба [14, 15]. В целом, тромбоцитарные ВВ демонстрируют как прокоагулянтный, так и провоспалительный потенциал [16]. Исследования показывают, что прокоагулянтной активностью обладает около половины аннексин V-позитивных тромбоцитарных ВВ, в то время как аннексин V-негативные везикулы участвуют в иных процессах, например, в репарации тканей и заживлении ран [17, 18].

Эритроцитарные ВВ экспрессируют характерные для своей клетки-предшественницы маркеры, такие как CD235a. Их содержимое включает ферменты антиоксидантной системы, иммуноглобулины, компоненты системы комплемента, а также значительное количество железа [19]. Большинство из них, неся на мембране ФС, проявляют прокоагулянтные свойства. Эритроцитарные экзосомы (несущие маркеры CD235a и CD63) способны активировать моноциты к продукции провоспалительного фактора TNF-α и стимулировать пролиферацию Т-лимфоцитов, указывая на их возможную роль в модуляции иммунного и воспалительного ответа [20]. Кроме того, эти ВВ вовлечены в процессы атерогенеза, усиливая воспаление и межклеточную адгезию [5].

Лейкоцитарные ВВ, происходящие из нейтрофилов, моноцитов/макрофагов и лимфоцитов, идентифицируются по соответствующим клеточным маркерам. Их

типичный молекулярный груз включает провоспалительные цитокины (например, IL-1β), молекулы адгезии (ICAM-1, PSGL-1), тканевой фактор, компоненты комплемента (C3) и металлопротеиназы. Однако состав мембранных и цитозольных белков варьирует в зависимости от субпопуляции: для моноцитарных ВВ характерны CD11b, CD14, CD64, CD142; для лимфоцитарных — CD3, CD45; для нейтрофильных — CD35, CD66b и миелопероксидаза [21]. Функционально лейкоцитарные ВВ способствуют активации и трансэндотелиальной миграции лейкоцитов, участвуют в формировании специфического иммунного ответа, поддерживают воспаление, а также вносят вклад в развитие атеросклероза, дестабилизацию бляшек и тромбоз [21, 22, 23]. Таким образом, они играют двоякую роль в поддержании или нарушении сосудистого гомеостаза [24].

Эндотелиальные ВВ в кровотоке определяются по набору специфических маркеров: CD62E (E-селектин), CD31, CD144, CD105 и VCAM-1. В некоторых случаях у эндотелиальных ВВ была отмечена прокоагулянтная активность при повышении экспрессии на их поверхности ФС и ТФ [25, 8]. Повышенные уровни таких ВВ ассоциированы с прогрессированием атеросклероза, артериальной гипертензии и ишемической болезни сердца [26, 27]. Наряду с патогенетической ролью, описаны и защитные функции эндотелиальных ВВ. Так, было показано, что ВВ, полученные от эндотелиальных клеток, могут оказывать кардиопротекторное действие, уменьшая повреждения, вызванные ишемией и последующей реперфузией, в экспериментальных моделях [28]. Более подробно информация о ВВ, поверхностных белках, переносимых «грузах», представлена в таблице 1.

Высвобождаясь из клеток, внеклеточные везикулы (ВВ) служат важным инструментом для передачи биологических сигналов как на короткие, так и на значительные расстояния. Таргетная доставка информации обеспечивается благодаря способности ВВ селективно связываться с клетками-мишенями. Это происходит за счёт взаимодействия поверхностных компонентов везикул (специфических липидов или лиганд-связывающих белков) с соответствующими рецепторами на мембране клетки-реципиента. После распознавания и связывания ВВ попадают внутрь клетки посредством различных механизмов, включая эндоцитоз, фагоцитоз или прямое слияние с плазматической мембраной. В результате их биологически активного груза (нуклеиновые кислоты, белки, липиды, микроРНК и др.) высвобождается в цитоплазму, что может коренным образом менять функциональное состояние и метаболические пути клетки-реципиента. Помимо доставки груза, ВВ выполняют и другую ключевую функцию: они могут переносить на своей мембране полноценные функциональные рецепторы. Таким образом, клетки, изначально не экспрессирующие определённые рецепторы, могут приобретать их, поглощая везикулы. ВВ также могут усиливать сигнальный ответ, доставляя дополнительные копии рецепторов, уже присутствующих на клетке-мишени, что повышает её чувствительность к внешним сигналам [5, 8, 10]. Кроме того, выявлено избирательное присутствие митохондрий в ВВ. Перенос митохондрий везикулами приводил к различным реакциям в клетках и тканях реципиента (в зависимости от используемой модели заболевания/патологии), которые, в первую очередь были вызваны повышением биоэнергетики в результате присутствия митохондрий, связанных с ВВ [29].

Было обнаружено, что в состоянии покоя эндотелиальные клетки высвобождают ВВ, которые способны подавлять активацию моноцитов, и противовоспалительные молекулы, связанные с воспалением сосудов при CC3 [30]. Показано, что воспаленные эндотелиальные клетки, индуцированные TNF-α, высвобождают ВВ, обогащенные цитокинами, хемокинами и другими маркерами воспаления, которые при переносе в моноциты способствуют их дифференцировке в про- или противовоспалительные фенотипы [31]. Выявлена связь между тромбоцитарными, моноцитарными ВВ и эндотелиальными клетками при ишемии миокарда [32]. Исследования подтверждают, что транспорт микроРНК тромбоцитарными везикулами является активным механизмом регуляции клеток-мишеней. Показано, что микроРНК miR126-3p, содержащаяся в тромбоцитарных ВВ, поглощается человеческими макрофагами. Внутриклеточная доставка этой молекулы приводит к снижению экспрессии ряда генов, что, в свою очередь, усиливает фагоцитарную активность макрофагов [33]. Схожий принцип межклеточной коммуникации демонстрируют и другие микроРНК. Так, тромбоцитарные ВВ, несущие miR-21, miR-223 и miR-339, способны влиять на фенотип гладкомышечных клеток сосудов. Их действие опосредовано модуляцией экспрессии рецептора к фактору роста тромбоцитов-β (PDGFR-β), что приводит к изменению функционального состояния этих клеток [34].

Виды и функции ВВ, высвобождающихся клетками головного мозга

Внеклеточные везикулы распространены во всех типах клеток головного мозга.

ВВ участвуют в различных физиологических и патологических процессах, таких как регуляция возбуждения нейронов, синаптическая пластичность, образование и поддержание миелиновой оболочки, распространение нейровоспаления, нейропротекция, а также распространение и удаление токсичных белковых агрегатов [35]. ВВ перемещаются через гематоэнцефалический барьер с последующим распределением не только в пространстве вокруг клеток, но и в циркулирующих жидкостях, в том числе в спинномозговой жидкости, плазме

крови [36]. ВВ участвуют во многих функциях, ориентированных не только на целые клетки, но и на их части, например синапсы нейронов (развитие, регуляция, сила) и аксоны (рост, регенерация) [37]. Значительная важность межнейронных везикул и негативный контроль, вызванный их избытком, отмечены в возбуждающих глутаматергических синапсах [38]. Нейрональне ВВ участвуют в важных процессах, таких как регуляция нейрогенеза и сборка нейронных цепей [39]. Нейроны тесно связаны с глиальными клетками, такими как астроциты, олигодендроциты и микроглия.

Нейропротекторный эффект астроцитарных внеклеточных везикул (ВВ) реализуется, в частности, благодаря доставке в нейроны специфического белка — астроцитарного прионного протеина (PrP). Этот переносимый ВВ белок повышает устойчивость нейронов к окислительному стрессу, что в условиях кислородного голодания (гипоксии) или недостатка кровоснабжения (ишемии) способствует увеличению их выживаемости [40]. Кроме того, везикулы, секретируемые другими типами глиальных клеток — олигодендроцитами и микроглией, также участвуют в поддержании нейронального гомеостаза. Они выполняют функцию переносчиков для ряда ферментов, которые, попадая в нейроны, включаются в ключевые метаболические пути, обеспечивающие клетку энергией [41]. Обнаружено, что микроглия высвобождает различные ВВ в зависимости от окружающей среды и состояния активации, при этом ВВ, обогащенные патогенными микроРНК, такими как miRNA-34a, miRNA-125b, miRNA-146a, miRNA-155 способствуют нейровоспалению [42].

При иммунопатологических процессах в головном мозге ведущей в воспалительных реакциях является микроглия, способная преобразовывать свое состояние из гомеостатической (M0) в реактивную (M1) и ингибирующую (M2) формы. Это может быть связано с микроРНК, нацеленными на нейроны, с другими агентами, секретируемыми вовлеченными клетками, включая TNFα, интерлейкин 1A (IL-1A) и различные хемокины [42]. На нейровоспаление микроглии может влиять сопутствующая активация астроцитов, ВВ из которых могут ослаблять или усиливать действия микроглии [43]. Показано, что ВВ, полученные из астроцитов, инкапсулируют и впоследствии высвобождают различные нейропротекторные и нейрореститутивные факторы, включая фактор роста фибробластов-2, фактор роста эндотелия сосудов, аполипопротеин-D, белки теплового шока, синапсин-1 и глутаматные транспортеры к их внеклеточным мишеням, в том числе к нейронам [44]. Известно, что другой компонент ВВ, полученных из астроцитов, miR-873a-5p, ослабляет нейровоспаление, опосредованное микроглией [43].

Эндотелиальные клетки составляют одну из крупнейших клеточных популяций в ЦНС и располагаются в непосредственной близости от нейронов и нервных стволовых клеток. Гематоэнцефалический барьер (ГЭБ) состоит из эндотелиальных клеток, перицитов, астроцитов, нейронов и внеклеточного матрикса, в совокупности известных как нервно-сосудистая единица (NVU) [45]. Каждый компонент NVU тесно связан друг с другом, образуя структурную и функциональную единицу, регулируя кровоток в центральной нервной системе (ЦНС) и энергетический обмен, а также проницаемость ГЭБ. Высокоселективный, полупроницаемый ГЭБ, с одной стороны защищает мозг от проникновения патологических соединений из крови, но с другой стороны, плотный характер ГЭБ также препятствует высвобождению специфичных для ЦНС биомаркеров в кровь, что делает циркулирующие маркеры ЦНС трудными для обнаружения. Целостность ГЭБ в основном поддерживается тесными контактами между эндотелиальными клетками [46]. В эндотелиоцитах ГЭБ обнаружен сниженный пиноцитоз / трансцитоз [47], повышенная экспрессия молекул плотного соединения, таких как клаудины, окклюдин или zonula occludens 1 (ZO-1) [48] Перициты и гладкомышечные клетки сосудов, расположенные в базальной мембране, обеспечивают структурную поддержку, регулируют вазодилатацию / сужение сосудов [49]. Нейроны в NVU передают сигналы и контролируют локальный мозговой кровоток напрямую, например, через оксид азота (NO), или косвенно через глиальные клетки [50], а также через уровни высвобождаемых нейротрансмиттеров при активации [51]. Многочисленные исследователи обнаружили, что ВВ могут пересекать ГЭБ и осуществлять взаимодействие между клетками NVU при помощи белков, мРНК или микроРНК для поддержания гомеостаза ЦНС [52]. Кроме того, ВВ, в частности экзосомы различного происхождения, восстанавливают поврежденные ткани и проявляют антиапоптотическое, противовоспалительное действие и защиту нейронов и сосудистой сети [53]. Xu et al. показали, что нейроны переносят miR-132 в эндотелиальные клетки через секретируемые экзосомы. Эта микроРНК поддерживает целостность сосудов головного мозга и регулирует экспрессию кадгерина эндотелия сосудов [54]. Клетки эндотелия также секретируют биоактивные молекулы для регулирования различных клеточных популяций в ЦНС с помощью ангиокринных факторов. В последние годы роль ВВ, секретируемых эндотелием церебральных сосудов, была признана важным механизмом, опосредующим взаимодействие эндотелиоцитов с нервными клетками [55, 56], показано, что экзосомы, происходящие из эндотелиоцитов, могут способствовать самообновлению, пролиферации и подавлять апоптоз нервных стволовых клеток у мышей [57].

ВВ при ишемии головного мозга в экспериментальных исследованиях

Быстрое лишение кислорода и питательных веществ сразу после ишемии во многих случаях приводят к мас-

сивной некротической и апоптотической гибели нейронов, обусловленной снижением уровня АТФ, высвобождением возбуждающих нейротрансмиттеров, выбросом активных форм кислорода, перегрузкой внутриклеточным кальцием и местным воспалением. Поскольку разрушению ГЭБ предшествуют различные физиологические процессы, ВВ, высвобождающиеся из первоначально пораженных клеток, например эндотелия, могут обеспечивать ранний и уникальный маркер начинающихся ишемических изменений в мозге [2]. Большинство экспериментальных исследований ишемического инсульта проводились на модели фокальной ишемии (например, окклюзия СМА у крыс) или с использованием тканей или клеток, которые экспериментально подвергались гипоксии или ишемии (например, на модели кислородо-глюкозной депривации (OGD), имитирующей ишемию головного мозга). В исследовании Yang J. Et al. выдвинуто предположение, что нейроны высвобождают ВВ, содержащие miRNA-98, в качестве сигнала «помоги мне» во время инсульта. Обнаружено, что miRNA-98 из невральных ВВ действует как эндогенный защитный фактор при ишемии, вызывает снижение микроглиального фагоцитоза частично поврежденных, но все еще жизнеспособных нейронов в области полутени, посредством нацеливания на рецептор фактора, активирующего тромбоциты (PAFR) [58]. Было обнаружено также, что нейроны высвобождают ВВ, содержащие miRNA-124a, что приводит к увеличению экспрессии глутаматного транспортера-1 и увеличению поглощения глутамата астроцитами [59]. В совокупности с тем фактом, что miRNA-124a увеличивается после инсульта, возможно, это происходит при инсульте как ответ на эксайтотоксические изменения. В исследовании Chiang C.-S et al. изучалось содержание везикулярных микроРНК в культурах первичных нейрональных клеток коры головного мозга крыс на модели OGD и было обнаружено, что экспрессия 45 микроРНК, содержащихся в ВВ, значительно изменена по сравнению с нормоксическими условиями [60].

В ряде исследований было показано, что при инсульте эндотелиальные клетки и соответствующие ангиокринные функции участвуют в возникновении, прогрессировании и постинсультной регенерации нервной системы [61]. В работе Kang-Yi Yue et al. выявлено, что эндотелиальные ВВ могут защищать нейроны после инсульта, вызванного OGD in vitro и в модели ишимии-реперфузии головного мозга при окклюзии СМА у крыс in vivo. Исследователи уточнили, что этот эффект, вероятно, был опосредован miR-1290, переносимой ВВ [56]. В работе Chen F.et al. на модели фокальной ишемии крыс обнаружено, что микроРНК-126 ВВ из эндотелиальных клеток головного мозга снижается через 3 ч после ишемии как в условиях транзиторной, так и постоянной ишемии и возвращается к исходному уровню через 24 ч. Выявлено, что общие уровни микроРНК-126 в сыворотке, по-видимому, снижаются только при постоянных ишемических состояниях, что позволяет предположить, что сывороточная микроРНК-126 может служить биомаркером тяжести инсульта [62].

В начале ишемического инсульта энергетическая недостаточность и ведет к набуханию эндотелиальных клеток, потере ими контакта друг с другом и с концевыми ножками астроцитов [63], что в сочетании с деградацией эндотелия приводит к апоптотической гибели клеток в NVU [62]. В работе Yiyang Li et al. сравнили защитную эффективность действия ВВ в отношении целостности ГЭБ между ВВ, полученными из мезенхимальных стволовых клеток костного мозга, и ВВ из культуры эндотелиальных клеток головного мозга после острого ИИ и исследовали, связан ли механизм с ВВ, противодействующими эндоцитозу кавеолин-1 (Cav-1)-зависимых белков плотного соединения. Оба вида ВВ проявляли сходную эффективность в снижении объема инфаркта мозга и проницаемости ГЭБ и в повышении экспрессии зонулина -1 (ZO-1) и клаудина-5 (белков плотного соединения мембраны эндотелиальных клеток) через 24 ч на модели окклюзии СМА у крыс. В то же время ВВ, полученные из мезенхимальных стволовых клеток костного мозга, в большей степени улучшали неврологические функции. Одновременно оба метода лечения ВВ подавляли высокую экспрессию Cav-1 в эндотелиальных клетках, подвергшихся воздействию OGD и в ишемизированных микрососудах головного мозга, и эта эффективность была более заметной после введения ВВ, полученных из мезенхимальных стволовых клеток костного мозга [64].

В исследовании Hayakawa K. et al. продемонстрирован процесс эндогенного межклеточного переноса митохондрий и его результаты. Выявлено, что добавление кондиционированной среды с астроцитами, содержащей ВВ с митохондриями к нейронам, лишенным кислорода и глюкозы (OGD), повышает уровень АТФ в нейронах и их жизнеспособность [65]. В *in vivo* мышиной модели окклюзии средней артерии при инсульте флуоресцентно меченые астроцитарные митохондриальные частицы из ВВ были обнаружены в периинфарктных нейронах через 24 часа после введения в кору головного мозга. В этих кортикальных нейронах наблюдалась повышенная экспрессия сигналов, связанных с выживанием, в том числе фосфорилированного AKT и BCL-XL, а также повышенная экспрессия TOM40, маркера митохондрий. Подавление передачи сигналов CD38 с помощью экспериментов по подавлению экспрессии гена CD38 привело к подавлению эндогенного переноса митохондрий из астроцитов в нейроны, что привело к уменьшению количества митохондрий в нейронах и ухудшению неврологических показателей. Эти результаты выявили ранее неизвестный механизм эндогенной нейропротекции, опосредованной астроцитами посредством переноса функциональных митохондрий [66, 67].

Разрушение ГЭБ приводит к повышению проницаемости сосудов, вызывает вторичное воспаление нейронов и ускоряет процесс ишемического повреждения ткани. Между тем, воспалительная реакция, индуцируемая активацией глиоцитов, также может усиливать повреждение целостности ГЭБ [68]. Микроглия играет динамическую роль как в повреждающих, так и в нейропротекторных процессах после инсульта. Как было рассмотрено Taylor R.A.and Sansing L.H при анализе нескольких исследований, микроглия противовоспалительного типа первоначально преобладает в ишемизированном ядре, с последующим переходом к микроглии провоспалительного типа в течение 2 недель [69]. В острой фазе микроглия может играть защитную роль, поскольку селективное уничтожение микроглии у крыс увеличивает объем инфаркта после окклюзии СМА [70]. В исследовании Lin Zhang et al. оценивали влияние ВВ из микроглии, предварительно кондиционированной OGD, на ангиогенез и апоптоз нейронов. В условиях in vitro применение ВВ стимулировало как ангиогенез, так и образование трубочек в эндотелии и подавляло повреждение нейрональных клеток. Характеристика ВВ микроглии с помощью вестерн-блоттинга и других методов показала, что эти ВВ богаты TGF-β1. Обогащенные TGF-β1 ВВ, секретируемые из предварительно кондиционированной OGD микроглии, стимулировали М2 поляризацию микроглии, находящейся в окружении в ишемизированном мозге, что может способствовать регуляции ранней воспалительной реакции. У мышей, перенесших инсульт, получавших такие ВВ, выявлено лучшее функциональное восстановление при анализе поведенческих тестов. Следовательно, настоящие результаты предполагают новый способ действия ВВ, полученных из предварительно кондиционированной OGD микроглии, путем регуляции пути TGF-β/Smad2/3, чтобы способствовать регенерации тканей и неврологическому восстановлению у мышей, перенесших инсульт [71].

Регуляция подтипов микроглии посредством экзосомного транспорта микроРНК из церебральных микрососудов была также установлена в исследовании Mengqi Zhang et al. Обнаружили, что miR-3613-3p был повышен в экзосомах микрососудов мозга. Нокдаун miR-3613-3p улучшал выживаемость клеток, миграцию и ангиогенез церебральных микрососудов при OGD. Вмешательство в экспрессию эндотелиальной miR-3613-3p в микрососудах мозга препятствовало повышению miR-3613-3p в экзосомах и усиливало М2 поляризацию микроглии, что способствовало снижению апоптоза нейронов [72].

При ИИ астроциты участвуют в остром повреждении, а также функционируют для сдерживания поврежденной области мозга посредством образования глиального рубца. Активированные эндотелиальные клетки стимулируют высвобождение ВВ из астроцитов и микроглии. Существует взаимосвязь между микроглией и секрецией ВВ астроцитами. Было показано, что АТФ стимулирует и изменяет высвобождение ВВ микроглией, что, в свою очередь, стимулирует приобретение воспалительного фенотипа астроцитами [73]. Более того, АТФ, высвобождаемый из астроцитов, запускает высвобождение ВВ в микроглии с повышенным содержанием IL-1β. Поскольку астроциты однозначно связаны с целостностью ГЭБ, измененные профили ВВ астроцитов могут служить индикаторами дисфункции ГЭБ [74].

Глутамат может стимулировать высвобождение везикул из олигодендроцитов, и эти ВВ затем поглощаются нейронами в качестве поддержки в условиях стресса. Таким образом, олигодендроциты не только играют важную роль в ремиелинизации после ишемического повреждения, но также влияют на выживаемость нейронов [75]. В исследовании in vitro, изучавшем эффекты ВВ, полученных из олигодендроцитов, в совместной культуре олигодендроцитов / нейронов при OGD, клетки, подвергшиеся воздействию ВВ, полученных из олигодендроцитов, имели значительно более высокую метаболическую активность по сравнению с контрольными клетками. Эти ВВ, по-видимому, содержат полезные антиоксиданты, включая такие ферменты, как каталаза и супероксиддисмутаза 1 (SOD1) [75]. Также было обнаружено, что олигодендроциты высвобождают ВВ в ответ на глутаматергическую передачу сигналов и другие нейрональные сигналы.

Показано, что различные некодирующие РНК, а именно miR-124-3p, miR-126, miR-132, miR-221-3p и miR542-3p, снижаются в ишемизированном мозге и крови, тогда как другие, а именно miR-98 и miR-494, повышаются в определенные моменты времени [76]. Обнаружение этих ВВ, в том числе везикулярных микроРНК в плазме с хорошей чувствительностью могло бы обеспечить потенциальные биомаркеры для прогноза ишемии головного мозга. Введение ВВ, полученных из MSC, может повысить уровни микроРНК в ишемизированной ткани мозга. Следовательно, везикулярные микроРНК играют жизненно важную роль в координации тканевых реакций на ишемический инсульт в условиях острого и подострого периода, при этом микроРНК модулируют выживаемость нейронов, воспалительные реакции, ангиогенез, нейрогенез и пластичность нейронов.

Таким образом, информация об изменениях в клеточной функции в ЦНС на основании изменения профиля выделяемых ВВ и их содержимого может помочь в изучении патофизиологических процессов при ИИ. Эти данные о роли ВВ эндотелиального, нейронального, глиального происхождения при церебральной ишемии могут не только служить в качестве потенциальных биомаркеров остроты, тяжести и стадий развития ИИ, но и помочь в разработке нового терапевтического подхода к лечению инсульта.

ВВ при ишемическом инсульте у пациентов

Поскольку разрушению ГЭБ предшествуют различные физиологические процессы, ВВ, высвобождаемые из клеток, изначально пораженных, например, эндотелиальных клеток, могут обеспечивать раннее «молекулярное окно» в мозг, пока ГЭБ остается неповрежденным, а ткани все еще можно спасти [2]. Выявление новых прогностических биомаркеров для стратификации риска пациентов может снизить бремя заболевания. Учитывая возможность неинвазивного сбора ВВ и определения их характеристик, проведены многочисленные исследования ВВ как прогностического биомаркера для оценки изменений клеточной функции на острых стадиях инсульта [77]. При ишемии эндотелиальные клетки подвергаются значительному набуханию и воспалительному стрессу, что способствует высвобождению ВВ [63]. Было показано, что несколько типов клеток головного мозга и микроциркуляторного русла выделяют ВВ в кровь во время инсульта, включая нервные клетки, клетки-предшественники нервной системы, эндотелиальные клетки, тромбоциты, эритроциты, гранулоциты и лейкоциты, включая моноциты и лимфоциты [2].

В большинстве исследований сообщалось о высоком уровне циркулирующих ВВ у пациентов с инсультом; они ассоциировались с тяжестью инсульта, размером очаговых изменений и прогнозом. О повышенных уровнях эндотелиальных ВВ при ИИ впервые сообщили в 2006 году Simak и коллеги, они обнаружили повышенные уровни субпопуляции эндотелиальных ВВ (ФС (+), CD105(+), CD41a(-)) при остром ишемическом инсульте по сравнению с контрольной группой. Они также сообщили о корреляции между тяжестью инсульта и специфическими субпопуляциями ВВ эндотелиального происхождения. Наиболее сильной корреляцией с объемом ишемического поражения были CD54 / ICAM-1–позитивные ВВ (CD105(+), CD54(+), CD45(-)), в то время как ВВ, полученные из эндотелиальных клеток (CD105(+), CD41a (-), CD45(-)), коррелировали с долгосрочным клиническим исходом. Кроме того, они смогли провести различие между тяжелым и незначительным инсультом [78]. В работе Jung K.H с соавторами более высокие уровни CD62E (E-селектин) позитивных эндотелиальных ВВ наблюдались в проспективном исследовании 348 пациентов с острым инсультом (n=73) по сравнению с пациентами с сосудистыми факторами риска, но без инсульта (n = 275). Авторы также обнаружили, что уровни CD62E-положительных эндотелиальных ВВ связаны с недавними ишемическими эпизодами и большими объемами инфаркта. Так же было отмечено, что у пациентов с экстракраниальным и внутричерепным артериальным стенозом наблюдались различные паттерны эндотелиальных ВВ [79]. Таким образом подтверждено, что эндотелиальные ВВ могут быть маркерами повышенного риска ишемического инсульта, а также, что фенотипический профиль ВВ различается в зависимости от места артериального стеноза (внутричерепного или внечерепного) у пациентов с повышенным риском цереброваскулярных заболеваний.

Ранее было показано, что клетки-предшественники нейронов замещают отмирающие нейроны в местах повреждения головного мозга. Но оставалось неясным, связана ли активация клеток-предшественников нейронов с выделением ВВ, как длительно сохраняется эта активация и связана ли она с тяжестью инсульта. Этим вопросам посвящена работа Chiva-Blanch G. С соавт. [80]. В пролонгированнгом крупномасштабном исследовании обнаружено, что аннексин-V-позитивные ВВ, происходящие из различных типов клеток, включая клетки-предшественники нервной системы (CD34(+), CD56(+)), тромбоциты (CD61(+)), эндотелиальные клетки (CD146(+)), эритроциты (CD235ab (+)) и лейкоциты (CD45(+)), были повышены в образцах крови пациентов с острым ишемическим инсультом. Эти результаты показывают, что инсульт вызывает генерализованную активацию клеток крови и сосудов и инициирует процесс восстановления нейрональных клеток после инсульта. Через 90 дней количество ВВ, выделяемых нейрональными клетками-предшественниками, уменьшилось, а количество ВВ, полученных из гладкомышечных клеток, увеличилось по сравнению с уровнями в начале инсульта, но это увеличение отмечалось только у пациентов с наиболее обширными повреждениями головного мозга. Очевидно, более крупные поражения головного мозга связаны с более глубоким повреждением сосудов, затрагивающим гладкомышечные клетки сосудов [80].

В другом исследовании, оценивающем количество эндотелиальных ВВ при ТИА и ИИ по сравнению со здоровым контролем, выявлено заметное увеличение протромботических эндотелиальных ВВ CD146(+), CD62E(+) и аннексин V(+) как при ТИА, так и при инсульте в течение 48 ч после события, причем при инсульте отмечена тенденция к большему повышению эндотелиальных ВВ, чем при ТИА. Их уровни остаются высокими до 30 дней после ИИ, что свидетельствует о повышенном риске повторения ИИ [81]. В обзоре El-Gamal H. et al циркулирующие ВВ оценены как биомаркеры инсульта с акцентом на значении эндотелиальных и тромбоцитарных ВВ. Эндотелиальные ВВ были признаны как биомаркерами, так и эффекторами активации и повреждения эндотелиальных клеток, в то время как тромбоцитарные ВВ обладали сильным прокоагулянтным потенциалом и активировались при тромботических состояниях [82].

Исходя из предположения, что ВВ лейкоцитарного происхождения могут способствовать воспалению сосудов и воспалительному процессу при остром ишемическом инсульте, Zhangping H. et al проанализировали значение различных фенотипов ВВ лейкоцитарного про-

исхождения в качестве специфических биомаркеров сосудистого воспалительного повреждения при ИИ. Выявили, что у пациентов с ИИ было значительно повышено количество ВВ лейкоцитарного (CD45+), моноцитарного (CD14+), лимфоцитарного (CD4+), гранулоцитарного (CD15+) происхождения по сравнению со здоровым контролем (p <0,05). Было также установлено, что уровни ВВ CD14+ в плазме крови достоверно коррелировали с тяжестью инсульта (r=0,355, p=0,019), степенью стеноза сосудов головного мозга (r=0,255, p=0,025) и подтипом инсульта (r =0,242, p=0,036). Пришли к выводу, что уровни ВВ CD14+ могут быть многообещающим биомаркером тяжести ишемии и исхода инсульта в клинике [83].

При ИИ усиление воспаления активирует систему свертывания крови, повышенную активацию тромбоцитов. Во время клеточной активации и агрегации тромбоциты могут вызывать повышенное высвобождение нескольких провоспалительных и протромботических медиаторов, включая микроРНК и ВВ. В исследовании Eyileten C.et al. стремились оценить профиль циркулирующих микроРНК, связанных с функцией и воспалением тромбоцитов, и циркулирующие ВВ из тромбоцитов, лейкоцитов и эндотелиальных клеток у пациентов с острым ИИ. Обследовны 28 пациентов с острым ИИ, и контрольную группу составили 35 пациентов, получавших терапию ацетилсалициловой кислотой (АСК) без инсульта и/или ТИА в анамнезе. Образцы венозной крови были взяты у контрольной группы и пациентов с ИИ, получавших терапию АСК через 24 ч после начала острого ИИ, через 7 дней после госпитализации. Определяли концентрации циркулирующих подтипов ВВ (из тромбоцитов, лейкоцитов и эндотелиальных клеток) в плазме методом проточной цитометрии, а qRT-PCR использовали для определения нескольких циркулирующих микроРНК плазмы (miR-19a-3p, miR-186-5p и let-7f (предшественник микро РНК mir-98)). Выявили, что у пациентов с высокой реактивностью тромбоцитов (на основе агрегометрии тромбоцитов) была значительно повышена концентрация ВВ тромбоцитов (CD62 +) и лейкоцитов (CD45 +) по сравнению с пациентами с нормальной реактивностью тромбоцитов в день 1 острого инсульта (p = 0,012, p =0,002, соответственно). Диагностические значения исходных микроРНК и ВВ оценивали с помощью анализа кривой ROC. Анализ кривой ROC показал, что объединение экспрессии miR-19a-3p, концентрации тромбоцитарных и лейкоцитарных ВВ дало более высокую AUC, чем значение каждого отдельного биомаркера, поскольку AUC составила 0,893 (95% ДИ, 0,79–0,99). У пациентов с умеренным инсультом были значительно повышены уровни экспрессии miR-19a-3p по сравнению с пациентами с легким инсультом в первый день ИИ. (AUC: 0,867, (95 % ДИ 0,74–0,10) p = 0.001). Пришли к заключению, что сочетание различных биомаркеров процессов, лежащих в основе патофизиологии ИИ, может быть полезным для ранней диагностики ишемических событий, и что в будущем циркулирующие биомаркеры могут быть использованы на догоспитальном этапе ИИ [84].

В исследованиях A. Carandina et al. было обнаружено, что специфические подтипы ВВ связаны не только с тяжестью инсульта, но и как краткосрочными, так и долгосрочными исходами. Неврологический статус 47 пациентов с острым ИИ был оценен при поступлении (T0), сразу после лечения реканализацией или через 2 ч у пациентов, не получавших лечения (T1), и через одну неделю (Tw) с использованием шкалы инсульта Национального института здоровья (NIHSS), а через 3 месяца с использованием модифицированной шкалы Рэнкина (mRS). Обнаружили, что количество тромбоцитарных ВВ при поступлении было положительно связано с тяжестью ишемического инсульта в начале, а также с тяжестью среднесрочного исхода. Выявлено, что ВВ, полученные из Т-клеток, при поступлении были положительно связаны как с исходами раннего, так и среднесрочного ишемического инсульта. Более того, ВВ, полученные из Т-клеток при T1, были положительно связаны с исходом ишемического инсульта в среднесрочной перспективе. Таким образом определение ВВ может представлять собой инструмент для улучшения стратификации риска у пациентов с ишемическим инсультом и мониторинга лечения после реканализации. [85].

В работе Datta A и др изучены прогностические кандидаты биомаркеров течения лакунарного инфаркта методом количественной протеомики обогащенной ВВ плазмы [86]. Плазму собирали у 45 пациентов после лакунарного инсульта, проводили проспективный мониторинг в течение до пяти лет, разделили на пациентов 3 группы (1-отсутствие неблагоприятного исхода, 2-рецидивирующее сосудистое событие и 3-когнитивное снижение без рецидивов сосудистых событий). При биоинформатическом анализе в группах с неблагоприятным исходом выявили повышенную регуляцию специфических для мозга белков, включая основной белок миелина, белки каскада коагуляции (альфа-цепь фибриногена, бета-цепь фибриногена) и молекулы фокальной адгезии (интегрин альфа-IIb, талин-1 и filamin-A). Притом, уровень альбумина был понижен в обеих группах пациентов с неблагоприятным исходом. Таким образом, профилирование фракций циркулирующих ВВ на этапе постинсультного восстановления представляло собой технически и концептуально предпочтительную стратегию для изучения текущих нейропатологических процессов и выявления полезных прогностических маркеров.

Исследованию прогностического потенциала ВВ в подостром периоде для предсказания результатов лечения через 6мес посвящена работа Ruben A Jödicke с соавт. Обследованы 110 пациентов с ИИ в подостром периоде, проходивших 4-недельные аэробные тренировки или сеансы релаксации. Были оценены уров-

ни следующих ВВ: эндотелиальных (EnV: аннексин V+, CD45-, CD41-, CD31+/CD144+/CD146+), лейкоцитарных (LV: аннексин V+, CD45+, CD41-), моноцитарных (MoV: аннексин V+, CD41-, CD14+), нейрональных (NV: Аннексин V+, CD41-, CD45-, CD31-, CD144-, CD146-, CD56+/CD171+/CD271+) и тромбоцитарных (PV: Аннексин V+, CD41+) до и после вмешательства. Ассоциации исходных уровней и изменения концентраций ВВ с индексом Бартела (BI) и сердечно-сосудистыми событиями в первые 6 месяцев после инсульта были проанализированы с использованием регрессионного анализа смешанной модели и регрессии Кокса. Выявили, что большинство ВВ оказались тромбоцитарного происхождения, за ними следовали нейрональные и эндотелиальные ВВ. Установлено, что более низкие значения тромбоцитарных и нейрональных ВВ на исходном уровне были связаны с худшим функциональным исходом в первые 6 месяцев после инсульта. Кроме того, увеличение нейрональных и лейкоцитарных ВВ с течением времени было связано с ухудшением BI в первые 6 месяцев после инсульта. Необходимы дальнейшие исследования взаимосвязи между типами ВВ и их динамикой с функциональным исходом после инсульта [87].

В последние годы микроРНК, переносимые ВВ, привлекают большое внимание, поскольку они функционируют как посттранскрипционные регуляторы экспрессии генов и, следовательно, представляют терапевтический потенциал [88]. Это также имело место в исследованиях «груза» ВВ, где характеристика микроРНК сочеталась с потенциальным лечением инсульта. Кроме того, микроРНК могут функционировать как биомаркеры, поскольку их легко идентифицировать с помощью методов секвенирования, QT-ПЦР или прямой гибридизации. Для неотложной диагностики инсульта, представляет интерес анализ микроРНК ВВ плазмы, полученной в острой фазе. В нескольких исследованиях сообщалось о специфичных для инсульта микроРНК, полученных из ВВ. Уровень miR-134 в ВВ плазмы у пациентов с острым ишемическим инсультом выше, чем в нормальном контроле, а объем инфаркта положительно связан с худшим прогнозом у пациентов с инсультом [89]. Повышенная экспрессия miR-9 и miR-124 [90] также отмечалась у пациентов с ИИ в острой фазе и коррелировали с объемом инфаркта и показателями NIHSS и концентрацией интерлейкина-6 в крови. Экспрессия микроРНК изменялась на протяжении различных фаз инсульта, включающего сверхострую фазу ишемии (<6 ч), острый ишемический инсульт (от одного до трех и 4–7 дней), подострую фазу ишемии (8–14 дней) и фазу восстановления (>14 дней). В клинических исследованиях выявлено, что уровни экспрессии miR-30a-5p, miR-422a, miR-21–5p и miR-1256–2 — различаются до 3-х раз на этих четырех фазах. [91].

Корреляции более высоких уровней miR-223 в циркулирующих ВВ обнаружены также у пациентов с острым ИИ, с оценками по NIHSS и объемом инфаркта головного мозга и, следовательно, с худшим прогнозом [92]. Кроме того, при исследовании miR-422a, miR-miR–21-5p и miR-30a-5p [93] выявили начальный пик экспрессии в острой фазе с последующим снижением в подострой фазе. Эти колебания уровней микроРНК потенциально могут указывать на время, прошедшее с начала инсульта. Однако изменяющиеся уровни микроРНК вносят риск несовершенной диагностики в зависимости от времени забора крови [94]. Более того, транзиторная ишемическая атака и постоянная ишемия головного мозга различны. Через три часа после постоянной ишемии головного мозга происходит быстрое снижение уровня везикулярного miR-126 в сыворотке, и он возвращается к норме через 24 ч [95].

Анализ данных проведенных исследований позволяет выделить специфические ассоциации между микроРНК, содержащимися во внеклеточных везикулах, и ключевыми клиническими параметрами ишемического инсульта (ИИ). В частности, установлены следующие корреляции: везикулярные микроРНК: miR-9, miR-124, miR-134, miR-152-3p и miR-223 связаны с тяжестью инсульта; miR-134 и miR-223 с плохим прогнозом; miR-9, miR-124 и miR-134 с объемом инфаркта; и miR-9, miR-124 и miR-134 с повышением уровня интерлейкина-6. Повышенные уровни экспрессии miR-19a-3p отмечались у пациентов с умеренным инсультом, по сравнению с пациентами с легким инсультом в первый день ИИ. Везикулярные miR-21-5p и miR-30a-5p связаны с апоптозом, который отличает острую фазу ишемического инсульта от подострой фазы и периода восстановления [91]. Кроме того, было показано, что экзосомные miR-422a и miR-125b-2-3p в крови могут быть диагностическими биомаркерами у пациентов с инсультом, и что комбинированное использование этих двух микроРНК может быть эффективным при определении тяжести инсульта [96].

Заключение

Таким образом, основываясь на комбинации микроРНК и поверхностных и специфических белков, ВВ могут быть признаны потенциальными биомаркерами в диагностике ишемического инсульта, определения его остроты, прогноза тяжести заболевания. Понимание сроков, в течение которых определенные типы клеток в ЦНС высвобождают ВВ, и того, как их «груз» меняется с течением времени на протяжении всего хода инсульта, представляет собой захватывающую возможность расширить наши знания об изменениях в клеточной функции, проявляющихся в патофизиологии инсульта. Использование ВВ в качестве средств периферической оценки клеточной функции ЦНС позволило бы проводить клинические пробы в различные моменты времени после инсульта у пациентов [97]. Эти данные о роли

ВВ в качестве потенциальных биомаркеров патофизиологических процессов в мозге при ИИ могут помочь не только в более точной диагностике, мониторировании и в прогнозировании исходов инсульта, но и обеспечить разработку нового таргетного подхода к лечению церебральной ишемии.

Появляющиеся многочисленные данные о том, что в содержимом ВВ обнаружены митохондрии, которые включаются в их состав в процессе их биогенеза, а перенос митохондрий с помощью ВВ приводил к повышению биоэнергетики — открывается новая возможность использования митохондрий из ВВ в качестве нового лекарственного средства при ишемии головного мозга [29].

Способность доставлять различные вещества в конкретные клетки делает ВВ перспективными кандидатами для доставки лекарств. Инженерные модификации ВВ в основном направлены на увеличение их нагрузочной способности, времени циркуляции и способности нацеливаться на достижение лучших терапевтических результатов. Исследования показывают, что повышение содержания микроРНК в сконструированных ВВ потенциально может облегчить ишемическое повреждение головного мозга. Например, Wang et al. [98] обнаружили, что модифицированные ВВ, богатые miR-126, более эффективны, чем естественные ВВ при лечении ишемии, вызванной диабетом, уменьшая острое повреждение и способствуя восстановлению нервной системы. Кроме того, сконструированные ВВ были исследованы в качестве средств доставки лекарств для лечения ишемических повреждений. Такие подходы могут уменьшить повреждение и инактивацию лекарственных средств во время транспортировки, улучшая их биодоступность и специфичность. Например, Zhu et al. [99] показали, что сконструированные ВВ, «нагруженные» нейротрофическим фактором головного мозга (BDNF), не только ингибировали активацию микроглии после инсульта, но и способствовали дифференцировке эндогенных нервных стволовых клеток в нейроны. Эти результаты открывают новую перспективу для углубленного изучения методов разработки модифицированных ВВ [100] . Хотя эта область все еще находится на стадии изучения, результаты уже сейчас вдохновляют на дальнейшие исследования, чтобы углубить наше понимание потенциала ВВ, в диагностике, и особенно в новых подходах к лечению ишемического инсульта.

ЛИТЕРАТУРА

1. World Health Organization the Top 10 Causes of Death. [(accessed on 26 April 2021)]. Available online: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-ofdeath
2. Stenz K.T., Just J., Blauenfeldt R.A., Drasbek K.R. Extracellular Vesicles in Acute Stroke Diagnostics. Biomedicines. 2020 Jul 28;8(8):248. doi: 10.3390/biomedicines8080248.
3. Zhang X., Wu Y., Cheng Q. et al. Extracellular Vesicles in Cardiovascular Diseases: Diagnosis and Therapy. Front Cell Dev Biol. 2022 Jun 1; 10:875376. doi: 10.3389/fcell.2022.875376.
4. Hirsch Y., Geraghty J.R., Reiter C.R. et al. Unpacking the Role of Extracellular Vesicles in Ischemic and Hemorrhagic Stroke: Pathophysiology and Therapeutic Implications. Transl Stroke Res. 2023 Apr;14(2):146–159. doi: 10.1007/s12975-022-01027-2.
5. de Freitas R.C.C., Hirata R.D.C., Hirata M.H., Aikawa E. Circulating Extracellular Vesicles As Biomarkers and Drug Delivery Vehicles in Cardiovascular Diseases. Biomolecules. 2021 Mar 5;11(3):388. doi: 10.3390/biom11030388
6. Elahi F.M., Casaletto K.B., Altendahl M et al. «Liquid Biopsy» of White Matter Hyperintensity in Functionally Normal Elders. Front Aging Neurosci. 2018 Nov 9;10:343. doi: 10.3389/fnagi.2018.00343.
7. Welsh J.A., Goberdhan D.C.I., O'Driscoll L. et al. Minimal information for studies of extracellular vesicles (MISEV2023): From basic to advanced approaches. J Extracell Vesicles. 2024 Feb;13(2):e12404. doi: 10.1002/jev2.12404.
8. Zarà M., Guidetti G.F., Camera M. et al. Biology and Role of Extracellular Vesicles (EVs) in the Pathogenesis of Thrombosis. Int J Mol Sci. 2019 Jun 11;20(11):2840. doi: 10.3390/ijms20112840.
9. Zaborowski M.P., Balaj L., Breakefield X.O.., Lai C.P. Extracellular Vesicles: Composition, Biological Relevance, and Methods of Study. Bioscience. 2015 Aug 1;65(8):783-797. doi: 10.1093/biosci/biv084.
10. Chong S.Y., Lee C.K., Huang C. et al. Extracellular Vesicles in Cardiovascular Diseases: Alternative Biomarker Sources, Therapeutic Agents, and Drug Delivery Carriers. Int J Mol Sci. 2019 Jul 3;20(13):3272. doi: 10.3390/ijms20133272.
11. Zhou S.S., Jin J.P., Wang J.Q. et al. miRNAS in cardiovascular diseases: potential biomarkers, therapeutic targets, and challenges. Acta Pharmacol Sin. 2018 Jul;39(7):1073–1084. doi: 10.1038/aps.2018.30.
12. Saliminejad K., Khorram Khorshid H.R., Soleymani Fard S., Ghaffari S.H. An overview of microRNAs: Biology, functions, therapeutics, and analysis methods. J. Cell Physiol. 2019 May;234(5):5451–5465. doi: 10.1002/jcp.27486.
13. Yu X., Odenthal M., Fries J.W. Exosomes as miRNA Carriers: Formation-Function-Future. Int J Mol Sci. 2016 Dec 2;17(12):2028. doi: 10.3390/ijms17122028.
14. Berckmans R.J., Lacroix R., Hau C.M. et al. Extracellular vesicles and coagulation in blood from healthy humans revisited. J Extracell Vesicles. 2019 Nov 8;8(1):1688936. doi: 10.1080/20013078.2019.1688936.
15. Lopez E., Srivastava A.K., Burchfield J. et al. Platelet-derived— Extracellular Vesicles Promote Hemostasis and Prevent the Development of Hemorrhagic Shock. Sci Rep. 2019 Nov 27;9(1):17676. doi: 10.1038/s41598-019-53724-y.

16. Badimon L., Suades R., Fuentes E. et al. Role of Platelet-Derived Microvesicles As Crosstalk Mediators in Atherothrombosis and Future Pharmacology Targets: A Link between Inflammation, Atherosclerosis, and Thrombosis. Front Pharmacol. 2016 Aug 31; 7:293. doi: 10.3389/fphar.2016.00293.
17. Goubran H.A., Burnouf T., Stakiw J., Seghatchian J. Platelet microparticle: a sensitive physiological «fine tuning» balancing factor in health and disease. Transfus Apher Sci. 2015 Feb;52(1):12-8. doi: 10.1016/j.transci.2014.12.015.
18. Lovisolo F., Carton F., Gino S. et al. Platelet rich plasma-derived microvesicles increased in vitro wound healing. Eur Rev Med Pharmacol Sci. 2020 Sep;24(18):9658–9664. doi: 10.26355/eurrev_202009_23055
19. Bosman G.J., Lasonder E., Groenen-Döpp Y.A. et al. The proteome of erythrocyte-derived microparticles from plasma: new clues for erythrocyte aging and vesiculation. J. Proteomics.2012 Dec 5;76 Spec No.:203-10. doi: 10.1016/j.jprot.2012.05.031.
20. Zaborowski M.P., Balaj L., Breakefield X.O., Lai C.P. Extracellular Vesicles: Composition, Biological Relevance, and Methods of Study. Bioscience. 2015; 65:783–797. doi:10.1093/biosci/biv084
21. Pugholm L.H., Baek R., Sondergaard E.K. et al. Phenotyping of Leukocytes and Leukocyte-Derived Extracellular Vesicles. J Immunol Res. 2016; 2016:6391264. doi: 10.1155/2016/6391264.
22. Dickhout A., Koenen R.R. Extracellular Vesicles as Biomarkers in Cardiovascular Disease; Chances and Risks. Front Cardiovasc Med. 2018 Aug 22; 5:113. doi: 10.3389/fcvm.2018.00113
23. Chen Y., Li G., Liu Y. et al. Translocation of Endogenous Danger Signal HMGB1 From Nucleus to Membrane Microvesicles in Macrophages. J. Cell Physiol. 2016 Nov;231(11):2319-26. doi: 10.1002/jcp.25352.
24. Angelillo-Scherrer A. Leukocyte-derived microparticles in vascular homeostasis. Circ. Res.2012; 110:356–369. doi: 10.1161/CIRCRESAHA.110.233403.
25. Lee S.T., Chu K., Jung K.H. et al. Circulating CD62E+ microparticles and cardiovascular outcomes. PLoS One. 2012;7(4): e35713. doi: 10.1371/journal.pone.0035713.
26. Paone S., Baxter A.A., Hulett M.D., Poon I.K.H. Endothelial cell apoptosis and the role of endothelial cell-derived extracellular vesicles in the progression of atherosclerosis. Cell Mol Life Sci.2019 Mar;76(6): 1093–1106.doi: 10.1007/s00018-018-2983-9.
27. Sansone R., Baaken M., Horn P. et al.Endothelial microparticles and vascular parameters in subjects with and without arterial hypertension and coronary artery disease. Data Brief. 2018 May 8; 19:495–500. doi: 10.1016/j.dib.2018.04.149.
28. Yadid M., Lind J.U., Ardoña H.A.M. et al. Endothelial extracellular vesicles contain protective proteins and rescue ischemia-reperfusion injury in a human heart-on-chip. Sci Transl Med. 2020 Oct 14;12(565): eaax8005. doi: 10.1126/scitranslmed. aax8005.
29. Manickam D.S., Pinky P.P., Khare P. Extracellular vesicle-mediated mitochondria delivery: Premise and promise. J Cereb Blood Flow Metab. 2025 Jun 11:271678X251349304. doi: 10.1177/0271678X251349304.
30. Njock M.S., Cheng H.S., Dang L.T. et al. Endothelial cells suppress monocyte activation through secretion of extracellular vesicles containing antiinflammatory microRNAs. Blood. 2015 May 14;125(20):3202-12. doi: 10.1182/blood-2014-11-611046.
31. Hosseinkhani B., Kuypers S., van den Akker N.M.S. et al. Extracellular Vesicles Work as a Functional Inflammatory Mediator Between Vascular Endothelial Cells and Immune Cells. Front Immunol. 2018 Aug 6; 9:1789. doi: 10.3389/fimmu.2018.01789.
32. Hafiane A., Daskalopoulou S.S. Extracellular vesicles characteristics and emerging roles in atherosclerotic cardiovascular disease. Metabolism. 2018; 85:213–222. doi: 10.1016/j.metabol.2018.04.008.
33. Laffont B., Corduan A., Rousseau M. et al. Platelet microparticles reprogram macrophage gene expression and function. Thromb. Haemost. 2016; 115:311–323. doi: 10.1160/TH15-05-0389.
34. Silverman-Gavrila R., Silverman-Gavrila L., Bendeck M.P. Cell division fidelity is altered during the vascular response to injury: Its novel role in atherosclerosis progression. Am. J.Pathol. 2013; 182:628–639. doi: 10.1016/j.ajpath.2012.11.007.
35. Jin T., Gu J., Li Z. et al. Recent Advances on Extracellular Vesicles in Central Nervous System Diseases. Clin Interv Aging. 2021 Feb 10; 16:257–274. doi: 10.2147/CIA.S288415.
36. Guha D., Lorenz D.R., Misra V. et al. Proteomic analysis of cerebrospinal fluid extracellular vesicles reveals synaptic injury, inflammation, and stress response markers in HIV patients with cognitive impairment. Neuroinflammation. 2019; 16:254. doi: 10.1186/s12974-019-1617-y.
37. Zappulli V., Friis K.P., Fitzpatrick Z. et al. Extracellular vesicles and intercellular communication within the nervous system. J Clin Invest. 2016 Apr 1;126(4):1198–207. doi: 10.1172/JCI81134.
38. Lee S.H., Shin S.M., Zhong P. et al. Reciprocal control of excitatory synapse numbers by Wnt and Wnt inhibitor PRR7 secreted on exosomes. Nat Commun. 2018 Aug 24;9(1):3434. doi: 10.1038/s41467-018-05858-2.
39. Sharma P., Mesci P., Carromeu C. et al. Exosomes regulate neurogenesis and circuit assembly. Proc Natl Acad Sci U S A. 2019 Aug 6;116(32):16086–16094. doi: 10.1073/pnas.1902513116.
40. Guitart K., Loers G., Buck F. et al. Improvement of neuronal cell survival by astrocyte-derived exosomes under hypoxic and ischemic conditions depends on prion protein. Glia. 2016 Jun;64(6):896–910. doi: 10.1002/glia.22963.
41. Drago F., Lombardi M., Prada I. et al. ATP Modifies the Proteome of Extracellular Vesicles Released by Microglia and Influences Their Action on Astrocytes. Front Pharmacol. 2017 Dec 13; 8:910. doi: 10.3389/fphar.2017.00910.
42. Rodríguez-Gómez J.A., Kavanagh E., Engskog-Vlachos P., Engskog M.K.R. et al. Microglia: Agents of the CNS Pro-Inflammatory Response. Cells. 2020 Jul 17;9(7):1717. doi: 10.3390/cells9071717.
43. Long X., Yao X., Jiang Q. et al. Astrocyte-derived exosomes enriched with miR-873a-5p inhibit neuroinflammation via microglia phenotype modulation after traumatic brain injury. J Neuroinflammation. 2020 Mar 19;17(1):89. doi: 10.1186/s12974-020-01761-0.
44. Lukiw W.J., Pogue A.I. Vesicular Transport of Encapsulated microRNA between Glial and Neuronal Cells. Int J Mol Sci. 2020 Jul 18;21(14):5078. doi: 10.3390/ijms21145078.

45. Iadecola C. The Neurovascular Unit Coming of Age: A Journey through Neurovascular Coupling in Health and Disease. Neuron. 2017 Sep 27;96(1):17–42. doi: 10.1016/j.neuron.2017.07.030
46. Greene C., Hanley N., Campbell M. Claudin-5: gatekeeper of neurological function. Fluids Barriers CNS. 2019 Jan 29;16(1):3. doi: 10.1186/s12987-019-0123-z.
47. O'Brown N.M., Megason S.G., Gu C. Suppression of transcytosis regulates zebrafish blood-brain barrier function. Elife. 2019 Aug 20;8: e47326. doi: 10.7554/eLife.47326.
48. Nitta T., Hata M., Gotoh S. et al. Size-selective loosening of the blood-brain barrier in claudin-5-deficient mice. J. Cell Biol. 2003 May 12;161(3):653–60. doi: 10.1083/jcb.200302070.
49. Tong L., Hill R.A., Damisah E.C. et al. Imaging and optogenetic modulation of vascular mural cells in the live brain. Nat Protoc. 2021 Jan;16(1):472–496. doi: 10.1038/s41596-020-00425-w
50. Attwell D., Buchan A.M., Charpak S. et al. Glial and neuronal control of brain blood flow. Nature. 2010 Nov 11;468(7321):232–43. doi: 10.1038/nature09613.
51. Lacoste B., Comin C.H., Ben-Zvi A. et al. Sensory-related neural activity regulates the structure of vascular networks in the cerebral cortex. Neuron. 2014 Sep 3; 83(5):1117–30. doi: 10.1016/j.neuron.2014.07.034.
52. Forró T., Bajkó Z., Bălașa A., Bălașa R. Dysfunction of the Neurovascular Unit in Ischemic Stroke: Highlights on microRNAs and Exosomes as Potential Biomarkers and Therapy. Int J Mol Sci. 2021 May 25;22(11):5621. doi: 10.3390/ijms22115621
53. Jin M., Zhang S., Wang M. et al. Exosomes in pathogenesis, diagnosis, and therapy of ischemic stroke. Front Bioeng Biotechnol. 2022; 10: 980548. doi: 10.3389/fbioe.2022.980548.
54. Xu B., Zhang Y., Du X.F. et al. Neurons secrete miR-132-containing exosomes to regulate brain vascular integrity. Cell Res. 2017 Jul;27(7):882–897. doi: 10.1038/cr.2017.62.
55. Xiao B., Chai Y., Lv S. et al. Endothelial cell-derived exosomes protect SH-SY5Y nerve cells against ischemia/reperfusion injury. Int J Mol Med. 2017 Oct;40(4):1201–1209. doi: 10.3892/ijmm.2017.3106.
56. Yue K.Y., Zhang P.R., Zheng M.H. et al. Neurons can upregulate Cav-1 to increase intake of endothelial cells-derived extracellular vesicles that attenuate apoptosis via miR-1290.Cell Death Dis. 2019 Nov 18;10(12):869. doi:10.1038/s41419-019-2100-5.
57. Zhang Y.Z., Liu F., Song C.G. et al. Exosomes derived from human umbilical vein endothelial cells promote neural stem cell expansion while maintain their stemness in culture. Biochem Biophys Res Commun. 2018 Jan 1;495(1):892–898. doi: 10.1016/j.bbrc.2017.11.092.
58. Yang J., Cao L.L., Wang X.P. et al. Neuronal extracellular vesicle derived miR-98 prevents salvageable neurons from microglial phagocytosis in acute ischemic stroke. Cell Death Dis. 2021 Jan 6;12(1):23. doi: 10.1038/s41419-020-03310-2.
59. Morel L., Regan M., Higashimori H. et al. Neuronal exosomal miRNA-dependent translational regulation of astroglial glutamate transporter GLT1. J. Biol Chem. 2013 Mar 8;288(10):7105–16. doi: 10.1074/jbc.M112.410944.
60. Chiang C.S., Fu S.J., Hsu C.L. et al. Neuronal Exosomes Secreted under Oxygen-Glucose Deprivation/Reperfusion Presenting Differentially Expressed miRNAs and Affecting Neuronal Survival and Neurite Outgrowth. Neuromolecular Med. 2021 Sep;23(3):404–415. doi: 10.1007/s12017-020-08641-z.
61. Marti H.J., Bernaudin M., Bellail A. et al. Hypoxia-induced vascular endothelial growth factor expression precedes neovascularization after cerebral ischemia. Am J Pathol. 2000 Mar;156(3):965–76. doi: 10.1016/S0002-9440(10)64964-4.
62. Chen F., Du Y., Esposito E. et al. Effects of Focal Cerebral Ischemia on Exosomal Versus Serum miR126. Transl Stroke Res. 2015 Dec;6(6):478–84. doi: 10.1007/s12975-015-0429-3.
63. Khatri R., McKinney A.M., Swenson B., Janardhan V. Blood-brain barrier, reperfusion injury, and hemorrhagic transformation in acute ischemic stroke. Neurology. 2012 Sep 25;79(13 Suppl 1): S52–7. doi: 10.1212/WNL.0b013e3182697e70.
64. Li Y., Liu B., Zhao T. et al. Comparative study of extracellular vesicles derived from mesenchymal stem cells and brain endothelial cells attenuating blood-brain barrier permeability via regulating Caveolin-1-dependent ZO-1 and Claudin-5 endocytosis in acute ischemic stroke. J Nanobiotechnology. 2023 Feb 28;21(1):70. doi: 10.1186/s12951-023-01828-z.
65. Hayakawa K., Esposito E., Wang X. et al. Transfer of mitochondria from astrocytes to neurons after stroke. Nature. 2016 Jul 28;535(7613):551-5. doi: 10.1038/nature18928.
66. Dave K.M., Venna V.R., Rao K.S. et al. Mitochondria-containing extracellular vesicles from mouse vs. human brain endothelial cells for ischemic stroke therapy. J. Control Release. 2024 Sep; 373:803–822. doi: 10.1016/j.jconrel.2024.07.065.
67. D'Souza A., Burch A., Dave K.M. et al. Microvesicles transfer mitochondria and increase mitochondrial function in brain endothelial cells. J. Control Release. 2021 Oct 10; 338:505–526. doi: 10.1016/j.jconrel.2021.08.038.
68. Liebner S., Dijkhuizen R.M., Reiss Y. et al. Functional morphology of the blood-brain barrier in health and disease. Acta Neuropathol. 2018 Mar;135(3):311–336. doi: 10.1007/s00401-018-1815-1.
69. Taylor R.A., Sansing L.H. Microglial Responses after Ischemic Stroke, and Intracerebral Hemorrhage. Clin. Dev. Immunol. 2013; 2013:746068. doi: 10.1155/2013/746068.
70. Szalay G., Martinecz B., Lénárt N. et al. Microglia protect against brain injury and their selective elimination dysregulates neuronal network activity after stroke. Nat Commun. 2016 May 3; 7:11499. doi: 10.1038/ncomms11499.
71. Zhang L., Wei W., Ai X. et al. Extracellular vesicles from hypoxia-preconditioned microglia promote angiogenesis and repress apoptosis in stroke mice via the TGF-β/Smad2/3 pathway. Cell Death Dis. 2021 Nov 9;12(11):1068. doi: 10.1038/s41419-021-04363-7.
72. Zhang M., Wu Q., Tang M. et al. Exosomal Mir-3613-3p derived from oxygen-glucose deprivation-treated brain microvascular endothelial cell promotes microglial M1 polarization. Cell Mol Biol Lett. 2023 Mar 5;28(1):18. doi: 10.1186/s11658-023-00432-1.
73. Drago F., Lombardi M., Prada I. et al. ATP Modifies the Proteome of Extracellular Vesicles Released by Microglia and Influences Their Action on Astrocytes. Front Pharmacol. 2017 Dec 13; 8:910. doi: 10.3389/fphar.2017.00910.

74. Kawata K., Mitsuhashi M., Aldret R. A Preliminary Report on Brain-Derived Extracellular Vesicle as Novel Blood Biomarkers for Sport-Related Concussions. Front Neurol. 2018 Apr 12; 9:239. doi: 10.3389/fneur.2018.00239.
75. Garcia-Martin G., Alcover-Sanchez B., Wandosell F., Cubelos B. Pathways Involved in Remyelination after Cerebral Ischemia. Curr Neuropharmacol. 2022;20(4):751–765. doi: 10.2174/1570159X19666210610093658.
76. Hermann D.M., Xin W., Bähr M. et al. Emerging roles of extracellular vesicle-associated non-coding RNAs in hypoxia: Insights from cancer, myocardial infarction, and ischemic stroke. Theranostics. 2022 Jul 18;12(13):5776–5802. doi: 10.7150/thno.73931.
77. Kanninen K.M., Bister N., Koistinaho J., Malm T. Exosomes as new diagnostic tools in CNS diseases. Biochim Biophys Acta. 2016 Mar;1862(3):403–10. doi: 10.1016/j.bbadis.2015.09.020.
78. Simak J., Gelderman M.P., Yu H., et al. Circulating endothelial microparticles in acute ischemic stroke: a link to severity, lesion volume and outcome. J. Thromb Haemost. 2006 Jun;4(6):1296–302. doi: 10.1111/j.1538-7836.2006.01911. x.
79. Jung K.H., Chu K., Lee S.T. et al. Circulating endothelial microparticles as a marker of cerebrovascular disease. Ann Neurol. 2009 Aug;66(2):191–9. doi: 10.1002/ana.21681.
80. Chiva-Blanch G., Suades R., Crespo J. et al. Microparticle Shedding from Neural Progenitor Cells and Vascular Compartment Cells Is Increased in Ischemic Stroke. PLoS One. 2016 Jan 27;11(1): e0148176. doi: 10.1371/journal.pone.0148176.
81. Agouni A., Parray A.S., Akhtar N. et al. There Is Selective Increase in Pro-thrombotic Circulating Extracellular Vesicles in Acute Ischemic Stroke and Transient Ischemic Attack: A Study of Patients from the Middle East and Southeast Asia. Front Neurol. 2019 Mar 19; 10:251. doi: 10.3389/fneur.2019.00251.
82. El-Gamal H., Parray A.S., Mir F.A. et al. Circulating microparticles as biomarkers of stroke: A focus on the value of endothelial- and platelet-derived microparticles. J Cell Physiol. 2019 Aug;234(10):16739–16754. doi: 10.1002/jcp.28499.
83. He Z., Tang Y., Qin C. Increased circulating leukocyte-derived microparticles in ischemic cerebrovascular disease. Thromb Res. 2017 Jun; 154:19-25. doi: 10.1016/j.thromres.2017.03.025.
84. Eyileten C., Jakubik D., Shahzadi A. et al. Diagnostic Performance of Circulating miRNAs and Extracellular Vesicles in Acute Ischemic Stroke. Int J Mol Sci. 2022 Apr 20;23(9):4530. doi: 10.3390/ijms23094530.
85. Carandina A., Favero C., Sacco R.M. et al. The Role of Extracellular Vesicles in Ischemic Stroke Severity. Biology (Basel). 2022 Oct 11;11(10):1489. doi: 10.3390/biology11101489.
86. Datta A., Chen C.P., Sze S.K. Discovery of prognostic biomarker candidates of lacunar infarction by quantitative proteomics of microvesicles enriched plasma. PLoS One. 2014 Apr 21;9(4): e94663. doi: 10.1371/journal.pone.0094663.
87. Jödicke R.A., Huo S., Kränkel N. et al. The Dynamic of Extracellular Vesicles in Patients with Subacute Stroke: Results of the «Biomarkers and Perfusion-Training-Induced Changes After Stroke» (BAPTISe) Study. Front Neurol. 2021 Nov 8; 12:731013. doi: 10.3389/fneur.2021.731013.
88. Filipowicz W., Bhattacharyya S.N., Sonenberg N. Mechanisms of post-transcriptional regulation by microRNAs: are the answers in sight? Nat Rev Genet. 2008 Feb;9(2):102–14. doi: 10.1038/nrg2290.
89. Zhou J., Chen L., Chen B. et al. Increased serum exosomal miR-134 expression in the acute ischemic stroke patients. BMC Neurol. 2018 Dec 4;18(1):198. doi: 10.1186/s12883-018-1196-z.
90. Ji Q., Ji Y., Peng J. et al. Increased Brain-Specific MiR-9 and MiR-124 in the Serum Exosomes of Acute Ischemic Stroke Patients. PLoS One. 2016 Sep 23;11(9): e0163645. doi: 10.1371/journal.pone.0163645.
91. Wang W., Li D.B., Li R.Y. et al. Diagnosis of Hyperacute and Acute Ischaemic Stroke: The Potential Utility of Exosomal MicroRNA-21-5p and MicroRNA-30a-5p. Cerebrovasc Dis. 2018;45(5-6):204-212. doi: 10.1159/000488365.
92. Chen Y., Song Y., Huang J. et al. Increased Circulating Exosomal miRNA-223 Is Associated with Acute Ischemic Stroke. Front Neurol. 2017 Feb 27; 8:57. doi: 10.3389/fneur.2017.00057.
93. Li D.B., Liu J.L., Wang W. et al. Plasma Exosomal miR-422a and miR-125b-2-3p Serve as Biomarkers for Ischemic Stroke. Curr Neurovasc Res. 2017;14(4):330–337. doi: 10.2174/1567202614666171005153434.
94. Jin M., Zhang S., Wang M. et al. Exosomes in pathogenesis, diagnosis, and therapy of ischemic stroke. Front Bioeng Biotechnol. 2022 Dec 16; 10:980548. doi: 10.3389/fbioe.2022.980548.
95. Chen F., Du Y., Esposito E. et al. Effects of Focal Cerebral Ischemia on Exosomal Versus Serum miR126. Transl Stroke Res. 2015 Dec;6(6):478-84. doi: 10.1007/s12975-015-0429-3.
96. Li D.B., Liu J.L., Wang W. et al. Plasma Exosomal miR-422a and miR-125b-2-3p Serve as Biomarkers for Ischemic Stroke. Curr Neurovasc Res. 2017;14(4):330-337. doi: 10.2174/1567202614666171005153434.
97. Ollen-Bittle N., Roseborough A.D., Wang W. et al. Mechanisms and Biomarker Potential of Extracellular Vesicles in Stroke. Biology (Basel). 2022 Aug 18;11(8):1231. doi: 10.3390/biology11081231.
98. Wang J., Chen S., Zhang W., et al. Exosomes from miRNA-126-modified endothelial progenitor cells alleviate brain injury and promote functional recovery after stroke. CNS Neurosci Ther. 2020;26(12):1255–65. doi: 10.1111/cns.13455.
99. Zhu Z.H., Jia F., Ahmed W., et al. Neural stem cell-derived exosome as a nano-sized carrier for BDNF delivery to a rat model of ischemic stroke. Neural Regen Res. 2023;18(2):404–9. doi: 10.4103/1673-5374.346466.
100. Li P., Yin R., Chen Y., Chang J. et al. Engineered extracellular vesicles for ischemic stroke: a systematic review and meta-analysis of preclinical studies. J. Nanobiotechnology. 2023 Oct 31;21(1):396. doi: 10.1186/s12951-023-02114-8.

© Ломова Ирина Павловна (irpalo@mail.ru); Тихонова Маргарита Борисовна (atsuna@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.24

ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ И БИОМАРКЕРЫ НЕЙРОВОСПАЛЕНИЯ В ПОСТКОВИДНОМ СИНДРОМЕ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ). ЧАСТЬ I

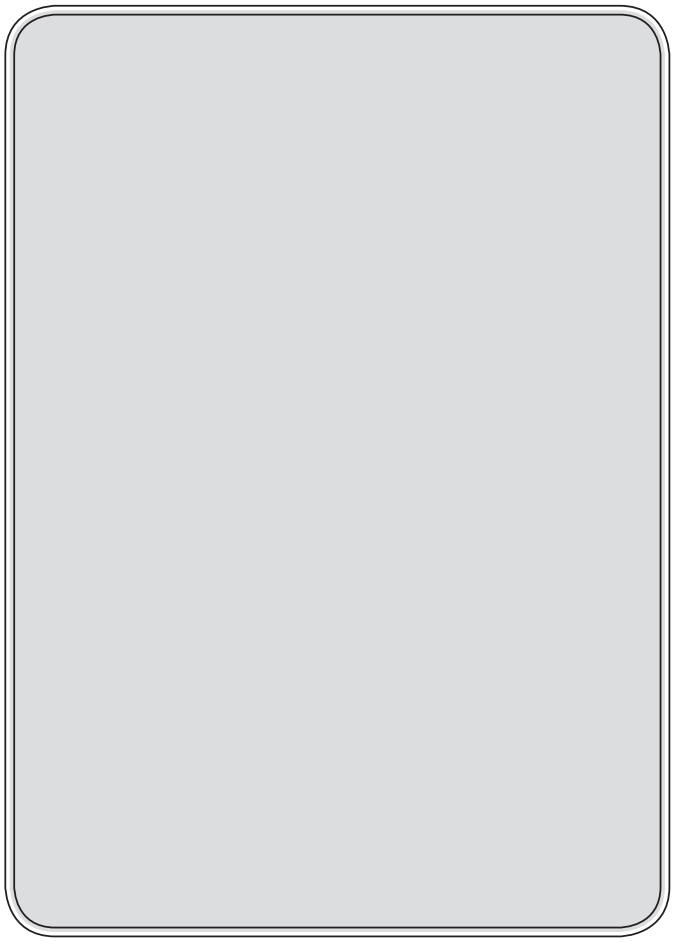
DEVELOPMENTAL FACTORS AND BIOMARKERS OF NEUROINFLAMMATION IN POSTCOVOID SYNDROME (LITERATURE REVIEW). PART I

I. Nikiforov
T. Chernobrovkina
G. Kostyuk
M. Kondratyuk
L. Burygina
M. Belova
R. Kardashian
S. Igumnov
V. Istomina
A. Kochina

Summary. The immunological field is an important part of the study of postcovoid syndrome. It develops fundamental insights into the functions of the immune system and neuroimmune interactions. The literature review shows the key role of neuroinflammation in the pathogenesis of postcovoid syndrome and presents the participants in this process described so far and their interaction. Pathogenetically based biomarkers associated with various links in the pathogenesis of cystic fibrosis and neuroinflammation as a universal adaptive response of nervous tissue to damage of any origin (infectious, mechanical, toxic, etc.) are named.

Keywords: neuroinflammation, biomarkers, microglia, astrocytes, immune system, blood-brain barrier, mast cells, cytokines, chemokines, neurospecific proteins, cell adhesion molecules.

Никифоров Игорь Анатольевич
доктор медицинских наук, профессор, Академия постдипломного образования ФГБУ Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий Федерального медико-биологического агентства России, г. Москва
narkolog.ipk@mail.ru
Чернобровкина Тамара Васильевна
доктор медицинских наук, профессор, Академия постдипломного образования ФГБУ Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий Федерального медико-биологического агентства России, г. Москва
Костюк Георгий Петрович
доктор медицинских наук, профессор, главный врач ГБУЗ г. Москвы, Психиатрическая клиническая больница № 1 им. Н.А. Алексеева, г. Москва
pkb1@zdrav.mos.ru
Кондратюк Марина Геннадьевна
кандидат медицинских наук, доцент, Академия постдипломного образования ФГБУ Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий Федерального медико-биологического агентства России, г. Москва
Бурыгина Лариса Андреевна
кандидат медицинских наук, главный врач ГБУЗ г. Москва Психиатрическая клиническая больница № 4 им. П.Б. Ганнушкина, г. Москва
pkb4@zdrav.mos.ru
Белова Майя Юрьевна
врач-психиатр, заведующий филиалом Психиатрический стационар им. В.А. Гиляровского ГБУЗ г. Москва; Психиатрическая клиническая больница № 4 им. П.Б. Ганнушкина, г. Москва
pkb4-pb3@zdrav.mos.ru
Кардашян Руслан Антраникович
доктор медицинских наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва
rakar_26@mail.ru
Игумнов Сергей Александрович
доктор медицинских наук, профессор, профессор Российского национального исследовательского медицинского университета им. Н.И. Пирогова, г. Москва
igumnov_sa@rsmu.ru



Истомина Виктория Витальевна
врач-психиатр, заведующий общепсихиатрическим отделением № 19 Психиатрического стационара им. В.А. Гиляровского, филиала Государственного бюджетного учреждения здравоохранения, г. Москва; Психиатрическая клиническая больница № 4 им. П.Б. Ганнушкина, г. Москва
Кочина Анастасия Олеговна
Ординатор, Академия постдипломного образования ФГБУ Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий Федерального медико-биологического агентства России, г. Москва
narkolog.ipk@mail.ru

Аннотация. Иммунологическое направление является значимой частью исследования постковидного синдрома. Оно развивает фундаментальные представления о функциях иммунной системы и нейроиммунных взаимодействиях. В обзоре литературы показана ключевая роль нейровоспаления в патогенезе постковидного синдрома, представлены описанные к настоящему времени участники этого процесса и их взаимодействие. Названы патогенетически обоснованные биомаркеры, связанные с различными звеньями патогенеза постковидного синдрома и нейровоспаления как универсальной адаптивной реакции нервной ткани на повреждение любого генеза (инфекционного, механического, токсического, и др.).

Ключевые слова: нейровоспаление, биомаркеры, микроглия, астроциты, иммунная система, гематоэнцефалический барьер, тучные клетки, цитокины, хемокины, нейроспецифические белки, молекулы клеточной адгезии.

В последнее десятилетие в неврологии и психиатрии произошел концептуальный сдвиг: изолированное рассмотрение нейродегенерации, аутоиммунных расстройств или нейрохимического дисбаланса уступает место интегративной модели, в центре которой находится нейровоспаление [1]. Этот процесс, традиционно ассоциированный с инфекциями ЦНС или травмами, теперь признан ключевым компонентом патогенеза таких, казалось бы, разнородных состояний, как депрессия, тревожные расстройства, шизофрения и хроническая боль.

Нейровоспаление представляет собой дихотимический феномен: будучи жизненно важным для защиты мозга, при хронизации оно подпитывает порочный круг, приводящий к дисфункции гематоэнцефалического барьера, окислительному стрессу, нарушению нейрогенеза и в конечном счете — гибели нейронов. Однако, главной проблемой для клинической практики остается трансляционный разрыв между обширным массивом доклинических данных и скудностью одобренных антинейровоспалительных стратегий.

Целью данной обзорной статьи является систематизация современных представлений о роли нейровоспаления в различных заболеваниях ЦНС, с акцентом на общие молекулярные пути и клеточное взаимодействие. Мы рассмотрим основные биомаркеры нейровоспаления и перспективные терапевтические мишени.

В литературе, посвященной иммунологии, гемостазу, нейровоспалению, рассматривается большой спектр маркеров, участвующих в двух ключевых механизмах нейровоспаления: иммуноопосредованного и при иных видах повреждения: цитокины, нейроспецифические белки и продукты их протеолиза, маркеры окислительного стресса, матриксные металлопротеиназы и эндокринные факторы [2, 3, 4, 5].

Накоплены данные об участниках этого процесса, но консенсуса по их значимости для клинической практики пока не достигнуто. Систематизация сведений о маркерах нейровоспаления для оптимальных прогностических решений в клинике остается актуальной проблемой.

Своевременное установление диагноза при острых или хронических заболеваниях центральной нервной системы (ЦНС) во многом определяет раннюю диагностику и дальнейшую тактику лечения.

В настоящее время основным клиническим инструментом для установления диагноза повреждение ЦНС является нейровизуализация. Ее недостатком является невозможность регулярно оценивать текущее состояние пациента в острой фазе и динамике. Поиск более чувствительных и доступных диагностических возможностей для обнаружения маркеров повреждений ЦНС является важным направлением исследования, их применение имеет большую ценность для понимания патофизиологического процесса.

Сочетание факторов, маркеров может более детально и в динамике раскрыть картину патологического процесса.

В постковидном состоянии нередко находят симптомы поражения различных органов и систем: сердечно-сосудистой, дыхательной, пищеварительной, мочеполовой, кожных покровов. Но чаще встречаются признаки поражения центральной нервной системы (ЦНС): невротичестких, аффективных, тревожных, когнитивных, диссомнических. Нередко они возникают впервые у этих больных. При параклинических обследованиях у пациентов находят:

- уменьшение размеров мозга;
- повреждение клеток в гиппокампе;
- некроз в поясной извилине;
- разрушение в коре головного мозга [6].

Мониторинг концентрации биомаркеров в плазме крови и спинномозговой жидкости позволяет:

- проводить диагностику нейровоспаления;
- отслеживать корреляцию клинической картины заболевания головного мозга с изменением лабораторных показателей;
- оценивать факторы первичного, вторичного повреждения мозга и репаративных изменений (процессы нейродегенерации и нейрорегенерации);
- прогнозировать исход заболевания [7, 8, 9].

Основными клетками, контролирующими иммунный ответ, являются микроглиоциты. Известно, что микроглия на этапе формирования мозга до раннего постнатального периода регулирует развитие и перестройку нервной ткани за счет фагоцитарной активности. Неактивированная микроглия участвует в процессах запоминания и обучения, модулируя силу синаптических структур, а также оптимизирует количество синапсов [1, 10, 11].

При повреждении нервной ткани (механическая травма, инфекции, действие нейротоксинов, антигенов) происходит активация микроглии, вследствие чего возникает:

- реорганизация цитоскелета макрофагов;
- пролиферация;
- трансформация в макрофаги;
- удлинение отростков;
- экспрессия молекул межклеточной адгезии и других участников нейровоспаления;
- формирование узелков в очагах поражения;
- скопление микроглиоцитов вокруг пораженных нейронов;
- фагоцитоз поврежденных нейронов;
- усиление проницаемости ГЭБ [5, 11, 12];
- приобретение микроглией активированного М1-фенотипа, с продукцией провоспалительных цитокинов: (TNF-α, IL 6, 1β).

При нейровоспалении клетки способны менять фенотип М1 (провоспалительный) на М2 (противовоспалительный) и продуцировать:

- инсулиноподобный фактор роста (IGF-1), участвующий в нейрогенезе;
- хемокиновый лиганд к рецептору: цистеин — X — вставка цистеин (CXCL10) с нейропротективным действием;
- индуцированный белок дифференцировки клеток миелоидного лейкоза-1 (MCL-1);
- белки сывороточного амилоида А (SAA) [13].

Клетки микроглии могут оставаться активированными в течение длительного времени, выделяя цитокины и нейротоксические молекулы, способствующие долгосрочной нейродегенерации [14].

Астроциты также претерпевают изменение фенотипа — реактивный астроглиоз. Он характеризуется гипертрофией и гиперплазией клеток. Астроциты А1 тип (нейротоксичные) и А2 тип (прорегенеративные), секретируют различные цитокины (TNF-α, IL-6, IL-1β), хемокиновые лиганды CXCL1, CXCL10, лиганды 2, 3, 5 к рецепторам с повторами сдвоенного цистеина (CCL2; CCL3;, CCL5), а также активные формы кислорода (АФК) и аденозинтрифосфат (АТФ), которые способствуют дальнейшей активации микроглии [1, 15, 16, 17].

С одной стороны — нейровоспаление играет роль протекции, изолируя участок повреждения глиальным рубцом, способствуя репарации, с другой — деструкцию, вызывая в конечном счете гибель нейронов не только в месте альтерации, но и за ее пределами [17].

Многие авторы считают, что гиперактивация иммунной системы сопровождаемая цитокиновым штормом, является основной причиной неврологических расстройств в интраковидном и постковидном периоде. Сопутствующим патогенетическим механизмом этих процессов является продукция специфических аутоантител против тканей ЦНС [6].

Ряд исследователей находят сходство постковидного синдрома с миалгическим энцефаломиелитом, который описан в клинической картине поствирусных и аутоиммунных состояний. Считают, что антитела к рецепторам нейротрансмиттеров, β-адренергических и мускариновых играют роль в развитии обоих заболеваний [18]. Отмечен рост аутоантител к иммуномодулирующим белкам, включая цитокины, хемокины, белки комплемента, что связывают с тяжелым и продолжительным течением патологического процесса [19].

В клинической картине постковидного миалгического энцефаломиелита (синдром хронической усталости) описывают следующий симптомокомплекс:

- выраженная астения;
- боли разной локализации;
- нарушения сна;
- вегетативная дисфункция;
- ухудшение общего состояния после незначительной физической или когнитивной активности;
- нейрокогнитивный дефицит [20, 21].

К настоящему времени описаны следующие пути проникновения SARS-Cov-2 в головной мозг:

- гематогенный;
- транссинаптический;
- иммунологический [22, 23, 24, 25, 26, 27].

Следствием является нарушение свертывающей системы крови и длительная активация иммунной системы, что приводит к неврологическим расстройствам разной степени тяжести [28, 29, 30, 31]:

- Covid-ассоциированный инсульт;
- центральный венозный тромбоз;
- синдром задней обратимой энцефалопатии;
- синдром Гийена-Барре;
- поражение черепных нервов;
- когнитивный дефицит;
- аффективные расстройства;
- кохлеовестибулярные нарушения;
- головная боль;
- скелетно-мышечная боль;
- периферическая вегетативная недостаточность [32, 33].

При нейровизуализации отмечается потеря плотности и объема серого вещества:

- в гиппокампе (участвует в механизмах памяти);
- латеральной орбитофронтальной коре (участвует в механизмах принятия решений);
- островковой доле (формирование эмоций);
- поясной коре;
- центральном ядре миндалевидного тела (память и формирование эмоций [7, 10, 34, 35];
- гипоперфузия кортикального церебрального кровотока [36].

Распространенность неврологических симптомов в постковидном периоде встречается в следующем порядке:

- повышенная утомляемость — 37 %;
- «мозговой туман» — 32 %;
- нарушение памяти — 27 %;
- слабость концентрации внимания — 22 %;
- миалгия — 18 %;
- аносмия — 12 %;
- дисгевзия — 11 %;
- головная боль — 10 %.

У пациентов, которые в остром периоде COVID-19 жаловались на астению, головокружение и головную боль, последующие нарушения когнитивных функций развивались чаще.

Нейропсихиатрические синдромы в постковидном периоде включали:

- нарушения сна — 31 %;
- тревожные расстройства — 23 %;
- депрессию — 12 % [38, 39, 40].

Риск любого психиатрического диагноза в течение года оказался на 20–60 % выше, чем у не болевших COVID-19, независимо от тяжести перенесенной болезни [41].

Этиологию симптомов при COVID-19 авторы считают сложной и многофакторной:

- прямое воздействиеSARS-CoV-2;
- гиперкоагуляция [42];
- гипоксия;
- реакция иммунной системы [1, 6, 43];
- побочное действие лекарственной терапии;
- социально-психологический аспект потенциально смертельного заболевания [44];
- возникновение психических расстройств (тревожных, аффективных, когнитивных, дисомнических), что утяжеляет общую картину заболевания [3, 45].

Нейровоспаление проявляется на биохимическом, гистологическом и органном уровнях [43, 46].

Процессы нейровоспаления тесно связаны с продукцией цитокинов, хемокинов и активных форм кислорода (АФК) астроцитами и микроглией, что приводит к повышению проницаемости ГЭБ, инфильтрации иммунных клеток в нервную ткань, отеку мозга, повреждению нервной ткани и, как следствие, гибели клеток [43].

По мнению ряда авторов, под нейровоспалением (глиопатией) следует понимать процесс активации части клеток микроглии с их трансформацией в макрофаги и аутоиммунной реакцией в отношении не только

патогенетически изменённых, но и нормальных нейронов, протекающий с выделением нейромедиаторов, иммунных и провоспалительных цитокинов в количествах, превышающих концентрации физиологического регулирования, в том числе таких как простагландин Е, оксид азота, арахидоновая кислота, не завершившийся по мере исчерпания защитной необходимости, а протекающий в виде вялого, длительного воспаления без явной яркой клинической симптоматики [47].

В условиях нейровоспаления микроглия экспрессирует меньше нейропротекторных генов, которые в нормальных условиях обеспечивают трофическую поддержку нейронам. К таким генам относятся BDNF, фактор роста нервов (NGF), нейротрофический фактор глиальных клеток (GDNF) и нейротрофины (NT) 4/5. Снижение трофической поддержки ухудшает синаптическую пластичность и нейрогенез. В условиях нейротоксичности уровень CX3CL1 (хемокин класса CX3C, вырабатывается нейронами) снижается (а он способствует выживанию нейронов). Аналогично ведет себя кластер дифференцировки 200 (CD200) нейронов при активации микроглии. Экзогенное введение CD200 ослабляло нейровоспалительную реакцию и повышало экспрессию BDNF [8].

Одним из механизмов запуска нейровоспаления предполагают стойкое снижение в плазме крови концентрации холестерина, триглицеридов, липопротеинов и высокой и низкой плотности. Низкие уровни холестерина в ЦНС непосредственно связаны со снижением синаптической функции нейронов [16, 47].

Одним из ключевых механизмов патогенеза поражения ЦНС, многие авторы называют аутоиммунный, в процессе реализации которого в организме человека в ответ на инфекцию против SARS-Cov-2 происходит формирование антител, обладающих аутоиммунными свойствами и способных к поражению органов и тканей, в том числе приводящих к повреждению ГЭБ [48, 49].

Основными компонентами нейровоспаления считаются:

- активация клеток нейроглии [16, 47].
- высвобождение медиаторов воспаления: TNF-α, IL-1β и IL-6, которые нарушают целостность ГЭБ;
- увеличение проницаемости сосудов;
- лейкоцитарная инфильтрация очага поражения;
- ишемия клеток головного мозга;
- оксидативный стресс [26, 50, 51].

Во второй части настоящего литературного обзора будет представлена расширенная информация о молекулярных и клеточных механизмах нейровоспаления, известных к настоящему времени участников этого процесса, наиболее изученных биомаркеров повреждения мозга и нейродегенеративных заболеваний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никифоров И.А., Чернобровкина Т.В., Костюк Г.П., Бурыгина Л.А., Белова М.Ю., Истомина В.В., Кардашян Р.А., Игумнов С.А. Нейровоспаление в патогенезе постковидного синдрома (обзор литературы) часть II // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. — 2025. — №08. — С. 192–202. DOI 10.37882/2223-2966.2025.08.19
2. Корелина В.Е., Газизова И.Р., Рожко Ю.И., Гончарук Е.П. Маркеры нейровоспаления у пациентов с первичной открытоугольной глаукомой (обзор литературы). // Офтальмология Восточная Европа.— 2024.— Том 14, № 2.— С 292–302 https://doi.org/10.34883/PI.2024.14.2.027
3. Гасанов Р.Ф. и др. Нейровоспаление и его роль в патогенезе синдрома дефицита внимания с гиперактивностью (обзор литературы) //Обозрение психиатрии и медицинской психологии имени ВМ Бехтерева.— 2023.— Т. 57.— №. 1.— С. 8–22. http//doi/org/10.31363/2313-7053-2023-699
4. Пискунов А.К. Биомаркеры нейровоспаления //Нейрохимия.— 2010.— Т. 27.— №. 1.— С. 63–73.
5. Луговая А.В. и др. Динамика биомаркеров аутофагии и нейровоспаления в остром периоде атеротромботического ишемического инсульта //Российский иммунологический журнал.— 2024. DOI 10.46235/1028-7221-16662-TDO
6. Кузник Б.И., Шаповалов К.Г., Чалисова Н.И. Изменения состояния жизненно важных систем организма при Long-COVID-19 // Успехи современной биологии. — 2023. — Т. 143. — №1. — С. 38–51. doi: 10.31857/S0042132423010052
7. Григорьев И.П., Коржевский Д.Э. Тучные клетки и нейровоспаление в патогенезе нервных и психических заболеваний // Медицинский академический журнал. — 2021. — Т. 21. — №2. — С. 7–24. doi: 10.17816/MAJ63228.
8. Kouba B.R., de Araujo Borba L., Borges de Souza. P et al. Role of Inflammatory Mechanisms in Major Depressive Disorder: From Etiology to Potential Pharmacological Targets. Cells. 2024; 13(5):423. https://doi.org/10.3390/cells13050423.
9. Евдокименко А.Н. и др. Инвазия и персистенция SARS-CoV-2 в центральной нервной системе: взгляд нейроморфолога //Бюллетень Национального общества по изучению болезни Паркинсона и расстройств движений.— 2022.— №. 2.— С. 49–55. doi:10.24412/2226-079X-2022–12434.
10. Нижегородова Д.Б., Левковская А.Н., Зафранская М.М. Иммунологические механизмы нейровоспаления и нейродегенерации //Иммунопатология, аллергология, инфектология.— 2018. –№ 4.— С 27–42. DOI: 10.14427/jipai.2018.4.27.
11. Бобров М.Ю., Никитин В.С., Бурак М.Ю. Метаболическое репрограммирование микроглии и астроцитов, как фактор регуляции нейровоспаления при ишемическом инсульте. //Медицинская иммунология. https://doi.org/10.15789/1563-0625-MRO-3131
12. Гоголева В.С., Друцкая М.С., Атретханы К.С. Н. Микроглия в гомеостазе центральной нервной системы и нейровоспалении //Молекулярная биология.— 2019.— Т. 53.— №. 5.— С. 790–798. DOI: 10.1134/S0026898419050057

13. Chen Z., Trapp B.D. Microglia and neuroprotection //Journal of neurochemistry.— 2016.— Т. 136.— С. 10–17. doi: 10.1111/jnc.13062
14. Shabab T. et al. Neuroinflammation pathways: a general review //International Journal of Neuroscience.— 2017.— Т. 127.— №. 7.— С. 624–633. doi: 10.1080/00207454.2016.1212854
15. Garland E.F., Hartnell I.J., Boche D. Microglia and Astrocyte Function and Communication: What Do We Know in Humans? //Front Neurosci. 2022; 16:824888. Published 2022 Feb 16. doi:10.3389/fnins.2022.824888
16. Козлов В.А., Голенков А.В., Зотов П.Б., Булыгина И.Е. Дискуссионные аспекты суицидологии: связь нейровоспаления с суицидальным поведением у психически здоровых людей. Сообщение II. Суицидология.— 2024. — Том 15. — № 2(55).— С. 29–56 doi: 10.32878/suiciderus.24-15–02(55)–29–56.
17. Кузьмин Е.А. и др. Биомаркеры нейровоспаления в диагностике черепномозговой травмы и нейродегенеративных заболеваний: обзор литературы // Сеченовский вестник.— 2024.— Т. 15.— №. 1.— С. 20–35. doi:10.47093/2218–7332.2024.15.1.20-35
18. Bornstein S.R., Voit-Bak K., Donate T., et al. Chronic post-COVID-19 syndrome, and chronic fatigue syndrome: Is there a role for extracorporeal apheresis? //Molecular Psychiatry.— 2022.— Т. 27.— №. 1.— С. 34–37. doi: 10.1038/s41380-021-01148-4.
19. Chen C., Amelia A., Ashdown G.W. et al. Risk surveillance and mitigation: autoantibodies as triggers and inhibitors of severe reactions to SARS-CoV-2 infection // Molecular Medicine.— 2021.— Т. 27.— №. 1.— С. 160. doi: 10.1186/s10020-021-00422-z.
20. Komaroff A.L., Lipkin W.I. Insights from myalgic encephalomyelitis/chronic fatigue syndrome may help unravel the pathogenesis of postacute COVID-19 syndrom // Trends in Molecular Medicine.— 2021.— Т. 27.— №. 9.— С. 895–906. doi: 10.1016/j.molmed.2021.06.002.
21. Никифоров И.А., Чернобровкина Т.В., Костюк Г.П., Бурыгина Л.А., Белова М.Ю., Истомина В.В., Кардашян Р.А., Игумнов С.А. Нейровоспаление в патогенезе постковидного синдрома (обзор литературы) часть I // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. — 2025. — №6–3. — С. 203–2011. DOI 10.37882/2223-2966.2025.06-3.26
22. Meinhardt J., Radke J., Dittmayer C. et al. Olfactory transmucosal SARS-CoV-2 invasion as a port of central nervous system entry in individuals with COVID-19 // Nature neuroscience.— 2021.— Т. 24.— №. 2.— С. 168–175. doi: 10.1038/s41593-020-00758-5.
23. Okada Y., Yoshimura K., Toya S., Tsuchimochi M. Pathogenesis of taste impairment and salivary dysfunction in COVID-19 patients // Jpn. Dent. Sci. Rev. 2021. V. 57. P. 111–122.
24. Agyeman A.A., Chin K.L., Landersdorfer C.B. et al. Smell and taste dysfunction in patients with COVID-19: a systematic review and meta-analysis // Mayo Clin. Proc. 2020. V. 95. № 8. P. 1621–1631.).
25. DosSantos M.F., Devalle S., Aran V. et al. Neuromechanisms of SARS-CoV-2: a review // Front. Neuroanat. 2020. V. 14. P. 37–42; Haidar M.A., Jourdi H., Haj Hassan Z. et al. Neurological and neuropsychological changes associated with SARS-CoV-2 infection: new observations new mechanisms // Neuroscientist. 2021. V. 2021. Iss. 1073858420984106.
26. Haidar M.A. et al. SARS-CoV-2 involvement in central nervous system tissue damage //Neural regeneration research.— 2022.— Т. 17.— №. 6.— С. 1228–1239. doi: 10.4103/1673–5374.327323.
27. Bohmwald K., Gálvez N.M.S., Ríos M., Kalergis A.M. Neurologic alterations due to respiratory virus infections // Front. Cell. Neurosci. 2018. V. 12. P. 386.
28. Никифоров И.А., Федотов Д.Д., Костюк Г.П., Бурыгина Л.А., Белова М.Ю., Истомина В.В. Постковидный синдром (обзор литературы) Часть II // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. -2025. -№01. -С. 230–236 doi: 10.37882/2223–2966.2025.01.28
29. Есин Р.Г. и др. Нейровоспаление и невропатология //Журнал неврологии и психиатрии им. СС Корсакова.— 2021.— Т. 121.— №. 4.— С. 107–112. doi: 10.17116/jnevro2021121041107
30. Гомазков О.А. Клеточные и молекулярные принципы старения мозга //Успехи современной биологии.— 2012.— Т. 132.— №. 2.— С. 141–154.
31. Алексеева Н.Т. и др. Молекулярные и клеточные механизмы повреждения центральной нервной системы при COVID-19 //Журнал анатомии и гистопатологии.— 2020.— Т. 9.— №. 3.— С. 72–85. doi: 10.18499/2225–7357-2020-9-3-72–85
32. Парфенов В.А., Кулеш А.А. Острые и отдаленные неврологические нарушения у пациентов, перенесших коронавирусную инфекцию //Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика.— 2022.— Т. 14.— №. 3.— С. 4–11. doi: 10.14412/2074–2711-2022-3-4-11.
33. Новикова Л.Б., Акопян А.П., Шарапова К.М., Латыпова Р.Ф. Неврологические и психические расстройства, ассоциированные с COVID-19. //Артериальная гипертензия.— 2020.— Т. 26.— №. 3.— С. 317–326. doi:10.18705/1607-419X-2020-26-3-317-326.
34. Takahashi T., Ota M., Numata Y. et al. Relationships between the fear of COVID-19 scale and regional brain atrophy in mild cognitive impairment //Acta Neuropsychiatrica.— 2022.— Т. 34.— №. 3.— С. 153–162. doi: 10.1017/neu.2022.7
35. Zeng N. et al. A systematic review and meta-analysis of long term physical and mental sequelae of COVID-19 pandemic: call for research priority and action // Molecular psychiatry.— 2023.— Т. 28.— №. 1.— С. 423–433. doi: 10.1038/s41380-022-01614-7
36. Tian T., Wu J., Chen T. et al. Long-term follow-up of dynamic brain changes in patients recovered from COVID-19 without neurological manifestations //JCI insight.— 2022.— Т. 7.— №. 4.— С. e155827. doi: 10.1172/jci.insight.155827.
37. Alberti P., Beretta S., Piatti M. et al. Guillain–Barre syndrome related to COVID-19 infection // Neurol. Neuroimmunol. Neuroinflamm.— 2020.— Т. 7.— №. 4.— С. e741. doi: 10.1212/NXI.0000000000000741.
38. Lopez-Leon S. et al. More than 50 long-term effects of COVID-19: a systematic review and meta-analysis //Scientific reports.— 2021.— Т. 11.— №. 1.— С. 16144.
39. Munblit D. et al. Studying the post-COVID-19 condition research challenges, strategies, and importance of Core Outcome Set development //BMC medicine.— 2022.— Т. 20.— №. 1.— С. 50. doi:10.1186/sl2916-021–02222-y.
40. Long Q. et al. Follow-ups on persistent symptoms and pulmonary function among post-acute COVID-19 patients: a systematic review and meta-analysis //Frontiers in medicine. — 2021. — Т. 8.—С. 702635. doi: 10.3389/fmed.2021.702635.
41. Logue J.K., Franko N.M., McCulloch D.J. et al. Sequelae in adults at 6 months after COVID-19 infection //JAMA network open.— 2021.— Т. 4.— №. 2.— С. e210830-e210830. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2021.0830

42. Гусев Е.И., Мартынов М.Ю., Бойко А.Н. и др. Новая коронавирусная инфекция (COVID-19) и поражение нервной системы: механизмы неврологических расстройств, клинические проявления, организация неврологической помощи // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова.— 2020.— Т. 120, № 6.— С. 7–16.— doi: 10.17116/jnevro20201200617.
43. Калитин К.Ю., Спасов А.А., Муха О.Ю. Подходы к изучению каппа-опиоидных лигандов на моделях нейровоспаления. Фармация и фармакология. 2023;11(1):4–18. doi:10.19163/2307-9266-2023-11-1-4-18/
44. Wong A.W., Shah A.S., Johnston J.C. et al. Patient-reported outcome measures after COVID-19: a prospective cohort study // Eur. Respir. J. 2020. V. 56. № 5. P. 2003276.
45. Никифоров И.А., Костюк Г.П., Бурыгина Л.А., Белова М.Ю., Истомина В.В., Аронов П.В. Психические расстройства, вызванные эпидемией Covid-19. Учебное пособие.— Москва: Постер-М, 2024.— 49 с.— ISBN 978-5-907929-01-2.
46. Denny L., Al Abadey A., Robichon K., Templeton N., Prisinzano T.E., Kivell B.M., La Flamme A.C. Nalfurafine reduces neuroinflammation and drives remyelination in models of CNS demyelinating disease. //Clinical & translational immunology.— 2021. Vol. 10, № 1. Art ID e1234. doi: 10.1002/cti2.1234.
47. Козлов В.А., Голенков А.В., Зотов П.Б., Булыгина И.Е. Дискуссионные аспекты суицидологии: связь нейровоспаления с суицидальным поведением у психически здоровых людей. Сообщение I. Суицидология.— 2024. — Том 15. — № 1(54).— С. 3–30 doi: 10.32878/suiciderus.24-15–01(54)–3–30
48. Рассохин В.В., Арсентьева Н.А., Коробова З.Р., Любимова Н.Е., Бацунов О.К., Боева Е.В., Книжникова А.А., Норка А.О., Халезова Н.Б., Беляков Н.А. Иммунная дисрегуляция в постковидном периоде может способствовать развитию неврологических нарушений за счет действия цитокинового звена. //ВИЧ-инфекция и иммуносупрессии.— 2025.— Т. 16.— №. 4.— С. 7–16. doi: 10.22328/2077–9828–2024-16-4-7-16.
49. Matyushkina D., Shokina V., Tikhonova P., Manuvera V., Shirokov D., Kharlampieva D, Lazarev V, Varizhuk A, Vedekhina T, Pavlenko A, et al. Autoimmune Effect of Antibodies against the SARS-CoV-2 Nucleoprotein. //Viruses.— 2022.— T. 14.— №. 6.— C. 1141. doi: 10. doi: 3390/v14061141.
50. Shi H., Zuo Y., Navaz S. et al. Endothelial cell-activating antibodies in COVID-19 // Arth. Rheumatol. 2022. V. 74. P. 1132–1138.).
51. Кузник Б.И., Хавинсон В.Х., Линькова Н.С. COVID-19: влияние на иммунитет, систему гемостаза и возможные пути коррекции // Успехи физиол. наук. 2020а. Т. 51. № 4. С. 51–63.

© Никифоров Игорь Анатольевич (narkolog.ipk@mail.ru); Чернобровкина Тамара Васильевна; Костюк Георгий Петрович (pkb1@zdrav.mos.ru); Кондратюк Марина Геннадьевна; Бурыгина Лариса Андреевна (pkb4@zdrav.mos.ru); Белова Майя Юрьевна (pkb4-pb3@zdrav.mos.ru); Кардашян Руслан Антраникович (rakar_26@mail.ru); Игумнов Сергей Александрович (igumnov_sa@rsmu.ru); Истомина Виктория Витальевна; Кочина Анастасия Олеговна (narkolog.ipk@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.26

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОГО ЛЕЧЕНИЯ ЖЕНЩИН СО ВТОРИЧНЫМ СТРЕСС-АССОЦИИРОВАННЫМ ГИПОГОНАДОТРОПНЫМ ГИПОГОНАДИЗМОМ

RESULTS OF COMPREHENSIVE TREATMENT FOR WOMEN WITH SECONDARY STRESS-INDUCED HYPOGONADOTROPIC HYPOGONADISM

E. Osadchaya
L. Tselkovich
R. Balter
T. Ivanova
O. Ilchenko

Summary. The effectiveness of complex treatment for stress-associated hypogonadotropic hypogonadism was evaluated based on fertility indicators and stress biomarkers. A total of 54 patients with this diagnosis were examined. Statistical analysis revealed that a comprehensive approach aimed at addressing the causes of chronic stress is the most effective treatment. The study also highlighted the importance of incorporating cortisol circadian rhythm assessment into the diagnostic algorithm to predict treatment outcomes and develop personalized therapeutic strategies for patients with stress associated HH.

Keywords: secondary stress-induced hypogonadotropic hypogonadism, biomarkers, Perceived Stress Scale, treatment.

Осадчая Евгения Игоревна
Соискатель, Самарский государственный медицинский Университет;
Международная Био Клиника IBC РФ, г. Самара
japen4ela@gmail.com
Целкович Людмила Савельевна
доктор медицинских наук, профессор
Самарский государственный медицинский университет
samaraobsgyn2@yandex.ru
Балтер Регина Борисовна
доктор медицинских наук, профессор,
Самарский государственный медицинский университет
regina.balter@yandex.ru
Иванова Татьяна Владимировна
кандидат медицинских наук, доцент,
Самарский государственный медицинский университет
t.v.ivanova@samsmu.ru
Ильченко Олеся Андреевна
кандидат медицинских наук, ассистент,
Самарский государственный медицинский университет
olesay.ilchenko@gmail.com

Аннотация. Проведена оценка эффективности комплексного лечения стресс-ассоциированного гипогонадотропного гипогонадизма на основе показателей фертильности и анализа биомаркеров стресса. Обследовано 54 пациентки с данным диагнозом. Путем обработки статистических данных установлено, что комплексный подход, направленный на устранение причин хронического стресса, является наиболее обоснованным методом лечения. Определена необходимость включения оценки циркадного ритма кортизола в диагностический алгоритм для прогнозирования эффективности лечения и разработки персонализированных терапевтических стратегий для пациенток со стресс-ассоциированным ГГ.

Ключевые слова: вторичный стресс-ассоциированный гипоталамо-гипофизарный гипогонадизм, биомаркеры, шкала воспринимаемого стресса, лечение.

Острота проблемы вторичного гипогонадотропного гипогонадизма (ГГ), индуцированного хроническим стрессом, в современной репродуктивной эндокринологии неуклонно возрастает [1, 2]. Являясь функциональным расстройством, ГГ базируется на подавлении пульсовой секреции гонадотропин-рилизинг-гормона (ГнРГ) под влиянием комплекса психоэмоциональных, метаболических и энергетических факторов, представляя собой универсальный патогенетический механизм нарушения репродуктивной функции [3, 4]. Больше всего распространен среди женщин репродуктивного возраста, подверженных воздействию сильных психоэмоциональных нагрузок, нутритивного дефицита и синдрома хронической усталости, что обуславливает его существенный медико-социальный характер [5–7].

Патогенез стресс-ассоциированного ГГ — это сложная интеграция нейроэндокринных механизмов, основным фактором которых является активация гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой оси [8, 9]. Повышенный

уровень кортикотропин-рилизинг-гормона (КРГ) и кортизола напрямую ингибирует секрецию ГнРГ. Это приводит к вторичному снижению выработки гонадотропинов (ЛГ и ФСГ) и, как следствие, к недостаточности функции яичников [10]. Параллельно подключаются и другие механизмы, в том числе, нарушение секреции киссептина, лептина и нейротрансмиттеров, что усиливает дисфункцию репродуктивной оси [11]. Клинически это проявляется олиго- или аменореей, бесплодием и симптомами эстрогендефицита, а значит требует патогенетически обоснованной коррекции [12].

В отличие от органических форм ГГ терапевтическая стратегия при стресс-ассоциированном варианте принципиально отличается — имеет комплексный и поэтапный характер, опирается на немедикаментозные подходы, которые устраняют первопричины [13]. Важными элементами терапии являются когнитивно-поведенческая психотерапия, восстановление нормального режима труда и отдыха, диетологические рекомендации, направленные на восстановление энергетического баланса. Эти методы доказали свою эффективность в нормализации собственной пульсовой секреции ГнРГ и восстановлении овуляторной функции [14–16].

В клинической практике возникает необходимость обоснования роли и места фармакологической поддержки в комплексном лечении данного состояния [17, 18]. Вопрос об эффективности стандартных схем лечения без учета особенностей пациентки среди специалистов остается дискуссионным. Существует очевидная потребность в сравнительной оценке различных терапевтических подходов при стресс-ассоциированном ГГ [19, 20]. Целостный анализ, объединяющий патогенетическое обоснование, дает оценку результативности нефармакологических методов и определение четких показаний для фармакотерапии, являясь необходимым фактором разработки оптимизированных клинических алгоритмов ведения пациенток со стресс-ассоциированным ГГ [21].

В связи с изложенными выше фактами, *целью* исследования явилась оценка эффективности комплексного лечения женщин со вторичным ГГ, основанная на анализе показателей фертильности и биомаркеров хронического стресса.

В исследование вошли 54 женщины со стресс-ассоциированным ГГ. **Критерии включения в исследование:**

- наличие верифицированного вторичного функционального ГГ;
- согласие на участие в исследовании;
- репродуктивный возраст.

Критерии исключения:

- возраст моложе 18, но старше 45 лет;
- коморбидная патология, способная модифицировать показатели исследуемых биомаркеров или ответ на проводимую терапию;
- отсутствие письменного согласия на участие в исследовании.

Критерием оценки эффективности проведенного лечения стало восстановление овуляторного спонтанного менструального цикла.

В зависимости от результатов лечения все пациентки были распределены на две подгруппы: 1а — неэффективное лечение, 21 женщина и 1б — эффективное лечение, 33 пациентки.

Применялись **методы исследования**:

- адаптированная русскоязычная «Шкала воспринимаемого стресса» (Perceived Stress Scale (PSS)-10) [22];
- твердофазный иммуноферментный анализ для определения динамики содержания кортизола и ДГЭА в слюне;
- иммунохемилюминесцентный анализ — определение кортизола, ДГЭА-С, гипофизарных гормонов в сыворотке крови;
- тесты функциональной диагностики (в баллах);
- определение объемов яичников посредством УЗИ и М-ЭХО.

Все результаты статистически обрабатывались посредством программного обеспечения MedCalc (v. 15.2) и Microsoft Excel. Для сравнения количественных показателей, представленных в виде медианы и межквартильного размаха — Me (Q1–Q3), был применен U-критерий Манна-Уитни, а статистическая значимость устанавливалась при $p < 0,05$, в соответствии с критерием χ^2 Пирсона.

Определено, что все пациентки, попавшие под наблюдение, при первичном опросе предъявляли жалобы на нарушение менструального цикла по типу опсоменореи / олигоменореи, развившейся в последние 1–2 года, а также бесплодия.

Обследование и лечение проводилось согласно клиническим рекомендациям [20].

В рамках данной работы у всех пациенток в баллах PSS определена степень хронического стресса [23]. Затем они были проконсультированы психологом с назначением персонифицированной терапии, включающей когнитивно-поведенческий аспект, терапию принятия и ответственности, изменение образа жизни, ограничение кофеина и алкоголя. После установления степени дефицита витаминов и микроэлементов, женщинам индивидуально были подобраны микронутриенты и витаминные комплексы.

Зафиксировано, что ни у кого не выявлено тревожных, обсессивно-компульсивных или посттравматических стрессовых расстройств, лечение которых требовало бы назначение специфических препаратов (селективных ингибиторов обратного захвата серотонина или селективных ингибиторов обратного захвата серотонина и норадреналина).

Параллельно с психотерапевтической коррекцией и регуляцией образа жизни проводилось лечение ГГ, которое включало двухфазные препараты заместительной терапии в составе 2 мг 17β-эстрадиола и 10 мг дидрогестерона, или 2 мг эстрадиола валерата и гестагенового компонента, который подбирался индивидуально: 0,5 мг норгестрела, или 1 мг ципротерон ацетата, или 0,15 мг левоноргестрела.

После шестимесячного лечения было проведено *повторное обследование* с балльной оценкой воспринимаемого стресса, гормонального профиля и восстановления овуляции. Обследование выявило, что у всех пациенток в течение двух месяцев был восстановлен регулярный ритм менструаций. В табл. 1 представлены результаты определения критериев фертильности в группе до и после лечения.

Таблица 1.

Показатели критериев фертильности у женщин до и после лечения

Показатель	Me (Q1–Q3)		U	Z	p
	До лечения (n=54)	После лечения (n=54)			
Объем яичников, $см^3$	3,69 (2,87–4,41)	6,05 (4,5–7,6)	486,0	**–7,27**	<0,001
М-Эхо, мм	2,26 (2,88–3,72)	6,04 (5,61–6,5)	0,0	–9,15	<0,001
ТФД, баллы	3 (3–4)	8 (6–8)	0,0	–9,15	<0,001

Результаты свидетельствуют о том, что после лечения медианные значения размеров яичников и М-Эхо статистически значимо изменились:

- увеличился объем яичников — до лечения 3,69 (2,87–4,41) $см^3$, после лечения — 6,05 (4,5–7,6) $см^3$;
- увеличилось М-ЭХО — 2,26 (2,88–3,72) мм и 6,04 (5,61–6,5) мм, соответственно (p <0,001).

На фоне восстановленных регулярных овуляторных циклов, у более чем половины пациенток группы (61,1 %) значительно улучшилась ситуация по баллам ТФД — 3 (3–4) балла и 8 (6–8) баллов, соответственно (p <0,0001).

Чтобы понять *параметры и причины*, по которым овуляторные циклы не восстановились у остальных женщин основной группы, все пациентки были разделены на две подгруппы:

- 1А (n=21) — женщины с ановуляторными менструальными циклами и сохранившимися клиническими признаками ГГ;
- 1Б (n=33) — женщины с восстановленным овуляторным менструальным циклом без признаков ГГ через полгода комплексной терапии.

Был проведен сравнительный анализ гормонального фона, уровня воспринимаемого стресса и оценены факторы риска, способствующие неэффективности терапии ГГ (табл. 2).

Таблица 2.

Антропометрическая характеристика женщин подгрупп 1а и 1б

Показатель	Me (Q1–Q3)		U-статистика	Z-статистика	p-value
	1а (n=21)	1б (n=33)			
Возраст	36 [29–37]	32 [32–38]	345	–0,42	0,674
Рост	166 [163–170]	167 [165–172]	312	–1,12	0,263
ИМТ	25,4 [23,1–27,5]	25,2 [22,5–28,3]	342	–0,18	0,857

Антропометрические показатели женщин с различным исходом лечения были сопоставлены. Наиболее значимым из представленных показателей, возможно влияющим на исход терапии, считался индекс массы тела (ИМТ): в подгруппе 1а он составил 25,4 (23,1–27,5), в подгруппе 1б — 25,2 (22,5–28,3), p=0,857. Однако статистической разницы между данными в подгруппах не установлено.

Затем был изучен анамнез гинекологических заболеваний, который тоже мог повлиять на реакцию репродуктивной системы организма на назначенную терапию (табл. 3).

Показатели анамнеза гинекологической патологии, которые, возможно, могли оказать влияние на эффективность проводимого лечения, в выделенных подгруппах не выявили статистически значимых различий.

Было установлено, что на такие значимые состояния, как гиперпролактинемия, в подгруппе 1а указывало 4 женщины — 19,0 %, а в подгруппе 1б — 3 пациентки, 9,1 % ($\chi2$=1,128, p=0,289; на фолликулярные кисты яичников — 6 (28,6 %) и 11 (33,3 %), соответственно ($\chi2$=0,135, p=0,714). Остальные анамнестические сведения о гинекологической патологии, как правило, относились к перенесенному воспалению, своевременно излеченному до вступления в исследование и никак не влияющему на особенности функционирования репродуктивной оси.

Таблица 3.

Анамнез гинекологической патологии женщин подгрупп 1а и 1б

Показатель	1а (n=21)	1б (n=33)	χ2	df	p
	N, %	N, %			
Миома матки	7 (33,3)	5 (15,2)	2,455	1	=0,118
Мультифолликулярные яичники (по УЗИ)	16 (76,2)	19 (57,6)	1.950	1	0,163
Киста желтого тела	7 (33,3)	10 (30,3)	0,055	1	0,816
Аденомиоз	2 (9,5)	4 (12,1)	0,088	1	0,768
Гиперпролактинемия	4 (19,0)	3 (9,1)	1,128	1	0,289
Фолликулярная киста	6 (28,6)	11 (33,3)	0,135	1	0,714
ИППП	6 (28,6)	12 (36,4)	0,351	1	0,554
Хронический сальпингоофорит	5 (23,8)	8 (24,2)	0,001	1	0,972
Эндометрит	2 (9,5)	2 (6,1)	0,224	1	0,636
Воспалительная болезнь шейки матки	11 (52,4)	18 (54,5)	0,024	1	0,877
Эндометриоз наружный	4 (19,0)	5 (15,2)	0,140	1	0,709
Тазовые перитонеальные спайки у женщин	8 (38,1)	13 (39,4)	0,009	1	0,924
Киста бартолиновой железы	2 (9,5)	1 (3,0)	1,031	1	0,310

Анамнез перенесенных экстрагенитальных заболеваний представлен в табл. 4.

Рассматривая результаты анализа перенесенных экстрагенитальных значимых различий в подгруппах не выявлено. Достаточно большое число женщин указывало на заболевания кожи: в 1а группе таких было 10 (47,6 %) человек, в 1б группе — 21 пациентка (63,6 %), (χ2=1,347, p=0,246); болезни системы пищеварения — 9 (42,9 %) и 12 (36,4 %), (χ2=0,228, p=0,634) и нервной системы 5 (23,8 %) и 8 (24,2 %) (χ2=0,001, p=0,972), соответственно. На такие перенесенные заболевания, как гипотиреоз в 1а подгруппе указали 3 пациентки (14,3 %), в подгруппе 1б — 6 пациенток (18,2 %), (χ2=0,140, p=0,709), гипертиреоз — 2 (9,55 %) и 2 (6,1 %) (χ2=0,224, p=0,636), соответственно. Кроме того, 4 женщины (19,0 %) 1а подгруппы и 12 пациенток из 1б подгруппы (36,4 %) отметили частые ОРВИ (χ2=1,846, p=0,175), что косвенно доказывает нестабильное состояние иммунной системы.

Анамнез хирургических вмешательств (табл. 5), проведенных женщинам основной группы до назначения терапии и вступления в исследование, также не показал статистически значимых различий, которые могли бы указать на значимость того или иного вмешательства в эффективности восстановления овуляторного менструального цикла в процессе проведения терапии.

Таблица 4.

Анамнез соматической патологии женщин подгрупп 1а и 1б

Показатель	1а (n=21)	1б (n=33)	χ2	df	p
	N, %	N, %			
Детские инфекции	8 (38,1)	14 (42,4)	0,100	1	0,753
Частые ОРВИ	4 (19,0)	12 (36,4)	1,846	1	0,175
Хронический тонзиллит	2 (9,5)	7 (21,2)	1,262	1	0,262
Болезни органов дыхания	1 (4,8)	3 (9,1)	0,351	1	0,554
Болезни системы пищеварения	9 (42,9)	12 (36,4)	0,228	1	0,634
Варикоз вен малого таза	5 (23,8)	7 (21,2)	0,050	1	0,823
Заболевания нервной системы	5 (23,8)	8 (24,2)	0,001	1	0,972
Заболевания кожи	10 (47,6)	21 (63,6)	1,347	1	0,246
Заболевания почек и мочевыводящей системы	2 (9,5)	3 (9,1)	0,003	1	0,958
Доброкачественные заболевания молочных желез	5 (23,8)	14 (42,4)	1,950	1	0,163
Гипотиреоз	3 (14,3)	6 (18,2)	0,140	1	0,709
Гипертиреоз	2 (9,5)	2 (6,1)	0,224	1	0,636

Таблица 5.

Анамнез хирургических вмешательств женщин подгрупп 1а и 1б

Показатель	1а (n=21)	1б (n=33)	χ2	df	P
	N, %	N, %			
Пайпель биопсия в анамнезе	4(19,0)	5 (15,2)	0,140	1	0,709
Тубэктомия	2 (9,5)	2 (6,1)	0,224	1	0,636
Цистэктомия	3 (14,3)	4 (12,1)	0,053	1	0,818
Частичная резекция яичника	1 (4,8)	3 (9,1)	0,351	1	0,554
Аппендэктомия	5 (23,8)	10 (30,3)	0,270	1	0,604

Таким образом, результаты обработки анамнестических данных антропометрии, перенесенных гинекологической и соматической патологий, свидетельствуют о том, что приведенные выше показатели в плане восстановления функции репродуктивной оси не влияли на эффективность лечения вторичного ГГ, ассоциированного с хроническим стрессом.

Результаты динамики кортизола и ДГЭА в слюне женщин основной группы отражены в табл. 6.

Таблица 6.

Показатели суточной динамики кортизола и ДГЭА в слюне женщин подгрупп 1а и 1б

Показатель	Медиана (Q1–Q3)		U-статистика	p-value
	Группа 1а (n=21)	Группа 1б (n=33)		
Кортизол, нг/мл 7–9ч	7,52 (3,07–9,11)	5,94 (2,47–7,68)	175	0,042
Кортизол, нг/мл 11–13ч	2,33 (1,08–2,87)	1,67 (0,81–2,56)	168	0,028
Кортизол, нг/мл 15–17ч	1,41 (0,63–1,82)	0,97 (0,52–1,64)	162	0,021
Кортизол, нг/мл 22–24ч	0,65 (0,29–0,84)	0,39 (0,23–0,75)	158	0,015
Кортизол — полдень, нг/мл	1,62 (0,98–2,14)	1,31 (0,72–1,86)	172	0,035
ДГЭА, пг/мл 7–9ч	312,4 (134,5–402,8)	189,2 (118,7–429,6)	192	0,124
ДГЭА, пг/мл 11–13ч	194,2 (124,6–401,2)	225,9 (149,3–367,2)	185	0,089
,	198,2 (131,9–406,2)	236,8 (152,4–372,8)	188	0,102
ДГЭАпг/мл 22–24ч	263,4 (163,8–506,1)	289,6 (172,9–396,5)	195	0,156
ДГЭА — Полдень, пг/мл	253,6 (154,7–498,4)	253,6 (154,7–387,3)	198	0,187
ДГЭА / кортизол, нг/мл * 1000 (В/А*1000)	276,4 (190,1–432,8)	256,2 (188,8–365,3)	205	0,245

Полученные данные говорят о том, что у женщин с ановуляторными циклами после проведенного лечения практически все фракции кортизола статистически значимо выше, чем у женщин с восстановленной овуляцией. Наибольшие значения уровней кортизола в слюне получены в вечерних показателях: в подгруппе 1а медианные показатели кортизола в 15–17 ч составили 1,41 (0,63–1,82) нг/мл, в подгруппе 1б — 0,97 (0,52–1,64) нг/мл (p=0,021), в 22.00–24.00 ч 0,65 (0,29–0,84) нг/мл и 0,39 (0,23–0,75) нг/мл, соответственно (p=0,035).

Что касается ДГЭА, то наибольшая разница была получена в показателях 11.00–13.00 ч — 194,2 (124,6–401,2) пг/мл в 1а группе и 225,9 (149,3–367,2) пг/мл в 1б подгруппе, соответственно (p = 0,089).

Вместе с тем, полученные показатели содержания надпочечниковых гормонов не выходили за пределы референсных лабораторных показателей. Однако после лечения в 1а подгруппе сохранялся десинхроноз суточной динамики кортизола. У женщин с низкой эффективностью лечения были зафиксированы повышенные значения кортизола, по сравнению с подгруппой 1б, во все временные интервалы, имело место нарушение циркадного ритма выработки кортизола, что проявлялось медленным снижением уровней кортизола к вечеру, а также имелись признаки функциональной гиперкортизолемии. Что касается подгруппы 1б, то у этих женщин суточный ритм кортизола был восстановлен, а соотношение ДГЭА / кортизол максимально приближено к нормальным показателям 256,2 (188,8–365,3).

Результаты обследования женщин на содержание тиреоидных и гипофизарных гормонов репродуктивной оси после проведенного лечения отражены в табл. 7.

Таблица 7.

Показатели тиреоидных и гипофизарных гормонов женщин подгрупп 1а и 1б после лечения

Показатель	Медиана (Q1-Q3)		U-статистика	p-value
	Группа 1а (n=21)	Группа 1б (n=33)		
ТТГ, мкМЕ/л	2,07 (1,21–2,87)	2,51 (1,41–3,31)	178	0,067
Т3 свободный, пмоль/л	4,25 (3,42–4,65)	4,18 (3,28–4,92)	245	0,512
Т4 свободный, пмоль/л	15,4 (12,0–19,6)	15,1 (12,6–18,3)	238	0,421
АТ-ТПО МЕ/л	26,5 (13,3–36,4)	23,2 (16,0–35,8)	232	0,356
Пролактин мкМЕ/л,	435 (335–540)	430 (355–505)	241	0,445
ФСГ, мМЕ/мл	3,4 (2,0–4,6)	3,5 (2,4–5,0)	228	0,312
ЛГ, мМЕ/м	3,8 (2,2–5,3)	3,3 (2,3–4,5)	215	0,198
АМГ, нг/мл	4,48 (3,88–6,16)	4,92 (4,02–5,52)	325	0,703

В результате можно сделать вывод о том, что у женщин обеих групп показатели содержания в крови тирео-

идных и гипофизарных гормонов были в пределах нормы. В 1а группе значения ТТГ были ниже, чем у женщин с восстановленной овуляцией группы 1б — 2,07 (1,21–2,87) мкМЕ/л и 2,51 (1,41–3,31) мкМЕ/л, соответственно (p = 0,067). Тем не менее статистически значимым это различие не было. Что касается остальных гормонов, то гонадотропины имели физиологический уровень: в 1а группе ФСГ 3,4 (2,0–4,6) мМЕ/мл и 3,5 (2,4–5,0) мМЕ/мл (p=0,312); ЛГ 3,8 (2,2–5,3) мМЕ/мл и 3,3 (2,3–4,5) мМЕ/мл (p=0,198), соответственно. Кроме того, восстановились физиологические показатели ФСГ / ЛГ. В обеих подгруппах после лечения был определен нормальный уровень пролактина: 435 (335–540) мкМЕ/л и 430 (355–505) мкМЕ/л, соответственно (p=0,445).

Подводя итоги лечения, следует отметить, что у 38,9 % пациенток, несмотря на нормализацию показателей тиреоидной и гонадотропной функций, спонтанные овуляторные циклы не восстановились, что обусловило необходимость продолжения терапии, дополнительных фармакологических вмешательств и применения ВРТ. Ключевым различием в группе с неудачным исходом терапии явилось нарушение циркадного профиля кортизола, а именно — замедленное снижение его уровня в течение дня при нормальном соотношении ДГЭА / кортизол. Следовательно, для повышения эффективности терапии оправдан поиск предикторов ответа на лечение, который следует осуществлять уже на этапе диагностики ГГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abdelaal A.E., Beheri M.A., and Abdelkawi A.F. Reproductive outcomes in women with hypogonadotropic hypogonadism: a case series study. Journal of the Middle East Reproductive Medicine Society. 2021; 11: 26. URL: https://doi.org/10.1186/s43043-021-00055-6
2. Локтионова А.С. Иловайская И.А. Этиопатогенетические аспекты центрального (гипогонадотропного) женского гипогонадизма. Медицинский вестник Юга России. 2019; 10(4): 15–27. Doi: https://doi.org/10.21886/2219-8075-2019-10-4-15-27
3. Касян В.Н., Адамян Л.В. Гонадотропинингибирующий гормон — ключевое звено регуляции репродуктивной системы у женщин: функции и механизм действи, регуляция биосинтеза, клинические перспективы (обзор литературы). Проблемы репродукции. 2017; 23(2): 8–13. Doi: https://doi.org/10.17116/repro20172328-13
4. Chaudhary N., Davalbhakta M., and Namputhiri L. Dysregulation of GnRH in polycystic ovarian syndrome (PCOS) is a manifestation of an altered neurotransmitter profile. Reprod Biol Endocrinol. 2018; 37: 16. https://doi.org/10.1186/s12958-018-0354-x
5. Воробьева Ю.Д., Данилов А.Б. Синдром хронической усталости: современные аспекты диагностики и лечения. Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2021; 121(4): 113–120. Doi: https://doi.org/10.17116/jnevro2021121402113
6. Li W., Huang S., Wei Y. et al. Connecting the dots: the role of fatigue in female infertility. Reprod Biol Endocrinol. 2024; 66: 22. Doi: https://doi.org/10.1186/s12958-024-01235-5
7. Дедов И.И., Мельниченко Г.А., Иловайская И.А. Гипогонадотропный гипогонадизм у женщин: причины возникновения, подходы к диагностике и лечению. Акушерство и гинекология. 2012; 8–2: 11–15. URL: https://aig-journal.ru/articles/Gipogonadotropnyi-gipogonadizm-u-jenshin-prichiny-vozniknoveniya-podhody-k-diagnostike-i-lecheniu.html
8. Арсаханова Г.А. Формирование противодействия от организма человека на стресс. Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2020; 5: 307–15. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-protivodeystviya-ot-organizma-cheloveka-na-stress/viewer
9. Поскребышева Е.А., Волкова О.В. Характеристика гипофизарно-адреналовой системы при остром и хроническом стрессе. Современные проблемы науки и образования. 2006; 6. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=644
10. Сухарева Е.В. Роль кортикотропин-рилизинг гормона и его рецепторов в регуляции нейрофизиологических и поведенческих реакций на стресс. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2021; 25(2): 216–223. Doi: https://doi.org/10.18699/VJ21.025
11. Hu K.L., Chen Z., Li H. et al. Advances in the clinical use of kisspeptin-GnRH in the female reproductive system. Reprod Biol Endocrinol. 2022; 20: 81. Doi: https://doi.org/10.1186/s12958-022-00953-y
12. Саидова Р.А. Гормональная коррекция нарушений менструальной функции. РМЖ. 2002; 7: 346. URL: https://www.rmj.ru/articles/ginekologiya/Gormonalynaya_korrekciya_narusheniy_menstrualynoy_funkcii/
13. Jiang Y., Peng T., Gaur U., et al. The Role of Corticotropin-Releasing Factor in the Neuroimmune Mechanisms of Depression: A Review of Current Pharmaceutical and Herbal Treatments. Front. Cell. Neurosci. 2019; 13: 290. Doi: https://doi.org/10.3389/fncel.2019.00290
14. Golshani F., Hasanpour S., Mirgafurvand M. et al. The effect of cognitive behavioral therapy on the level of perceived stress in pregnant women with a history of primary infertility: a controlled randomized clinical trial. BMC Psychiatryю. 2021; 21: 278. https://doi.org/10.1186/s12888-021-03283-2
15. Ицкович М.М., Полякова И.Г., Сыманюк Э.Э. Эффективность психокоррекционного воздействия методами имагинативной психотерапии при идиопатическом бесплодии. Экспериментальная психология. 2024; 17(1): 214–34. Doi: https://doi.org/10.17759/exppsy.2024170114
16. Голышкина М.С., Геворгян М.М., Николенко В.Н. и др. Женское бесплодие как фактор эмоционального расстройства: значение психотерапии в лечении бесплодия. Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика. 2021; 13(2): 97–103. Doi: https://doi.org/10.14412/2074-2711-2021-2-97-103
17. Чернуха Г.Е., Гусев Д.В., Табеева Г.И., Прилуцкая В.Ю. Современные принципы терапии функциональной гипоталамической аменореи. Акушерство и гинекология. 2018; 6: 11–17. Doi: https://dx.doi.org/10.18565/aig.2018.6.11-17
18. Sui D.S., Javaid U., Quinton R. Estrogen replacement therapy in young women with hypogonadism — conclusions from the literature regarding the treatment of young women with premature ovarian insufficiency and transgender women. Front. Endocrinology. 2019; 10: 1–7. Doi: https://doi.org/10.3389/fendo.2019.00685
19. Осадчая Е.И. Результаты эффективности лечения женщин с функциональным, вторичным гипогонадотропным гипогонадизмом на основе анализа биомаркеров стресса / Е.И. Осадчая, Л.С. Целкович, О.А. Ильченко // Разработка и применение наукоёмких технологий в интересах модернизации современного общества. Уфа: НИЦ АЭТЕРНА, 2025. — С. 147–150.

20. Осадчая Е.И. Результаты анамнестических данных антрометрии, перенесенной гинекологической и соматической патологии после лечения женщин с гипогонадотропным гипогонадизмом / Е.И. Осадчая, Т.В. Иванова, Р.Б. Балтер // Разработка и применение наукоёмких технологий в интересах модернизации современного общества. Уфа: НИЦ АЭТЕРНА, 2025. — С. 151–154.
21. Осадчая, Е.И. Особенности персонифицированного подхода к терапии женщин с вторичным стресс-ассоциированным гипогонадотропным гипогонадизмом / Е.И. Осадчая, Л.С. Целкович, Р.Б. Балтер // Междисциплинарные подходы в современной науке: Вызовы, достижения и перспективы. Уфа: НИЦ АЭТЕРНА, 2025. — С. 256–259.
22. Абабков В.А., К. Барышникова, О.В. Воронцова-Венгер и др. Валидизация русскоязычной версии опросника «Шкала воспринимаемого стресса-10». Вестник СПбГУ. Серия 16: Психология. Педагогика. 2016; 2: 6–14. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/validizatsiya-russkoyazychnoy-versii-oprosnika-shkala-vosprinimaemogo-stressa-10/viewer
23. Осадчая Е.И. Значение комбинированных прогностичских моделей, включающих шкалу воспринемаемого стресса (PSS) для прогноза излеченности ФГГ / Е.И. Осадчая, Р.Б. Балтер, О.А. Ильченко // Междисциплинарные подходы в современной науке: Вызовы, достижения и перспективы. Уфа: НИЦ АЭТЕРНА, 2025. — С. 259–263.
24. Клинические рекомендации «Аменорея и олигоменорея» (утв. Министерством здравоохранения РФ, 2024). URL: https://rpc.karelia.ru/wp-content/uploads/2025/01/КР-Аменорея-и-олигоменорея.pdf

© Осадчая Евгения Игоревна (japen4ela@gmail.com); Целкович Людмила Савельевна (samaraobsgyn2@yandex.ru);
Балтер Регина Борисовна (regina.balter@yandex.ru); Иванова Татьяна Владимировна (t.v.ivanova@samsmu.ru);
Ильченко Олеся Андреевна (olesay.ilchenko@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.29

ЭНДОВАСКУЛЯРНОЕ ЛЕЧЕНИЕ ОБСТРУКТИВНЫХ ПОРАЖЕНИЙ БРАХИОЦЕФАЛЬНЫХ АРТЕРИЙ У ПАЦИЕНТОВ С СОПУТСТВУЮЩЕЙ КАРДИАЛЬНОЙ ПАТОЛОГИЕЙ

ENDOVASCULAR TREATMENT OF OBSTRUCTIVE LESIONS OF THE BRACHIOCEPHALIC ARTERIES IN PATIENTS WITH CONCOMITANT CARDIAC PATHOLOGY

K. Petrosyan
F. Yuldashev
G. Dadabaev

Summary. The purpose of this study was to evaluate the safety and effectiveness of internal carotid artery (ICA) stenting in patients with severe concomitant cardiac pathology. The study included materials from 250 patients who underwent internal carotid artery stenting with comorbid pathology from the cardiovascular system. Based on the nature of the therapeutic approach, the patients were divided into two groups: group 1 «study group» — patients who underwent step-by-step treatment of carotid and cardiac pathology (n=129, 51.6 %); Group 2, the «comparison group», consisted of patients who underwent ICA stenting with a history of compensated cardiac pathology (n=121, 48.4 %). The results of this study showed that in the long—term period, cases of ischemic stroke were significantly lower in the group of staged treatment of carotid and cardiac pathology (p=0.04 — 12 months; p= 0.0006 — 36 months), however, the number of ischemic coronary events was significantly higher (p=0.003 — 12 months; p=0.03 — 36 months), which is probably related to the initial severity of the patients.
The strategies of staged endovascular treatment of ICA lesions and correction of cardiac pathology presented in this work are effective and safe, and do not differ from the standard results of isolated ICA stenting.

Keywords: carotid artery stenting, internal carotid artery, coronary bypass surgery, percutaneous coronary intervention.

Петросян Карен Валерьевич
Доктор медицинских наук, врач, ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева
dr.petrosian@gmail.com
Юлдашев Фаридун Шомуротович
Врач, ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева
faridun.yuldashev@mail.ru
Дадабаев Гуламжан Мураджанович
Кандидат медицинских наук, врач, ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева
dgmed83_83@mail.ru

Аннотация. Целью данного исследования явилась оценка безопасности и эффективности стентирования внутренней сонной артерии (ВСА) у пациентов с тяжелой сопутствующей кардиальной патологией. В исследование включены материалы 250 пациентов, которым было выполнено стентирование внутренней сонной артерии на фоне наличия коморбидной патологии со стороны сердечно-сосудистой системы. Исходя из характера терапевтического подхода, пациенты были разделены на две группы: 1 группа «группа исследования» — пациенты, которым выполнялось этапное лечение каротидной и кардиальной патологии (n=129, 51,6 %); 2 группа «группа сравнения» — пациенты, которым выполнялось стентирование ВСА на фоне компенсированной кардиальной патологии в анамнезе (n=121, 48,4 %). Результаты данного исследования показали, что в отдаленном периоде в группе этапного лечения каротидной и кардиальной патологии достоверно ниже (p=0,04 — 12 месяцев; p = 0,0006 — 36 месяцев) регистрировались случаи развития ишемического инсульта, однако, число ишемических коронарных событий было достоверно выше (p=0,003— 12 месяцев; p=0,03 — 36 месяцев), что, по-видимому, связано с исходной тяжестью пациентов.
Представленные в рамках данной работы стратегии этапного эндоваскулярного лечения поражения ВСА и коррекции кардиальной патологии являются эффективными и безопасными, и не отличаются от стандартных результатов изолированного стентирования ВСА.

Ключевые слова: стентирование сонной артерии, внутренняя сонная артерия, коронарное шунтирование, чрескожное коронарное вмешательство.

Введение

Согласно данным мировой статистики, ежегодно от 79 до 156 человек на 100000 населения страдают от ишемического инсульта, в то же время частота встречаемости цереброваскулярных болезней отмечает тенденцию к росту [1]. По данным ряда авторов, в структуре патофизиологических причин развития сосудисто-мозговой недостаточности патологические сужения сонных и позвоночных артерий занимают лидирующее место. Основными методами коррекции обструктивных поражений сонных артерий являются каротидная эндартерэктомия (КЭАЭ) и стентирование сонных артерий (СтСА) [2,3,4]. В рамках исследования SAPPHIRE (Stenting and Angioplasty with Protection in Patients at High Risk of Endarterectomy) был проведен сравнительный анализ эффективности и безопасности СтСА и КЭАЭ. Показатели одногодичной выживаемости, развития инсульта и инфаркта миокарда СтСА были сопоставимы с результатами КЭАЭ, однако у асимптомных пациентов после СтСА послеоперационный период протекал более гладко, без остаточной неврологической симптоматики [2]. В исследовании CREST (Carotid Revascularization Endarterectomy versus Stenting Trial) также получены схожие клинические результаты при сопоставлении непосредственных, средне отдалённых и отдаленных (36 суток, 5 и 10 лет соответственно) результатов СтСА и КЭАЭ. Тем не менее, несмотря на практически одинаковую низкую частоту 30-дневной летальности, развития ишемического инсульта и неврологических осложнений, эндоваскулярный подход был предпочтительной стратегией лечения у пациентов с крайне тяжелым риском при наличии коронарной патологии [3]. Говоря про отечественные данные, следует упомянуть работу Алекяна Б.Г. и соавт., в которой была выполнена оценка эффективности и безопасности каротидного стентирования и каротидной эндартерэктомии у 194 пациентов с атеросклеротическим поражением внутренней сонной артерии. При этом, по результатам данного исследования, коллегия авторов приходит к выводу об отсутствии достоверных различий в эффективностях обеих методик. Вышеуказанные исследования представляют неоценимую ценность для развития как хирургического, так и эндоваскулярного лечения. Однако вопрос сопутствующей кардиальной патологии при поражении ВСА в них представлен, в большинстве случаев, номинально. В современной отечественной и зарубежной литературе отсутствуют крупные исследования, посвящённые проблеме комплексного лечения, сопутствующей кардиальной и каротидной патологии, а имеющиеся источники в большинстве своем представлены краткими сообщениями и клиническими случаями [5].

Основная гипотеза нашего исследования: комплексный подход к этапной коррекции каротидной и кардиальной патологии у пациентов с тяжёлой коморбидностью обеспечивает более низкие риски периоперационных осложнений по сравнению с изолированным стентированием ВСА, что связано с улучшением гемодинамической стабильности и снижением объёма контрастного вещества.

В нашей работе мы представляем результаты собственных наблюдений.

Материал и методы

Данное исследование проведено на базе НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева и включало ретроспективный анализ данных 250 пациентов с атеросклеротическим поражением сонных артерий, которым было выполнено каротидное стентирование в период с 2015 по 2020 год. Все пациенты были разделены на две группы в зависимости от наличия или отсутствия сопутствующей кардиальной патологии и типа лечения.

Группа 1 «группа исследования» (n=129, 51,6 %) — пациенты, которым было выполнено стентирование сонной артерии с сопутствующим кардиохирургическим вмешательством (этапное лечение). Эта группа включала больных с сочетанными поражениями коронарных артерий и клапанов сердца, которым была выполнена реваскуляризация миокарда и/или замена клапанов сердца.

Группа 2 «группа сравнения» (n = 121, 48,4 %) — пациенты, которым выполнено только стентирование сонной артерии без проведения других кардиохирургических вмешательств (изолированное лечение). Эта группа включала больных с компенсированными формами ишемической болезни сердца (ИБС) и без необходимости экстренных кардиальных вмешательств.

Пациенты были включены в исследование на основании следующих критериев: мужчины и женщины старше 18 лет; пациенты с асимптомным стенозом сонной артерии ≥ 70 % с сопутствующий кардиальной патологией (многососудистое поражение коронарных сосудов, клапанная патология) для плановой реваскуляризации миокарда (ЧКВ или АКШ) и/или коррекции клапанной патологий; пациенты с симптомным стенозом сонной артерии ≥ 50 % с сопутствующий кардиальной патологией (многососудистое поражение коронарных сосудов, клапанная патология) для плановой реваскуляризации миокарда (ЧКВ или АКШ) и/или коррекции клапанной патологий. Критерии исключения составляли: пациенты с изолированным поражением брахиоцефальных артерий; пациенты с противопоказаниями к выполнению эндоваскулярного вмешательства; нарушение мозгового кровообращения в течение последних 4-х недель перед включением в исследование; аневризмы интракраниальных отделов сонных артерий; неатеросклеротический характер стеноза сонных артерий (например, дис-

секция, флотирующий тромбоз, выраженный кинкинг, фибромускулярная дисплазия). Первичной конечной точкой исследования являлась частота больших кардиоцеребральных осложнений (инсульт, инфаркт миокарда, смертность) в течение 72 часов, 30 дней и 36 месяцев после вмешательства.

За период с 2015 по 2020 год в отделении рентгенохирургических методов исследования и лечения сердца и сосудов на базе ФГБУ НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева МЗ РФ у 250 пациентов было выполнено стентирование внутренней сонной артерии на фоне наличия коморбидной патологии со стороны сердечно-сосудистой системы. Возраст пациентов варьировал от 44 до 83 лет (в среднем 65,7 ± 9,3 года), 187 (74,8 %) пациентов были мужского пола и 63 (25,2 %) — женского. Анализ исходных данных о пациентах показал, что средний возраст составил 65,7 ± 9,3 года, что отражает гетерогенность возрастных групп, однако различий в среднем возрасте между группами выявлено не было. Половой состав групп также оказался равномерным, при этом 74,8 % (187 пациентов) составляли мужчины и 25,2 % (63 пациента) — женщины, что соответствует типичной популяции пациентов с каротидной и кардиальной патологиями. Этот гендерный дисбаланс мог повлиять на предрасположенность к некоторым осложнениям, особенно в отношении сердечно-сосудистых заболеваний. Индекс массы тела у пациентов группы исследования в среднем составил 29,3+0,76, в группе контроля — 29,02+0,77 (p=0,677; t (236) = 0,418, C=1,97); В обеих группах ИМТ был сопоставим и статистически значимых различий между группами не выявлено (p=0,677). Это подтверждает, что обе группы были относительно однородны по показателям ожирения и метаболических нарушений, что исключает влияние этих факторов на результаты лечения. Различия во фракции выброса (ФВ) между группами были статистически значимыми (p=0,043), что указывает на возможное влияние сердечной недостаточности и сократительной способности миокарда на результаты вмешательств. Пациенты с более низкой ФВ в группе исследования могли иметь более высокий риск осложнений.

Исходя из характера терапевтического подхода, пациенты были разделены на две группы: 1 группа «группа исследования» — пациенты которым выполнялось этапное лечение каротидной и кардиальной патологии (n=129, 51,6 %); 2 группа «группа сравнения» — пациенты которым выполнялось стентирование ВСА на фоне компенсированной кардиальной патологии в анамнезе (n = 121, 48,4 %). Индекс массы тела у пациентов группы исследования в среднем составил 29,3+0,76, в группе контроля — 29,02+0,77 (p=0,677; t (236) = 0,418, C=1,97); фракция выброса в группе исследования варьировала от 32,5 до 67 (в среднем 58,3+0,81 %), в группе контроля от 48,3 до 71 % (в среднем — 63,1+0,64 %) (p=0,043 t (236) = 0,878, C=2,35).

В свою очередь в группе исследования (n=129, 51,6 %) отмечалось условное разделение пациентов на две подгруппы в зависимости от характера коррекции сопутствующей кардиальной патологии: подгруппа ВСА+ИБС и подгруппа ВСА+ клапанная патология. Так, в первой подгруппе (n=115, 89,1 %) предполагалось выполнение следующей этапности: 1 этап ЧКВ+2 этап стентирование ВСА — 56 (48,7 %), 1 этап стентирование ВСА + 2 этап АКШ — 34 (29,5 %), 1 этап стентирование ВСА+ 2 этап ЧКВ — 17 (14,8 %), 1 этап АКШ + 2 этап стентирование ВСА — 8 (7 %). Во второй подгруппе (n=14, 10,9 %) — в рамках первого этап стентирование ВСА и коррекция клапанной патологии вторым этапом выполнялась у 10 (71,4 %) пациентов и, соответственно у 4 (28,6 %) пациентов первым этапом была выполнена коррекция клапанной патологии в сочетании с АКШ и в рамках второго этапа — стентирования ВСА.

Таблица 1.

Этапность выполнения оперативных вмешательств по устранению каротидной и кардиальной патологии

1 подгруппа		
Этапность вмешательства	N	% / % общей группы
1 этап ЧКВ+ 2 этап стентирование ВСА	56	48,7 / 22,4
1 этап стентирование ВСА+ 2 этап АКШ	34	29,5 / 13,6
1 этап стентирование ВСА + 2 этап ЧКВ	17	14,8 / 6,8
1 этап АКШ + 2 этап стентирование ВСА	8	7 / 3,2
2 подгруппа		
Этапность вмешательства	N	% / % общей группы
1 этап стентирование ВСА + 2 этап коррекция клапанной патологии	10	71,4 / 4
1 этап коррекция клапанной патологии и АКШ + 2 этап стентирование ВСА	4	28,6 / 1,6

У 121 (48,4 %) пациента «группы сравнения» выполнялось изолированное стентирование ВСА на фоне фармакологически-компенсированной сердечной недостаточности, развившейся из-за сопутствующей кардиальной патологии. Исходя из характера сопутствующей кардиальной патологии в анамнезе пациенты второй группы были разделены на следующие подгруппы: подгруппа ИБС (n= 99; 81,8 %), подгруппа клапанной патологии (n= 22; 18,2 %).

Сахарный диабет (СД) и артериальная гипертензия (АГ) были одинаково распространены в обеих группах, что свидетельствует о том, что данные факторы риска не оказали значительного влияния на распределение пациентов. Курение значительно чаще встречалось в группе исследования среди мужчин (p=0,002), что могло влиять на степень поражения сосудов и необхо-

димость выполнения многокомпонентного лечения. Нарушения ритма (НР) также выявлены с большей частотой в группе исследования (p=0,036), что указывает на больший кардиологический анамнез у этих пациентов. Говоря про отягчающие факторы, а именно сахарный диабет, курение, нарушение ритма сердца и т.д. было отмечено относительно сопоставимое распределение по обеим группам пациентов.

Методы статистического анализа

При оценке результатов исследования нами применялось такие методы статистического анализа как t-критерий Стьюдента, тест log-rank, тест Wilcoxon-Breslow-Gehan, тест Tarone-Ware.

Для объективизации анализа результатов нами было выполнено сопоставление клинических параметров пациентов из обеих групп исследования на этапе их формирования.

Для оценки частоты развития больших кардиальных и церебральных осложнений, а также общей частоты смертности в группе исследования и в группе контроля был применен логарифмический ранговый критерий.

Тип исследования: Ретроспективное или проспективное исследование со сравнительным анализом двух групп пациентов. Данные анализировались с использованием методов описательной статистики, а также методов для оценки значимости различий между группами.

Сравнение пропорций: для категориальных переменных, таких как частота осложнений (инсультов, транзиторных ишемических атак), использовался критерий хи-квадрат (χ^2) для анализа пропорций в каждой группе. Там, где распределение наблюдений было недостаточным для хи-квадрат-теста (ожидаемые частоты менее 5), применялся точный критерий Фишера.

Многофакторный анализ: возможно упоминание использования логистической регрессии для оценки влияния нескольких факторов на риск осложнений, если это применимо к исследованию.

Коррекция на множественные сравнения: поскольку в исследовании проводится большое количество сравнений, для уменьшения вероятности ложноположительных результатов может быть использована коррекция на множественные сравнения, например, методом Бонферрони. Однако, если такая коррекция не использовалась, это также следует указать.

Статистическое программное обеспечение: для обработки данных использовалось программное обеспечение SPSS (версии XX).

Результаты

1. Ангиографический успех и особенности процедуры.

Операция стентирования ВСА была проведена в плановом порядке в условиях рентгеноперационной под местной анестезией. Основным сосудистым доступом в большинстве случаев являлась общая бедренная артерия — 196 (78,4 %) случаев. Лучевая артерия использовалась в 15 (6 %) случаях, а плечевая артерия — в 8 (3,2 %). У 24 (9,6 %) пациентов потребовалась замена доступа ввиду анатомических особенностей сосудистого русла. Среди 250 пациентов у 18 (7,2 %) были выявлены значимые сосудистые осложнения, требующие вмешательства (в частности, пульсирующая гематома общей бедренной артерии).

Ангиографический успех стентирования достигнут у 249 (99,6 %) пациентов: в первой группе — у 128 (99,2 %) из 129 пациентов, во второй группе — у всех 121 (100 %) пациентов (p=0,429). Среднее время выполнения процедуры составило 42,9+2,4 минуты для первой группы и 44,2+2,6 минуты для второй группы (p=0,446).

2. Использование контрастного вещества

Средний объем вводимого контрастного вещества у 250 пациентов составил 55,5±2,3 мл, однако начиная с ноября 2019 года на базе отделения РХИиЛСС стентирование ВСА выполнялось с использованием динамической сосудистой маски «Roadmap». Так, стентирование ВСА под стандартным ангиографическим контролем было выполнено у 173 (69,2 %), а стентирование ВСА под контролем «Roadmap» у 77 (30,8 %). Средний объем используемого контрастного вещества при стандартной методике составил 65 +1,86 мл и 34,8+2,1 мл при использовании «Roadmap», несмотря на номинальное числовое расхождение были получены достоверные данные, указывающие на снижение общего объема введения контрастного вещества при использовании «Roadmap» (p <0,001; t (248) = 19,169, C = 2,25).

3. Осложнения и неврологические исходы

Частота развития ишемических осложнений (включая инфаркты и инсульты) оценивалась в течение 72 часов после стентирования. В первой группе 3 пациента (2,3 %) перенесли ишемический инсульт, во второй группе — 4 пациента (3,3 %). Не было выявлено достоверных различий между группами (p=0,462).

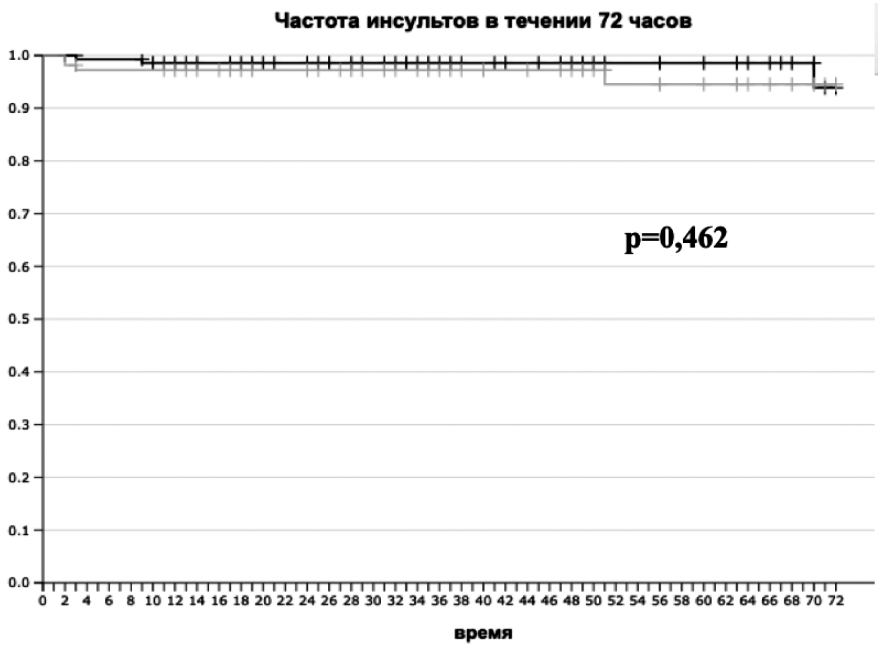
Частота транзиторных ишемических атак (ТИА) составила 9 (7 %) случаев в первой группе и 12 (9,9 %) во второй (p> 0,05). Развитие ТИА было статистически более выраженным во второй группе, но различия не достигли уровня достоверности.

Как было сказано раннее, в качестве основного сосудистого доступа общая бедренная артерия применялась в 196 (78,4 %) случаях, лучевая артерия в 15 (6 %) случаях, плечевая артерия в 8 (3,2 %) из 250 случаев. Однако, у 24 (9,6 %) пациентов была выполнена замена сосудистого доступа с лучевой артерии на общую бедренную, а у 7 (2,8 %) наоборот — с общей бедренной на лучевую, ввиду технических трудностей при проведении доставляющего катетера обусловленных особенностями анатомии сосудистого русла. Значимые сосудистые осложнения, сопряженные с сосудистым доступом (пульсирующая гематома общей бедренной артерии) потребовавшие открытого вмешательства были выявлены у 18 (7,2 %) из 250 пациентов; исходя из группового ранжирования в первой группе отмечалось 7 сосудистых осложнений (5,43 %) у 129 пациентов и соответственно 11 сосудистых осложнений (9,09 %) у 121 пациента второй группы (p=0,429; t (246) = 1,166, C = 2,25).

Среднее время выполнения операции составило 42,9+2,4 минуты для первой группы и 44,2+2,6 для второй группы (p=0,446; t (246) = 0,763, C = 1,97).

В качестве основного защитного устройства в нашем исследовании мы использовали устройства защиты дистального типа — сосудистые фильтры. Данные устройства применялись у 247 (98,2 %) из 250 пациентов, у 3 (2,8 %) пациентов применялась система проксимальной защиты по типу MO.MA. В качестве имплантируемых устройств мы использовали самораскрывающиеся стенты. Суммарно у 250 пациентов было имплантировано 252 стента (1,008 стента на пациента) с использованием 250 баллонных катетеров для оптимизации (1 баллонный катетер на 1 пациента). В двух случаях потребовалась имплантация дополнительных устройств, ввиду неоптимальной имплантации стента вследствие непроизвольных движений головой пациента и невозможности точного позиционирования.

Исходя из представленных ранее критериев оценки эффективности эндоваскулярного лечения стенотических поражений внутренних сонных артерий ангиографический успех операции был достигнут у 249 (99,6 %) из 250 пациентов (1 группа — 128 (99,2 %) из 129 пациентов; 2 — группа 121 (100 %) из 121 пациентов). Во



Comparisons

	Test Statistic	*df*	*p-value*
Logrank test	0.54136	1	0.46187
Gehan-Breslow-Wilcoxon	0.74630	1	0.38765
Tarone-Ware	0.76852	1	0.38067

Hazard ratios (Событие)

	HR	*Std Err*	*LCL (95%)*	*UCL (95%)*
"1" / "2"	0.57468	0.76264	0.12890	2.56201
"2" / "1"	1.74011	0.76264	0.39032	7.75775

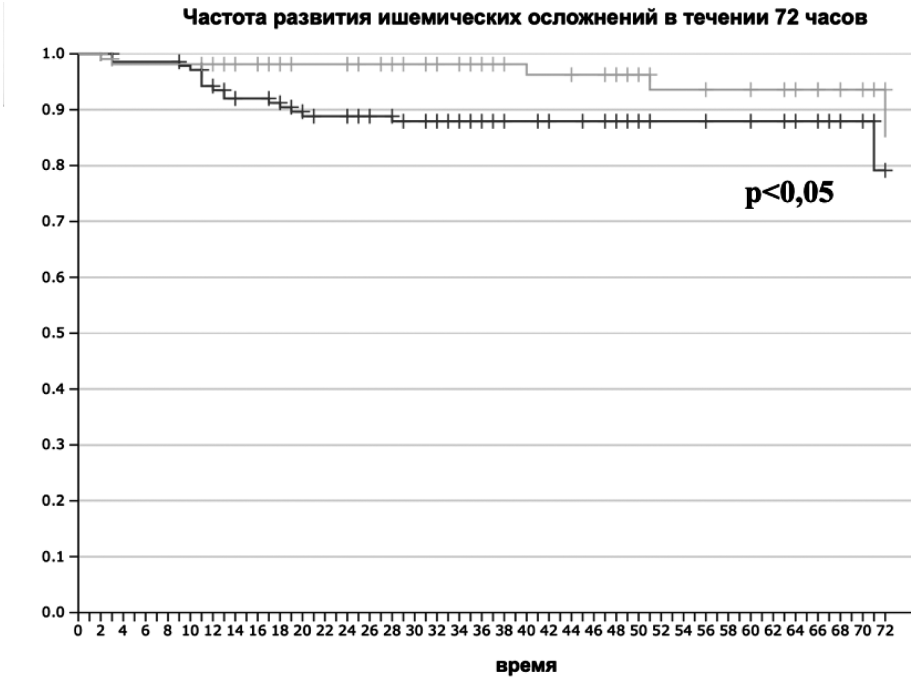
Рис. 1. Частота инсультов в течение 72 часов
(Примечание: черным цветом указана первая группа, серым — вторая)

второй группе пациентов степень выраженности стеноза внутренней сонной артерии была достоверно выше чем у пациентов из 1 группы (70,3+1,4 и 65,9+0,9 % соответственно; p <0,001; t (246) = 5,406, C = 2,25), однако конечная эффективность с устранением стеноза (резидуальный стеноз менее 15 %) была достигнута у 249 (99,6 %) из 250 пациентов. В одном случае (0,8 %; 0,4 % от общего числа) среди пациентов из 1 группы был зарегистрирован летальный случай на операционном столе. У 2 пациентов (1,7 %; 0,8 % от общего числа) из 2 группы потребовалась имплантация дополнительных стентов. Исходя из обобщенных рекомендаций American College of Cardiology (ACC), American Stroke Association (ASA), European Society of Cardiology (ESC) и Europe al Stroke Organization (ESO) мы расценивали ишемические и церебральные нарушения, развывшиеся в течение 72 часов у пациентов после стентирования ВСА.

Так, при оценке частоты развития инсультов в течении 72 часов после операции в первой группе острое нарушение мозгового кровообращения по ишемическому типу, повлекшее нарушение функций ЦНС было выявлено у 3 (2,3 %; 1,2 % от общего числа) из 129 пациентов, во второй группе — у 4 (3,3 %; 1,6 % от общего числа) из 121 пациента. При статическом анализе не было выявлено достоверных различий по частоте развития инсультов в течение первых 72 часов между 1 и 2 группой (p=0,462).

В свою очередь, при оценке частоты развития транзиторных ишемических атак в первой группе было выявлено 9 (7 %) случаев, во второй группе — 12 (9,9 %) случаев. В контексте транзиторных ишемических изменений мы расценивали нарушение функции головного мозга в виде очаговой или общемозговой симптоматики с полным регрессом в течение 72 часов. Примечательно, что во второй группе частота ТИА была достоверно выше, чем в первой группе (p > 0,05).

При оценке развития ишемических осложнений в контексте данных осложнений расценивалось развитие приступов стенокардии в течение 72 часов от момента стентирования ВСА, не купируемой приемом ва-



Comparisons

	Test Statistic	df	p-value
Logrank test	4.49143	1	0.03407
Gehan-Breslow-Wilcoxon	5.47241	1	0.01932
Tarone-Ware	5.83362	1	0.01572

Hazard ratios (Событие)

	HR	Std Err	LCL (95%)	UCL (95%)
"1" / "2"	2.78659	0.42851	1.20316	6.45394
"2" / "1"	0.35886	0.42851	0.15494	0.83115

Рис. 2. Частота развития ишемических осложнений в течение 72 часов
(Примечание: черным цветом указана первая группа, серым — вторая)

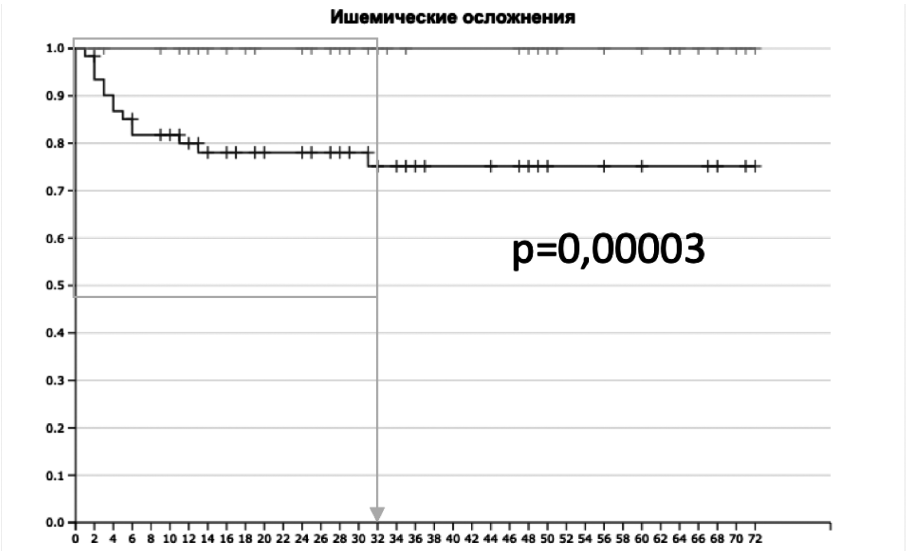
зодилататоров. Так, в 1 группе отмечалось 17 (13,2 %) из 129 случаев ишемических осложнений, во 2 группе — 5 (4,1 %) из 121 случаев (p <0,05). Во всех 22 (8,8 %) из 250 случаев была выполнена эндоваскулярная реваскуляризация симптом-связанной коронарной артерии. При этом, стоит отметить, что отмечались определенные закономерности, заключающиеся в том, что в группе этапного лечения каротидной и кардиальной патологии общее число ишемических осложнений встречалось у 16 (94,1 %) из 17 пациентов из подгруппы этапности «1 этап стентирование ВСА + 2 этап ЧКВ» и у 1 (2,9 %) из подгруппы этапности «1 этап стентирование ВСА + 2 этап АКШ».

Результативность этапного лечения обструктивных поражений ВСА у пациентов с сопутствующей кардиальной патологией за среднесрочный и долгосрочный период

Ввиду специфики группы исследования, а именно этапном подходе лечения каротидной и кардиальной патологии, нами была выполнена дополнительная оценка непосредственной эффективности стентирования ВСА в зависимости от этапности лечения коморбидной патологии. Исходя из первичной стратификации пациентов предполагалась следующая этапность выполнения оперативного лечения в плановом порядке:1 этап ЧКВ+2 этап стентирование ВСА; 1 этап стентирование ВСА + 2 этап АКШ; 1 этап стентирование ВСА+ 2 этап ЧКВ; 1 этап АКШ + 2 этап стентирование ВСА; 1 этап стентирование ВСА + 2 этап коррекция клапанной патологии; 1 этап коррекция клапанной патологии и АКШ + 2 этап стентирование ВСА.

Однако, ввиду развития ишемических осложнений у 16 (94,1 %) из 17 пациентов из подгруппы этапности «1 этап стентирование ВСА + 2 этап ЧКВ» и у 1 (2,9 %) из 17 пациентов подгруппы этапности «1 этап стентирование ВСА + 2 этап АКШ» эндоваскулярная реваскуляризация миокарда была выполнена в экстренном порядке. Также в 1 (10 %) случае из 10 пациентов из подгруппы «1 этап стентирование ВСА + 2 этап коррекция клапанной патологии» отмечался летальный исход на операционном столе, ввиду перфорации общей сонной артерии при проведении системы доставки у пациентки в возрасте 82 лет с тотальным кальцинозом аорты и её ветвей, а также выраженным стенозом аортального клапана. У остальных 112 (86,8 %) из 129 пациентов этапность выполнения вмешательства была соблюдена в плановом порядке.

Сопоставляя непосредственную эффективность и безопасность этапных подходов лечения патологии ВСА и коморбидной патологии в нашем исследовании, мы разделили 129 пациентов на 2 подгруппы в зависимости от этапности выполнения стентирования ВСА:



Comparisons				
	Test Statistic	*df*	*p-value*	
Logrank test	17.32989	1	0.00003	
Gehan-Breslow-Wilcoxon	16.98542	1	0.00004	
Tarone-Ware	16.68802	1	0.00004	
Hazard ratios (Событие)				
	HR	*Std Err*	*LCL (95%)*	*UCL (95%)*
"1" / "2"	Inf	0.53732	#N/A	#N/A
"2" / "1"	0.00000	0.53732	#N/A	#N/A

Рис. 3. Ишемические осложнения
(Примечание: черным цветом указана первая подгруппа)

1 подгруппа (n=61, 47,3 %) — первым этапом выполнялось стентирование ВСА; 2 подгруппа (n=68, 52,7 %) — первым этапом выполнялась коррекция кардиальной патологии.

Исходя из анализа частоты развития ишемических осложнений было выявлено, что в 1 подгруппе общее число ишемических осложнений составило 17 из 129 (13,2 %). В свою очередь при более детальном анализе выявлено что у 17 пациентов с развившейся клиникой острой ишемии после стентирования ВСА усредненный показатель Syntax Score составил 18,2+1,3, также при ангиографии во время выполнения ЧКВ отмечалось характерная особенность, заключавшаяся в том, что симптом связанная артерия в 15 (88,2 %) из 17 случаев имела стеноз в среднем 70+5,1 % исходя из данных дооперационной коронарографии. Примечательно что большинство ишемических осложнений развивалось в течение первых 24 часов от момента стентирования (p=0,00003).

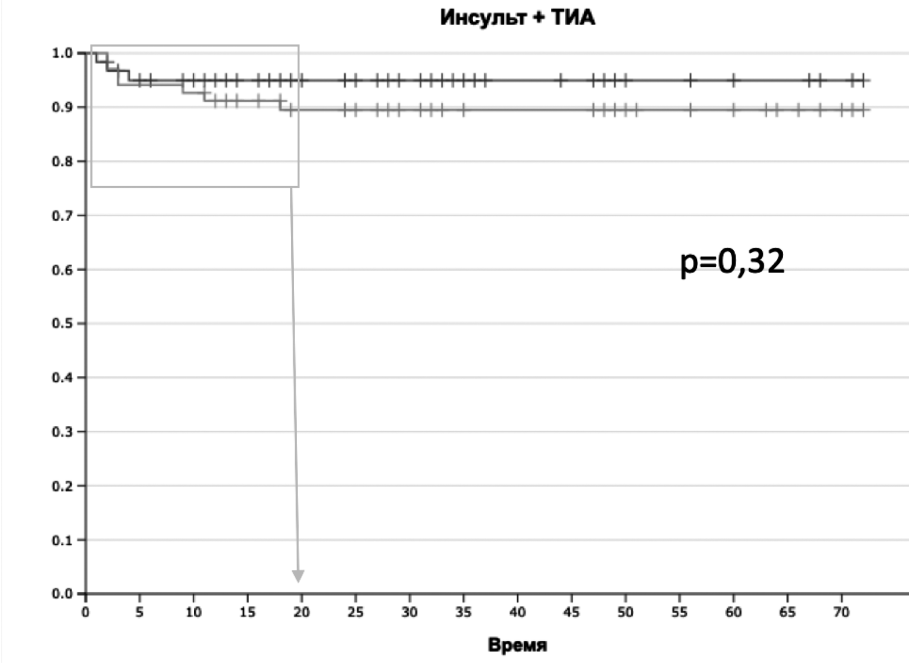
Суммарное число неврологических осложнений включая инсульты и транзиторные ишемические атаки в группе этапной коррекции составило 11 (8,5 %) из 129 случаев. Из 11 выявленных случаев неврологических осложнений 2 (8,2 %) встречались во 2 подгруппе, в то время как 9 (81,8 %) случая отмечались в 1 подгруппе (p=0,32). Все 9 случаев отмечались у пациентов с поражением ВСА, а также клапанной и коронарной патологией в анамнезе, у оставшихся двух пациентов отмечалась лишь коронарная и каротидная патология. Также, как и в случае развития острой коронарной ишемии неврологическая симптоматика развивалась в первые 24 часа после стентирования.

Принимая во внимание отсутствие достоверных отличий по параметру развития осложнений между 1 и 2 подгруппами, а также суммарно низкое количество осложнений обе этапные методики можно расценивать как эффективные и безопасные.

Усредненный временной интервал между выполнениями различных оперативных этапов составил 1,8+1,1 месяц.

Долгосрочный период наблюдений был расценен нами как 36 месяцев (3 года) от момента выполнения стентирования ВСА.

В долгосрочном периоде на контрольную госпитализацию был вызван 131 пациент (74 пациента 1 группы



Comparisons

	Test Statistic	*df*	*p-value*
Logrank test	0.99890	1	0.31758
Gehan-Breslow-Wilcoxon	0.90949	1	0.34025
Tarone-Ware	0.83293	1	0.36143

Рис. 4. Инсульт и транзиторная ишемическая атака (ТИА)
(Примечание: серым цветом указана первая подгруппа, черным — вторая)

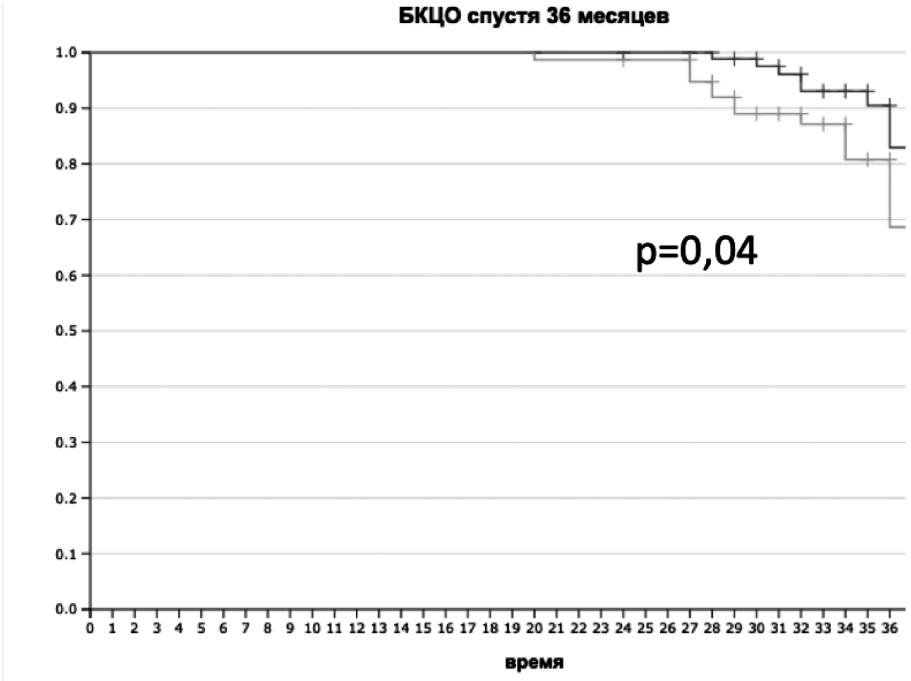
и 57 пациентов из 2 группы), дополнительно были получены электронные данные дуплексного УЗДГ сканирования брахиоцефальных артерий и общеклинические данные от 43 пациентов (15 пациентов 1 группы и 28 пациентов 2 группы). Как итог, трехгодичные результаты из расчета частоты развития больших кардиальных и церебральных осложнений (частота развития инфарктов, инсультов и летальных случаев, ассоциированных с болезнью сердца и сосудов) были оценены у 174 пациентов (1 группа — 89 пациентов; 2 группа — 85 пациента). Средний период контрольной госпитализации составил от 24 до 37 месяцев (в среднем 35,6+8,3 месяца). Из оставшихся 76 пациентов 46 были исключены из исследования, поскольку срок от момента выполнения стентирования ВСА не позволял произвести объективную статистическую оценку в рамках оценки долгосрочных результатов, дополнительно с 17 пациентами не удалось установить связь, а ещё 3 пациента скончались по причинам, не связанным с болезнью сердца и сосудов.

У 174 пациентов спустя 3 года наблюдений от момента стентирования ВСА суммарно было выявлено 23 (13,2 %) случая развития больших кардиальных и церебральных осложнений (БКЦО). При анализе частоты развития БКЦО выявлено, что в 1 группе отмечалось достоверно меньшая частота встречаемости БКЦО (8; 8,99 %) по сравнению со 2 группой (15; 17,65 %) (p=0,04).

Из общего числа БКЦО (n=23) инфаркты были выявлены в 11 (47,8 %) случаях, а инсульты в 10 (43,5 %). Отмечалось также 2 (8,7 %) летальных случая.

Во всех случаях развития инфаркта миокарда отмечался критический рестеноз стента. Данная ситуация возникла у 9 пациентов в 1 группе, и у 2 во 2 группе (p=0,03). Данным пациентам было выполнено экстренное стентирование коронарных артерий после стентирования ВСА.

Обращая внимание на частоту развития инсультов, было установлено, что 10 выявленных случаев перене-



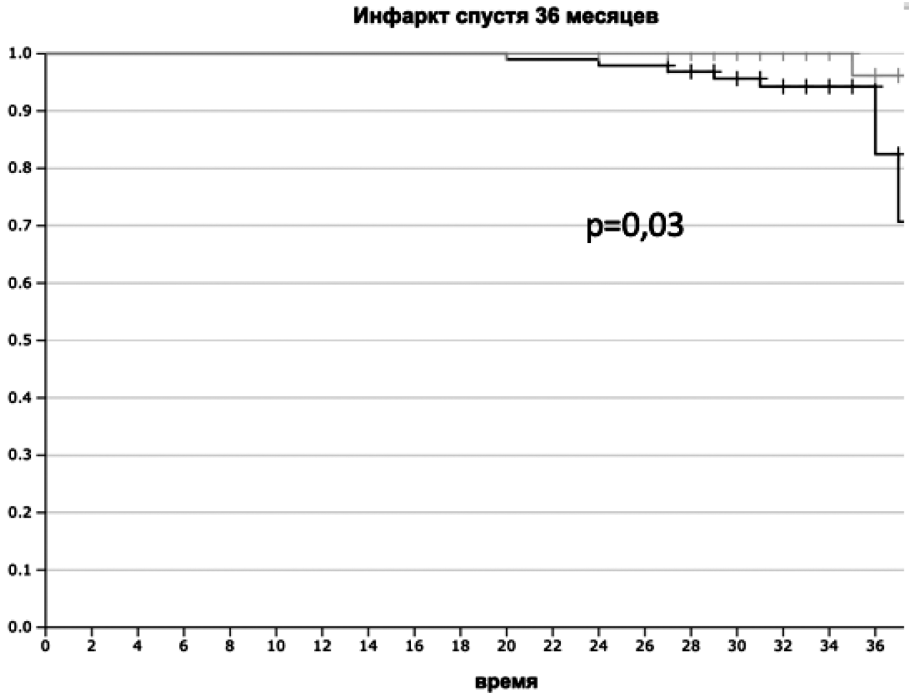
Comparisons

	Test Statistic	df	p-value
Logrank test	4.17435	1	0.04104
Gehan-Breslow-Wilcoxon	4.79153	1	0.02860
Tarone-Ware	5.15599	1	0.02317

Hazard ratios (Событие)

	HR	Std Err	LCL (95%)	UCL (95%)
"1" / "2"	0.42539	0.41970	0.18687	0.96835
"2" / "1"	2.35080	0.41970	1.03269	5.35134

Рис. 5. Развитие больших кардиальных и церебральных осложнений (БКЦО) спустя 36 месяцев (Примечание: черным цветом указана первая группа, серым — вторая)



Comparisons

	Test Statistic	df	p-value
Logrank test	4.55929	1	0.03274
Gehan-Breslow-Wilcoxon	4.44877	1	0.03493
Tarone-Ware	4.14519	1	0.04175

Hazard ratios (Событие)

	HR	Std Err	LCL (95%)	UCL (95%)
"1" / "2"	6.83470	0.63845	1.95554	23.88754
"2" / "1"	0.14631	0.63845	0.04186	0.51137

Рис. 6. Развитие инфаркта миокарда спустя 36 месяцев
(Примечание: черным цветом указана первая группа, серым — вторая)

сенных ишемических инсультов отмечались исключительно у пациентов из 2 группы (p=0,0006).

При оценке эпизодов летальности от БКЦО между 1 и 2 группами не было выявлено достоверных отличий, несмотря на то что оба летальных случая отмечались во 2 группе (p=0,11).

Обсуждение

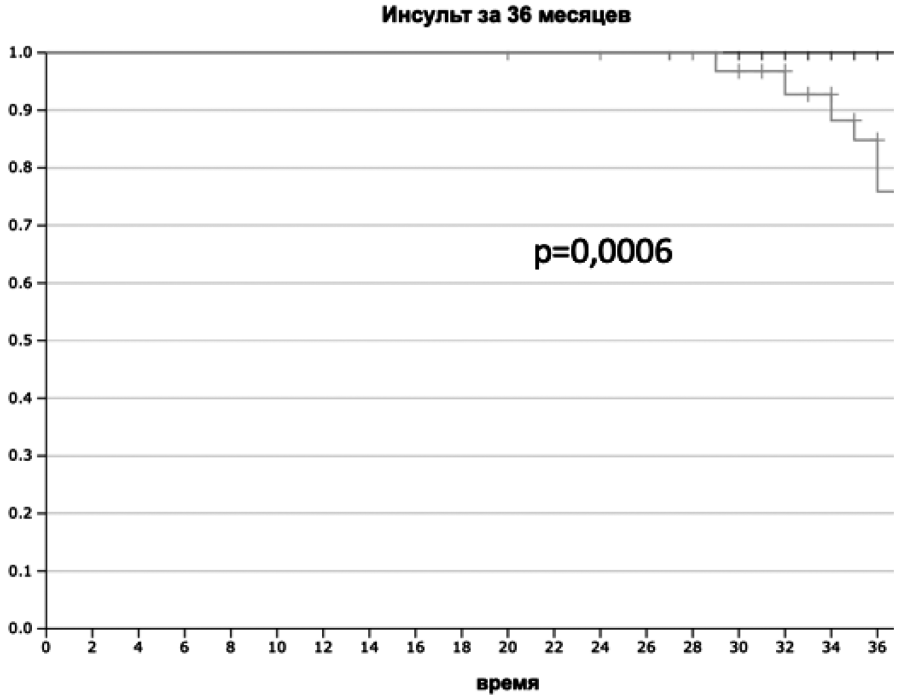
Ангиографический успех стентирования внутренней сонной артерии (ВСА) был практически абсолютным (99,6 %), что свидетельствует о высокой эффективности метода. Различия между группами (первая группа — 99,2 %, вторая — 100 %) были статистически незначимы (p=0,429). Это подтверждает, что независимо от порядка проведения процедур (сначала стентирование или другие операции), результаты сопоставимы. Небольшая разница во времени выполнения процедуры между группами (42,9 и 44,2 минуты) также не оказалась значимой, что говорит о стабильности технического исполнения.

Использование контрастного вещества:

Применение технологии «Roadmap» позволило существенно сократить объём контраста (с 65 мл до 34,8 мл), что важно с точки зрения безопасности пациентов, особенно с коморбидной почечной патологией. Это значительное снижение объёма контрастного вещества (p<0,001) свидетельствует о прогрессе в методиках визуализации, что может уменьшить риск контраст-индуцированной нефропатии.

Осложнения и неврологические исходы:

Различия в частоте инсультов между группами были минимальны (2,3 % в первой группе и 3,3 % во второй группе) и статистически недостоверны (p=0,462). Это говорит о том, что независимо от подхода к лечению, риск инсульта после стентирования остаётся низким. Частота транзиторных ишемических атак (ТИА) была выше во второй группе (9,9 % против 7 %), но не достигла статистической значимости. Это может указывать



Comparisons

	Test Statistic	df	p-value
Logrank test	11.63255	1	0.00065
Gehan-Breslow-Wilcoxon	11.03004	1	0.00090
Tarone-Ware	10.02522	1	0.00154

Hazard ratios (Событие)

	HR	Std Err	LCL (95%)	UCL (95%)
"1" / "2"	0.00000	0.67166	#N/A	#N/A
"2" / "1"	Inf	0.67166	#N/A	#N/A

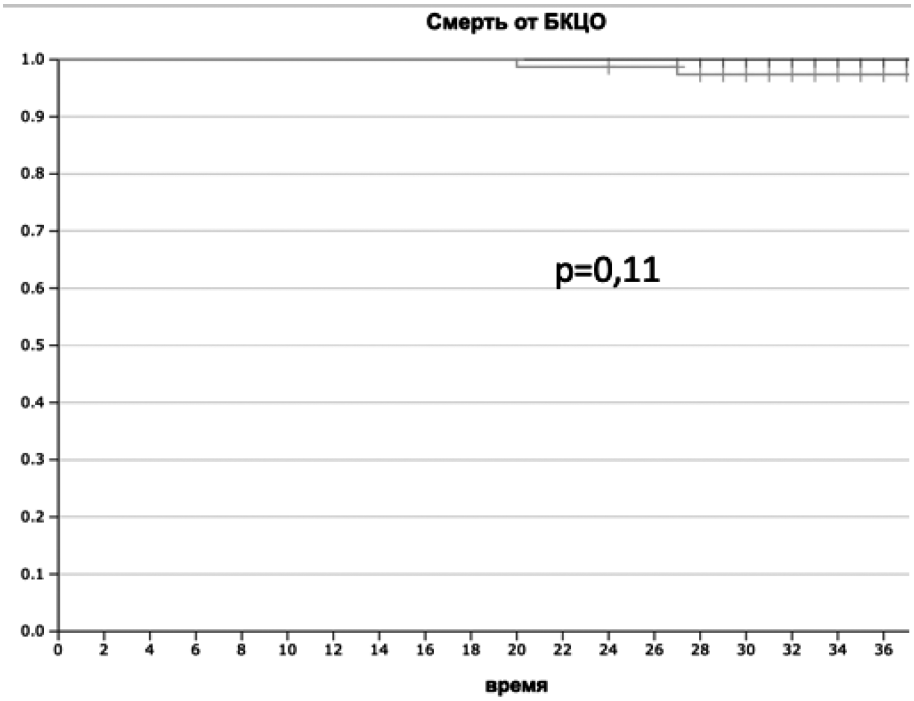
Рис. 7. Развитие инсульта спустя 36 месяцев
(Примечание: серым цветом указана вторая группа)

на некоторую предрасположенность пациентов второй группы к неврологическим осложнениям, хотя это требует дополнительного анализа. Примечательно, что частота ишемических сердечных осложнений (например, стенокардия) была значительно выше в первой группе (13,2 % против 4,1 %, p <0,05), что может говорить о преимуществах комбинации стентирования с реваскуляризацией в два этапа для предотвращения сердечных осложнений. Все вышеописанные результаты находят свое отражение в данных мировой литературы и могут быть расценены как положительные, в особенности с учетом выраженного коморбидного фона у пациентов обеих групп [3,4,6]

Заключение

С развитием эндоваскулярной хирургии появились предпосылки к каротидной ангиопластике и стентированию (КАС). Методика КАС разрабатывалась как альтернатива КЭАЭ, особенно для пациентов с высоким хирургическим риском. Современные технологии позволили в значительной мере оптимизировать техническую и методическую сторону выполнения стентирования ВСА, в связи с чем необходимо проведение новых крупных, рандомизированных исследований с целью переоценки результативности эндоваскулярной стратегии лечения [7,9,10,11].

В рамках данного анализа продемонстрированно, что метод этапной коррекции каротидной и кардиальной патологии с использованием эндоваскулярных технологий является безопасным и эффективным. Представленные стратегии этапного эндоваскулярного лечения поражения ВСА и коррекции кардиальной патологии являются эффективными и безопасными и не отличаются от стандартных результатов изолированного стентирования ВСА.



Comparisons

	Test Statistic	df	p-value
Logrank test	2.50295	1	0.11363
Gehan-Breslow-Wilcoxon	2.48818	1	0.11470
Tarone-Ware	2.48729	1	0.11477

Hazard ratios (Событие)

	HR	Std Err	LCL (95%)	UCL (95%)
"1" / "2"	0.00000	1.42312	#N/A	#N/A
"2" / "1"	Inf	1.42312	#N/A	#N/A

Рис. 8. Смерть от БКЦО
(Примечание: черным цветом указана первая группа , серым — вторая)

ЛИТЕРАТУРА

1. Vasu Saini., Luis Guada., Dileep R., Yavagal. Global Epidemiology of Stroke and Access to Acute Ischemic Stroke Interventions Neurology Nov 2021, 97 (20 Supplement 2) S6-S16; DOI: 10.1212/WNL.0000000000012781.
2. Massop D., Dave R., Metzger C., Bachinsky W., Solis M., Shah R. et al. SAPPHIRE Worldwide Investigators. Stenting and angioplasty with protection in patients at high-risk for endarterectomy: SAPPHIRE Worldwide Registry first 2,001 patients. Catheter Cardiovasc Interv. 2009 Feb 1;73(2):129–36. DOI: 10.1002/ccd.21844. PMID: 18924164.
3. Matsumura J.S., Hanlon B.M., Rosenfield K., Voeks J.H., Howard G., Roubin G.S. et al. Treatment of carotid stenosis in asymptomatic, nonoctogenarian, standard risk patients with stenting versus endarterectomy trials. J Vasc Surg. 2022 Apr;75(4):1276–1283.e1. DOI: 10.1016/j.jvs.2021.10.020. Epub 2021 Oct 22.
4. Ohman E.M., Bhatt D.L., Steg P.G., Goto S., Hirsch A.T., Liau C.S. et al. REACH Registry Investigators. The REduction of Atherothrombosis for Continued Health (REACH) Registry: an international, prospective, observational investigation in subjects at risk for atherothrombotic events-study design. Am Heart J. 2006 Apr;151(4): 786. e1-10. DOI: 10.1016/j.ahj.2005.11.004. PMID: 16569533.
5. Алекян Б.Г., Бокерия Л.А., Голухова Е.З., Петросян К.В., Дарвиш Н.А., Махалдиани Б.З. Непосредственные и отдаленные результаты стентирования и каротидной эндартерэктомии у пациентов с атеросклеротическим поражением внутренней сонной артерии. Эндоваскулярная хирургия. 2021; 8 (1): 27–36. DOI: 10.24183/2409-4080-2021-8-1-27–36.
6. Bassan F., Azevedo V.P., Santos AP., Mello R.B., Verdolin A.A., Bassan R. Comparison Between Treatment Strategies of Carotid Stenosis in Patients Undergoing Coronary Artery Bypass Grafting. Braz J Cardiovasc Surg. 2022 May 23;37(3):315–320. DOI: 10.21470/1678-9741-2020-0425. PMID: 35605216; PMCID: PMC9162424.
7. Бокерия Л.О., Работников В.С., Алшибая М.М., Сигаев И.Ю. Сочетанные операции АКШ и КЭАЭ монография.
8. Мусаев М.К., Скопин И.И., Дарвиш Н.А., Абдуллаев Р.Г. Сравнительный анализ хирургического лечения больных с сочетанным поражением коронарных и брахиоцефальных артерий Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН. Сердечно-сосудистые заболевания. 2024. Т. 25. № 1. С. 1–10.

9. Петросян К.В., Юлдашев Ф.Ш. Использование внутрисосудистого ультразвукового исследования при стентировании общей сонной артерии у пациентки с бикаротидным поражением. Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. 2022. Т. 64. № 5. С. 554–559.
10. Голухова Е.З.. Отчет о научной и лечебной работе Национального медицинского исследовательского центра сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева Минздрава России за 2022 год и перспективы дальнейшего развития Центра. Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН. 2023; Спецвыпуск (24): 5–121. DOI: 10.24022/1810–0694–2023-24S
11. Мусаев М.К., Магамматов А.А., Мусалов А.Ю., Дарвиш Н.А., Волчкова А.А. Эндоваскулярное вмешательство при осложненной эндартерэктомии из сонной артерии. Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН. 2022; 2 (23): 230–235. DOI: 10.24022/1810–0694-2022-23-2-230-235.

© Петросян Карен Валерьевич (dr.petrosian@gmail.com); Юлдашев Фаридун Шомуротович (faridun.yuldashev@mail.ru);
Дадабаев Гуламжан Мураджанович (dgmed83_83@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.37

РЕМОДЕЛИРОВАНИЕ ПРАВЫХ ОТДЕЛОВ СЕРДЦА У ПАЦИЕНТОВ С ХРОНИЧЕСКОЙ ТРОМБОЭМБОЛИЧЕСКОЙ ЛЕГОЧНОЙ ГИПЕРТЕНЗИЕЙ ПО ДАННЫМ ЭХОКАРДИОГРАФИИ ПОСЛЕ БАЛЛОННОЙ АНГИОПЛАСТИКИ ВЕТВЕЙ ЛЕГОЧНЫХ АРТЕРИЙ

REMODELING OF THE RIGHT HEART IN PATIENTS WITH CHRONIC THROMBOEMBOLIC PULMONARY HYPERTENSION ACCORDING TO ECHOCARDIOGRAPHY AFTER BALLOON ANGIOPLASTY OF THE BRANCHES OF THE PULMONARY ARTERIES

B. Sagymbaev
A. Vaneeva
K. Petrosyan

Summary. This article presents the results of a retrospective-prospective study aimed at assessing the reverse remodeling of the right heart chambers in patients with chronic thromboembolic pulmonary hypertension (CTEPH) following balloon pulmonary angioplasty (BPA). The study included echocardiographic data from 146 patients aged 27 to 80 years during the long-term follow-up period after the intervention (observation up to 55.2 months). The obtained results demonstrated significant improvement in right ventricular (RV) systolic function (increase in RV FAC from 32 % to 37 %, TAPSE from 13 to 18 mm) and reduction of its dilation (decrease in RV end-diastolic dimension from 4.8 to 4.1 cm). A reduction in right atrial size and restoration of left ventricular geometry due to normalization of interventricular septal position were also noted. The results confirm that the assessment of changes in right heart geometry using echocardiography should be an integral part of monitoring the effectiveness of BPA in patients with CTEPH.

Keywords: right heart geometry, chronic thromboembolic pulmonary hypertension, balloon pulmonary angioplasty, ultrasound imaging.

Сагымбаев Байзак Абдрасулович
врач, ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева
sagymbaevbaizak@gmail.com
Ванеева Анна Муратовна
врач, научный сотрудник, ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева
Amvaneeva@bakulev.ru
Петросян Карен Валерьевич
доктор медицинских наук, врач, ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева
dr.petrosian@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты ретроспективно-проспективного исследования, направленного на оценку обратного ремоделирования правых отделов сердца у пациентов с хронической тромбоэмболической легочной гипертензией (ХТЭЛГ) после транслюминальной баллонной ангиопластики легочных артерий (ТЛБАП). В исследование включены данные эхокардиографического обследования 146 пациентов в возрасте от 27 до 80 лет в отдаленном периоде после вмешательства (наблюдение до 55,2 месяцев). Полученные результаты продемонстрировали значительное улучшение систолической функции правого желудочка (рост ФИП ПЖ с 32 % до 37 %, TAPSE с 13 до 18 мм) и уменьшение его дилатации (снижение КДР ПЖ с 4,8 до 4,1 см). Также отмечено уменьшение размеров правого предсердия и восстановление геометрии левого желудочка за счет нормализации положения межжелудочковой перегородки. Результаты подтверждают, что оценка изменений геометрии правых отделов сердца по данным эхокардиографии должна быть неотъемлемой частью мониторинга эффективности ТЛБАП у пациентов с ХТЭЛГ.

Ключевые слова: геометрия правых отделов сердца, хроническая тромбоэмболическая легочная гипертензия, транслюминальная баллонная ангиопластика, ультразвуковое исследование.

Введение

Хроническая тромбоэмболическая легочная гипертензия (ХТЛГ) является серьезным заболеванием, характеризующимся стойким повышением давления в легочной артерии и развитием прогрессирующей правожелудочковой недостаточности, вследствие неполной резорбции тромботических масс в легочных артериях после острого эпизода тромбоэмболии легочной артерии (ТЭЛА). По данным различных исследований, ХТЭЛГ развивается у 0,5–4 % пациентов, перенесших ТЭЛА, что делает эту патологию значимой проблемой для здравоохранения [1-5].

Диагностика и лечение ХТЭЛГ представляют собой непростую задачу. Традиционно основным методом лечения проксимальных поражений ветвей легочной артерии является хирургическая тромбэндартерэктомия легочных артерий (ТЭЭЛА) [6,7]. Однако, значительная часть пациентов не является кандидатами на хирургическое вмешательство по различным причинам, включая высокие операционные риски, анатомические особенности тромботических поражений и наличие сопутствующих заболеваний. В таких случаях баллонная ангиопластика (ТЛБАП ЛА) ветвей легочной артерии становится важной альтернативой, обеспечивающей улучшение перфузии легочной ткани и снижение давления в легочной артерии [8, 9,10].

Несмотря на растущее применение ТЛБАП ЛА в лечении ХТЛГ, влияние этой процедуры на геометрию и функцию правых отделов сердца остается недостаточно изученным. Правые отделы сердца играют ключевую роль в патофизиологии ХТЭЛГ, и изменения их структуры и функции имеют прямое влияние на клиническое состояние пациентов и их прогноз. Эхокардиография является основным методом визуализации, позволяющим оценивать качественно и количественно морфофункциональные и гемодинамические характеристики правых камер сердца. Изучение изменений геометрии правых отделов сердца после ТЛБАП ЛА у пациентов с ХТЭЛГ имеет важное значение для понимания механизма действия процедуры, оптимизации тактики лечения и улучшения исходов для пациентов. Таким образом, данное исследование направлено на комплексную оценку этих изменений с использованием эхокардиографических методов, что позволит расширить знания в данной области и разработать рекомендации по ведению пациентов с ХТЛГ после ТЛБАП ЛА.

Материал и методы

Для оценки геометрии правых отделов сердца проведен ретроспективно-проспективный анализ эхокардиограмм, выполненных 146 пациентам в возрасте от 27–80 (51,5±13,1) лет в НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева с июля 2015 по январь 2023 г. Пациентов женского пола было 90 (61,6 %). Продолжительность заболевания составляла в среднем 22,2 месяца, однако стандартное отклонение (28,8) свидетельствует о значительном разбросе данных. Среди сопутствующих заболеваний с наибольшей частотой встречались артериальная гипертензия — 14,9 % (n=22), тромбофлебит нижних конечностей — 12,9 % (n=19) и тромбоз глубоких вен — 10,9% (n=16) (табл. 1). Протокол обследования до и после операции у всех пациентов включал: опросник SF-36, тест 6-минутной ходьбы (Т6МХ), эхокардиографию, катетеризацию правых отделов сердца и компьютерную томографию.

Средний срок наблюдения за пациентами в отдалённом периоде составил 17,7 ± 7,56 месяцев для 111 пациентов, наблюдение за которыми длилось до 36 месяцев, и 55,2 ± 15,8 месяцев для 33 пациентов, чей период наблюдения превысил 36 месяцев.

Таблица 1.

Характеристика пациентов, включенных в исследование

Показатели	Перед операцией
Возраст, (полных лет)	27–80 (51,5 ±13.1)
Пол мужской, абс. (%) женский, абс. (%)	 56 (38) 90 (61,2)
Сопутствующая патология	
Тромбофлебит нижних конечностей, абс. (%)	19(12,9)
Тромбоз глубоких вен, абс. (%)	16 (10,9)
Варикоз нижних конечностей. абс. (%)	11 (7,5)
COVID-19, абс. (%)	8 (5,5)
Фибрилляция предсердий, абс. (%)	4 (2,7)
Трепетания предсердий, абс. (%)	4 (1,4)
Артериальная гипертензия, абс. (%)	22 (14,9)
Ишемическая болезнь сердца, абс. (%)	9 (6,1)
Бронхолегочные заболевания, абс. (%)	9 (6,1)
Онкологические заболевания, абс. (%)	9 (6,1)
Гастрит, абс. (%)	5 (3,4)
Перелом н/к абс. (%)	1 (0,7)
ФК по NYHA II, абс (%)	54 (36,7)
ФК по NYHA III, абс (%)	86 (58,4)
ФК по NYHA IV, абс (%)	6 (4)

Критерии формирования исследуемой группы:

В исследование включались пациенты в возрасте от 18 лет с верифицированным диагнозом хронической тромбоэмболической легочной гипертензии (ХТЭЛГ), предоставившие информированное добровольное согласие на участие.

Критериями исключения из исследования служили: возраст моложе 18 лет, беременность, наличие онкотромбоэмболий, а также выраженная почечная недостаточность (скорость клубочковой фильтрации <30 мл/мин). Дополнительными критериями исключения являлись аллергические реакции или индивидуальная непереносимость контрастных веществ и гепарина в анамнезе, острые воспалительные процессы любой этиологии

и выявление тромбоэмболических масс в основных ветвях легочной артерии.

Все участники исследования были сопоставимы по основным функциональным и гемодинамическим показателям.

Эхокардиографический анализ

Пациентам проводилось трансторакальное эхокардиографическое исследование до операции и в отдаленном периоде после операции с использованием ультразвуковой системы VIVID 7 (GE), Affinity 70 (PHILIPS) с датчиками 5Ms и S5-1, соответственно. Все эхокардиографические исследования выполнялись двумя специалистами по кардиовизуализации, имеющими опыт оценки кардиохирургических пациентов.

Для оценки морфологических и функциональных параметров левого и правого желудочков, а также правого и левого предсердий эхокардиографическое исследование выполняли и интерпретировали в соответствии с рекомендациями ASE и EACVI от 2015 года, а также внутреннему протоколу Центра [1]. Измерения размеров и объёмов камер сердца, показателей систолической функции, а также параметров ремоделирования проводили из стандартизированных плоскостей и временных фаз сердечного цикла, при необходимости значения индексировали на площадь поверхности тела. Качественную и количественную оценку отклонений от нормы выполняли на основании референсных диапазонов и порогов градации степени выраженности, приведённых в указанных рекомендациях.

По результатам трансторакальной эхокардиографии вероятность наличия у данного пациента ЛГ оценивалась как низкая, средняя или высокая в зависимости от пиковой скорости потока ТР и наличия дополнительных ЭхоКГ-признаков со стороны желудочков сердца, ЛА, а также НПВ и ПП.

Измерение максимальной скорости потока трикуспидальной регургитации (ТР) проводилось в режиме непрерывного допплеровского картирования, используя апикальную четырехкамерную проекцию, парастернальную длинную ось ПЖ.

Пиковая скорость ТР в покое > 2,8 м/с при наличии двух дополнительных ЭхоКГ-признаков предполагала ЛГ (при отсутствии обструкции выносящего тракта ПЖ). К таким признакам относили: увеличение ПЖ (например, базальный диаметр ПЖ больше базального диаметра ЛЖ), патологический индекс эксцентричности ЛЖ (>1,1), среднесистолическая «выемка» («notching») допплеровского сигнала в ВОПЖ, конечнодиастолическая скорость лёгочной регургитации > 2,2 м/с или признаки повышенного давления в правом предсердии: диаметр нижней полой вены > 2,1 см или площадь правого предсердия > 18 см^2.

Индекс эксцентричности ЛЖ рассчитывали, как отношение септально-латерального измерения (перпендикулярное межжелудочковой перегородке) к переднезаднему (параллельное межжелудочковой перегородке) в парастернальной позиции по короткой оси на уровне папиллярных мышц в конец сиситолы.

Систолическое давление в правом желудочке оценивали по пиковой скорости струи трикуспидальной регургитации с использованием упрощенного уравнения Бернулли и добавлением этого значения к давлению в правом предсердии, определенному по диаметру НПВ и ее реакции на фазы дыхания. В зависимости от комбинации этих параметров, предполагаемое давление в правом предсердии составляло 5–20 мм рт. ст. [12]. Диаметр нижней полой вены измерялся из субкостального доступа.

Таблица 2.

Характеристики интраоперационных данных

В зависимости от типов поражений ЛА при ХТЭЛГ					
Тип поражения	A	B	C	D	E
Описание поражения	Концентрическое сужение	Паучье гнездо	Субокклюзия	Окклюзия с престенотическим расширением	Дистальные извитые поражения мелких сосудов
Общее количество	281 (51,09 %)	189 (34,3 %)	38 (6,91 %)	41 (7,45 %)	1 (0,18 %)
Успех вмешательство	281 (100 %)	184,65 (97,7 %)	32,8 (86,35 %)	37,52(91,5 %)	—
Осложнения	—	—	—	—	—
Травма проводником/ перфорация	—	1 (0,53 %)	1 (2,63 %)	—	—
Диссекция сосуда	—	2 (1,06 %)	2 (5,26 %)	—	—

Статистический анализ

Для статистической обработки полученных данных применялась программа SPSS версии 26 (IBM, США). Также для работы с данными использовались программы из пакета Microsoft Office 365. В анализе результатов использовались следующие статистические методы: U-тест Манна-Уитни для сравнения независимых выборок, t-критерий Стьюдента для проведения анализа статистической значимости различий признаков в независимых и зависимых выборках, критерий Краскела — Уоллиса для непараметрической оценки различий, а также корреляционный анализ с использованием критерия Пирсона.

Таблица 3.

Сравнение эхокардиографических данных до и после операции

Показатель, Me [IQR]	До операции	После операции	p
ЛП (2D), мл/м^2	38,0 [35,0–41,0]	37,0 [34,5–42,5]	0,027
КСР ЛЖ, см	2,80 [2,50–3,20]	2,9 [2,6–3,2]	0,101
КДР ЛЖ, см	4,50 [4,0–5,0]	4,8 [4,2–5,1]	0,001
КДО ЛЖ инд., мл/м^2	49,2 [40,8–66,7]	60,3 [46,0–71,3]	0,023
КСО ЛЖ инд., мл/м^2	16,7 [12,7–23,9]	18,1 [14,2–23,0]	0,785
УО абс., мл	57,9 [50,0–76,2]	75,1 [56,6–86,0]	0,035
ФВ ЛЖ(2D), %	66,0 [61,2–-69,0]	65,2 [60,0–70,0]	0,528
Индекс эксцентричности ЛЖ	1,15 [1,07–1,22]	1,07 [1,03–1,18]	0,046
ПП (поперечный диаметр), см	5,27 [4,50–6,10]	4,85 [4,00–5,50]	<0,001
ПП (продольный диаметр), см	5,80 [5,00–6,60]	5,10 [4,60–6,05]	<0,001
Площадь ПП, см^2	24,01 [17,67–31,62]	19,43 [14,45–26,13]	<0,001
КДР ПЖ, мм	4,80 [4,30–5,50]	4,10 [3,80–4,80]	<0,001
КДП ПЖ инд., см^2/м^2	18,45 [14,9–25,0]	14,21 [12,00–19,84]	<0,001
TAPSE (2D), мм	13,0 [12,5–16,0]	18,0 [16,0–19,0]	0,003
S`, см/с	7,2 [6,7–8,9]	10,0 [8,9–10,6]	<0,001
ФИП ПЖ, %	32 [28,0–35,0]	37 [33,0–40,0]	<0,001
Систолическое давление ПЖ, мм рт.ст.	69 [46–90]	46 [34–62]	0,002
Диаметр ЛА, мм	35,0 [30,0–39,0]	35,0 [29,0–39,0]	0,944
ФК ТК, мм	38,0 [34,0–41,0]	36,0 [33,0–39,0]	0,008
Т6МХ, м	328,3 [234,2–422,4]	430 [320–532]	<0,001

КДО инд. — индексированный к ППТ конечный диастолический объем;

КСО инд. — индексированный к ППТ конечный систолический объем;

КДП ПЖ инд.— индексированная к ППТ конечная диастолическая площадь правого желудочка;

КДР ПЖ — конечный диастолический размер;

Т6МХ — тест 6-минутной ходьбы

ФИП ПЖ — фракционное изменение площади правого желудочка

(ФИП ПЖ % = ФВ ПЖ — 10)

S` — систолическая скорость латерального сегмента кольца трикуспидального клапана

TAPSE — систолическая экскурсия плоскости кольца трикуспидального клапана

* — изменения показателей статистически значимы (p <0,05).

Динамика геометрии и функции правого желудочка

Наблюдалось статистически значимое уменьшение дилатации размеров правого желудочка. Конечный диастолический размер (КДР) ПЖ уменьшился с 4,80 см [4,30–5,50] до 4,10 см [3,80–4,80] (p <0,001), а индексированная конечная диастолическая площадь ПЖ (КДП ПЖ инд.) уменьшилась с 18,45 см^2/м^2 [14,9–25,0] до 14,21 см^2/м^2 [12,00–19,84] (p <0,001).

Параллельно зафиксировано значительное улучшение систолической функции ПЖ. Фракционное измене-

ние площади правого желудочка увеличилось с 32 % до 37 % (p = 0,001), а показатели TAPSE и S` с 13,0 мм [12,5–16,0] до 18,0 мм [16,0–19,0] (p = 0,003) и с 7,2 см/с [6,7–8,9] до 10,0 см/с [8,9–10,6] (p <0,001) соответственно.

Динамика геометрии правого предсердия

Анализ данных выявил статистически значимое уменьшение размеров правого предсердия после проведенного вмешательства. Поперечный диаметр ПП снизился с 5,27 см [4,50–6,10] до 4,85 см [4,00–5,50] (p<0,001). Продольный диаметр ПП уменьшился с 5,80 см [5,00–6,60] до 5,10 см [4,60–6,05] (p <0,001). Площадь правого предсердия уменьшилась с 24,01 см^2 [17,67–31,62] до 19,43 см^2 [14,45–26,13] (p <0,001).

Динамика показателей левого желудочка

Было отмечено изменение геометрии левого желудочка, выразившееся в увеличении его конечно-диастолического размера (КДР ЛЖ) с 4,50 см [4,0–5,0] до 4,80 см [4,2–5,1] (p = 0,001), индексированного конечно-диастолического объема (КДО ЛЖ инд.) с 49,2 мл/м^2 [40,8–66,7] до 60,3 [46,0–71,3] (p = 0,023), а так же индекса эксцентричности левого желудочка с 1,15 [1,07–1,22] до 1,05 [1,00–1,10]. При этом фракция выброса левого желудочка и индексированный конечно-систолический объем значимо не изменились (p> 0,05), что свидетельствует о восстановлении нормальной геометрии ЛЖ за счет уменьшения его компрессии со стороны дилатированного ПЖ.

Таким образом, полученные данные убедительно свидетельствуют о положительном обратном ремоделировании правых отделов сердца и улучшении их систолической функции в отдаленном периоде после успешной ТЛБАП у пациентов с ХТЭЛГ. Визуальная динамика ключевых эхокардиографических параметров представлена на рисунках 1–3 и итоговом графике.

Обсуждение

Проведенное исследование демонстрирует, что транслюминальная баллонная ангиопластика легочных артерий приводит к значимому обратному ремоделированию правых отделов сердца, которое подтверждается данными эхокардиографии в отдаленном периоде наблюдения (в среднем до 55,2 месяцев для части когорты).

Полученные нами результаты согласуются с данными современных исследований, подтверждающих, что снижение легочного сосудистого сопротивления после успешной ТЛБАП является ключевым фактором, запускающим процесс обратного ремоделирования ПЖ [11,12]. Уменьшение конечного диастолического размера и объема ПЖ, которое мы наблюдали, объективно отражает снижение преднагрузки и дилатации желудочка. Важно отметить, что регресс гипертрофии и дилатации ПЖ происходил на фоне значительного улучшения его систолической функции, что подтверждается ростом фракции выброса ПЖ и такого надежного маркера продольной функции, как TAPSE [1].

Особого внимания заслуживает динамика показателей левого желудочка. Наблюдавшееся увеличение КДР и КДО ЛЖ при сохранной фракции выброса, на наш взгляд, является прямым следствием изменения отклонения межжелудочковой перегородки вправо. При высокой ЛГ дилатированный и гипертрофированный ПЖ вызывает смещение перегородки в сторону ЛЖ, что приводит к его диастолической дисфункции и уменьшению конечно-диастолического объема («эффект компрессии») [2]. После ТЛБАП снижение давления в ПЖ позволяет перегородке занять нейтральное положение, что восстанавливает диастолическое наполнение ЛЖ и, как следствие, увеличивает его ударный объем, что мы и зафиксировали в нашем исследовании. Этот факт имеет важное клиническое значение, так как улучшение наполнения ЛЖ напрямую влияет на сердечный выброс и перфузию органов.

Зафиксированное уменьшение размеров правого предсердия является закономерным следствием разгрузки ПЖ и снижения давления его наполнения. Поскольку ПП служит «барометром» давления в правых отделах сердца, его уменьшение косвенно свидетельствует об улучшении диастолической функции ПЖ и снижении среднего давления в правом предсердии [3].

Положительные изменения эхокардиографических параметров в нашем исследовании коррелируют с данными об улучшении клинического статуса пациентов (улучшение функционального класса, увеличение дистанции 6-минутной ходьбы), что подчеркивает не только статистическую, но и клиническую значимость полученных результатов.

Несмотря на современные возможности эхокардиографии, такие как методика спекл-трекинг, трехмерная эхокардиография, применение базовых алгоритмов оценки анатомии и функции ПЖ актуальны и широко применяются в повседневной кардиохирургической и кардиологической практике. В нашем исследовании продемонстрировано их полезность у пациентов с ТТЭЛГ для мониторирования эффективности лечения.

Ограничения исследования. Настоящее исследование имеет ряд ограничений. Его обсервационный дизайн (ретроспективно-проспективный) не позволяет полностью исключить влияние смещающих факторов. Для части пациентов отсутствовали данные МРТ сердца, которое считается «золотым стандартом» для оценки объ-

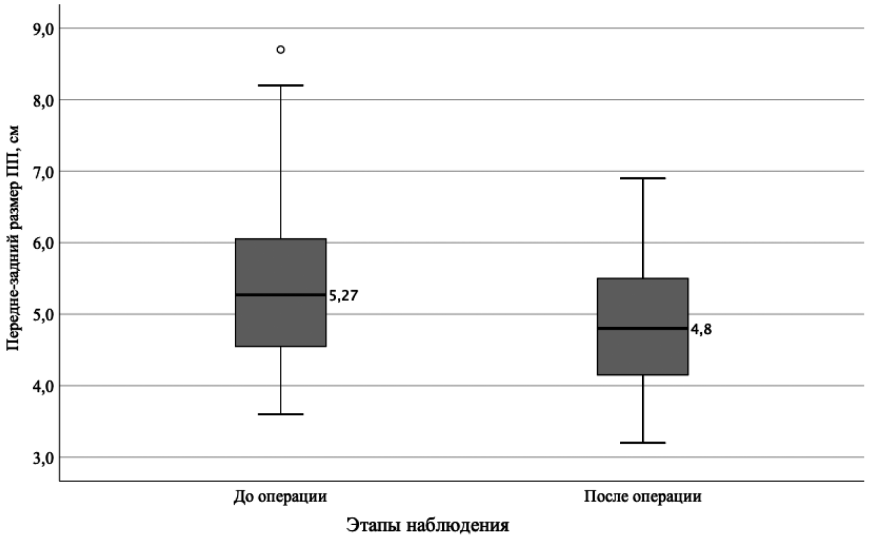


Рис. 1. Анализ динамики эхокардиографического значения продольных размеров правого предсердия

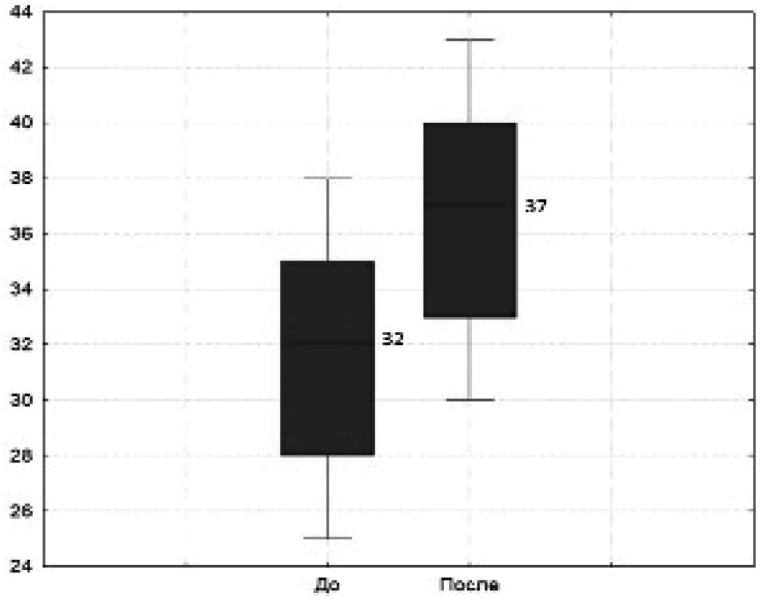


Рис. 2. Анализ динамики эхокардиографического значения фракционного изменения площади правого желудочка

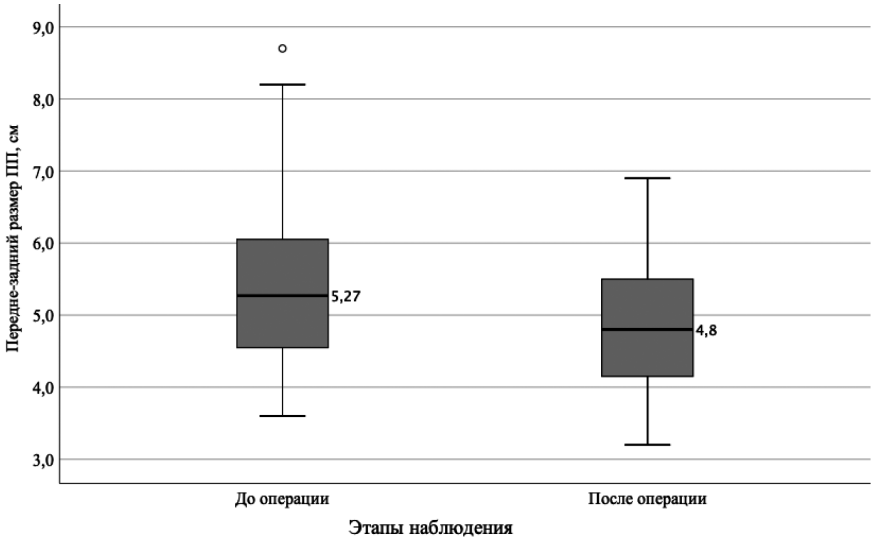


Рис. 3. Анализ динамики эхокардиографического значения систолической экскурсии кольца трикуспидального клапана (TAPSE)

емов и функции ПЖ. Однако рутинная эхокардиография остается широкодоступным и воспроизводимым методом для динамического наблюдения.

Заключение

Результаты нашего исследования убедительно доказывают, что ТЛБАП приводит к выраженному обратному ремоделированию правых отделов сердца, которое сохраняется в отдаленном периоде. Комплексная эхокардиографическая оценка, включающая анализ размеров, объемов и систолической функции ПЖ и ПП, должна быть обязательным компонентом мониторинга эффективности лечения и определения прогноза у пациентов с ХТЭЛГ после баллонной ангиопластики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lang I.M., Madani M. Update on chronic thromboembolicpulmonary hypertension. Circulation 2014; 130:508–18.
2. Piazza G., Goldhaber S.Z. Chronic thromboembolicpulmonary hypertension. N Engl J Med 2011; 364:351–60.
3. Riedel M., Stanek V., Widimsky J., et al. Longterm follow-up of patients with pulmonary thromboembolism. Late prognosis and evolution of hemodynamic and respiratory data. Chest 1982; 81:151–8.
4. Hoeper M.M., Mayer E., Simonneau G., et al. Chronic thromboembolic pulmonary hypertension. Circulation 2006; 113:2011–20.
5. Cannon J.E., Su L., Kiely D.G., et al. Dynamic Risk Stratification of Patient Long-Term Outcome AfterPulmonary Endarterectomy: Results from the United Kingdom National Cohort. Circulation 2016; 133:1761–71.
6. Jenkins D., Madani M., Fadel E., et al. Pulmonary endarterectomy in the management of chronic thromboembolic pulmonary hypertension. Eur Respir Rev 2017; 26:160111.
7. Pepke-Zaba J., Delcroix M., Lang I., et al. Chronic thromboembolic pulmonary hypertension (CTEPH): results from an international prospectiveregistry. Circulation. 2011;124(18):1973–1981.
8. Humbert M., Kovacs G., Hoeper M.M., Badagliacca R., Berger R.M.F., Brida M., et al. 2022 ESC/ERS Guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension. Eur Heart J 2022; 43:3618–3731. doi: 10.1093/eurheartj/ehac237
9. Петросян К.В., Горбачевский С.В., Желави И.А., Соболев А.В., Дадабаев Г.М. Транслюминальная баллонная ангиопластика ветвей легочной артерии при лечении больных с хронической тромбоэмболической легочной гипертензией и высоким хирургическим риском (четырехлетний опыт). Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. 2020; 62 (4): 334–44. DOI: 10.24022/0236-2791-2020-62-4-334-344
10. Poch D.S, Mahmud E., Patel M., Papamatheakis D., Fernandes T., Kerr K., et al. Patient selection for balloon pulmonary angioplasty: six-year results from a high-volume PTE surgical center. Pulm Circ 2022;12: e12148. doi: 10.1002/pul2.12148.
11. Lang R.M., Badano L.P., Mor-Avi V., Afilalo J., Armstrong A., Ernande L. et al. Recommendations for Cardiac Chamber Quantification by Echocardiography in Adults: An Update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging. Journal of the American Society of Echocardiography. 2015;28(1):1–39. e14. DOI: 10.1016/j.echo.2014.10.003
12. Avdeev S.N., Aldashev A.A., Gorbachevskiy S.V., Edemskiy A.G., Karaskov A.M., Korobkova I.Z. et al. Pulmonary Hypertension. — M.: GEOTAR-Media;2015. — 416 p. [Russian: Авдеев С.Н., Алдашев А.А., Горбачевский С.В., Едемский А.Г., Караськов А.М., Коробкова И.З. и др. Легочная гипертензия. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2015. — 416с]. ISBN 978-5-9704-3323-2.

© Сагымбаев Байзак Абдрасулович (sagymbaevbaizak@gmail.com); Ванеева Анна Муратовна (Amvaneeva@bakulev.ru);
Петросян Карен Валерьевич (dr.petrosian@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.38

ВЛИЯНИЕ НЕСОСТОЯТЕЛЬНОСТИ КОЛОРЕКТАЛЬНОГО АНАСТОМОЗА НА ОТДАЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЛЕЧЕНИЯ: ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ДАННЫХ

THE IMPACT OF COLORECTAL ANASTOMOTIC LEAKAGE ON LONG-TERM TREATMENT OUTCOMES (REVIEW)

O. Sergeev

Summary. Colorectal anastomotic leak is one of the most serious complications of colorectal surgery, occurring in 3–20 % of cases. In addition to its impact on immediate outcomes, anastomotic leak significantly impacts long-term oncologic and functional outcomes. This review analyzes current data on the impact of colorectal anastomotic leak on survival rates, recurrence rates, functional outcomes, and patient quality of life. Anastomotic leak is associated with a 10–15 % reduction in 5-year overall survival, a 1.5–2-fold increase in local recurrence rates, and the development of low anterior resection syndrome in 60–80 % of patients. Adverse effects include delayed adjuvant therapy, inflammatory-induced tumor dissemination, and the development of fibrosis with pelvic dysfunction. Understanding the long-term consequences of anastomotic leakage is critical for improving surgical techniques, patient selection, and developing preventive measures.

Keywords: anastomotic leakage, colorectal cancer, long-term survival, local recurrence, quality of life, functional outcomes.

Сергеев Олег Маркович
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Волгоградский государственный медицинский университет
oleg.sersergeev@yandex.ru

Аннотация. Несостоятельность колоректального анастомоза является одним из наиболее серьезных осложнений колоректальной хирургии, встречающимся частотой 3–20 %. Помимо влияния на непосредственные исходы, несостоятельность анастомоза оказывает значительное воздействие на отдаленные онкологические и функциональные результаты. В данной обзоре проанализированы современные данные о влиянии несостоятельности колоректального анастомоза на показатели выживаемости, частоту рецидивов, функциональные исходы и качество жизни пациентов. Несостоятельность анастомоза ассоциирована со снижением 5-летней общей выживаемости на 10–15 %, увеличением частоты локальных рецидивов в 1,5–2 раза и развитием синдрома низкой передней резекции у 60–80 % пациентов. Негативного влияние обусловлено задержкой адъювантной терапии, воспалительно-индуцированной опухолевой диссеминацией и формированием фиброза с нарушением функции органов малого таза. Понимание долгосрочных последствий несостоятельности анастомоза критически важно для совершенствования хирургической техники, отбора пациентов и разработки профилактических мероприятий.

Ключевые слова: несостоятельность анастомоза, колоректальный рак, отдаленная выживаемость, локальный рецидив, качество жизни, функциональные результаты.

Введение

Несостоятельность колоректального анастомоза (НКРА) остается одним из наиболее грозных осложнений в хирургии рака прямой кишки [1, 2, 3]. Частота НКРА варьирует от 3–6 % при стандартных передних резекциях и до 10–20 % при низких передних резекциях прямой кишки, особенно высок риск при выполнении тотальной мезоректумэктомии (ТМЭ) [3, 4].

Долгое время внимание клиницистов фокусировалось на непосредственных последствиях НКРА: увеличении послеоперационной летальности (до 16–20 %), длительности госпитализации, необходимости повторных вмешательств и формировании стом [5]. Однако накапливающиеся данные свидетельствуют о значительном влиянии НКРА на отдаленные результаты лечения, выходящем далеко за рамки периоперационного периода [6].

Механизмы негативного влияния НКРА на отдаленные результаты лечения многообразны и включают системный воспалительный ответ, потенциальную диссеминацию опухолевых клеток, задержку или отмену адъювантной терапии, а также развитие фиброза и рубцовых изменений в области анастомоза [7, 8]. Понимание этих механизмов и их клинических последствий критически важно для оптимизации лечебной тактики.

Целью данной работы является изучение влияния несостоятельности швов колоректального анастомоза на отдаленные результаты лечения путем проведения обзора литературных данных.

Определение и классификация несостоятельности анастомоза

Отсутствие единого определения НКРА долгое время затрудняло сравнение результатов различных иссле-

дований. В 2010 году International Study Group of Rectal Cancer (ISREC) предложило стандартизированное определение НКРА, под которым подразумевался «дефект кишечной стенки в области анастомоза, включая шовную или скрепочную линию, линию резервуара при подвздошно-анальном анастомозе, приводящий к сообщению между внутри- и внепросветным пространством» [9].

Наиболее широко используется классификация ISREC для определения степени тяжести НКРА: **Grade A** — без клинических проявлений, требующая только наблюдения; **Grade B** — требующая активного терапевтического вмешательства без релапаротомии; **Grade C** — требующая релапаротомии [9]

Влияние на онкологические результаты

Общая выживаемость (ОВ). Мета-анализ Yang J. и соавторов (2023), включавший 35 исследований с 44,698 пациентами, показал значительное снижение 5-летней общей выживаемости у больных с НКРА (58.2 % против 71.4 %, p <0.001) [10].

Крупное популяционное исследование из Нидерландов (n=2095) продемонстрировало дозозависимый эффект: 5-летняя выживаемость составила 73 % у больных без НКРА, 65 % с НКРА grade B и 52 % при НКРА grade C [11].

Важно отметить, что негативное влияние НКРА на выживаемость сохраняется после коррекции на стадию заболевания, возраст и другие прогностические факторы. Kulu Y. и коллег (2022) на 570 пациентов подтвердил независимое влияние НКРА на выживаемость (HR 1.90; 95 % ДИ 1.17–3.09; p = 0.014) [12].

Безрецидивная выживаемость (БРВ). НКРА ассоциирована со снижением безрецидивной выживаемости. В многоцентровом исследовании Peltrini R et al., установлено снижение БРВ на 20 % у больных с НКРА (log-rank, p<0.001) [13].

Локальные рецидивы. НКРА особенно сильно влияет на частоту локальных рецидивов. При раке прямой кишки у пациентов с НКРА в течение 5 лет наблюдения было отмечено увеличение частоты местных рецидивов (13,3 % против 4,6 %; коэффициент риска 2,96; 95 % ДИ 1,38–6,34; p = 0,005) и снижение безрецидивной выживаемости (53,6 % против 70,9 %; коэффициент риска 1,67; 95% ДИ 1,16–2,41; p = 0,006) [14].

Временной анализ показывает, что большинство локальных рецидивов после НКРА развивается в первые 2 года (медиана 14 месяцев) [14].

Отдаленные метастазы. Данные о влиянии НКРА на отдаленное метастазирование противоречивы. Некоторые исследования показывают увеличение частоты метастазов в печень и легкие [15], другие не находят значимой связи [16]. Исследование Fujita и соавторов (2021) с использованием жидкой биопсии выявило увеличение циркулирующей опухолевой ДНК у пациентов с НКРА, что может объяснять повышенный риск метастазирования [17].

Механизмы негативного влияния на онкологические результаты

Задержка адъювантной химиотерапии. НКРА приводит к значительной задержке начала адъювантной химиотерапии (АХТ): Медиана времени до АХТ: 12 недель при НКРА против 6 недель без НКРА, задержка химиотерапии повышалась на 65 % [18]. Доля пациентов, получивших АХТ, составила 58 % у больных с НКРА против 78 % без НКРА [19]. Полную дозу АХТ получают только 42 % пациентов с НКРА против 71 % без НКРА [20]. Было показано, что задержка АХТ более 8 недель ассоциирована со снижением 5-летней выживаемости на 12 % независимо от других факторов [21].

Воспалительный ответ и опухолевая диссеминация. НКРА вызывает выраженный системный воспалительный ответ: повышение IL-6, TNF-α, VEGF в 3–5 раз [22]; активация матриксных металлопротеиназ [23]; подавление клеточного иммунитета [24]. Экспериментальные исследования показывают, что воспалительная среда способствует: эпителиально-мезенхимальному переходу опухолевых клеток [25], ангиогенезу и лимфангиогенезу [26], выживанию циркулирующих опухолевых клеток [27].

Локальная имплантация опухолевых клеток. Исследование Gertsch и коллег выявило жизнеспособные опухолевые клетки в перитонеальной жидкости у 23 % пациентов с НКРА против 3 % без НКРА [28]. Молекулярный анализ рецидивов после НКРА показал генетическое сходство с первичной опухолью в 87 % случаев, подтверждая теорию локальной имплантации [29].

Нарушение иммунного надзора. НКРА приводит к длительной иммуносупрессии: снижение CD4/CD8 соотношения сохраняется до 6 месяцев [30], увеличение регуляторных Т-клеток [31], подавление NK-клеточной активности [32].

Влияние на функциональные результаты и качество жизни

Синдром низкой передней резекции (СНПР). НКРА является сильнейшим предиктором развития СНПР. Исследование «LARS International Collaborative Group» показало наиболее высокую частоту СНПР у больных с НКРА (OR 3,12; 95 % ДИ 2,54–3,83) [33].

Аноректальная функция. Манометрические исследования выявляют значительные нарушения у больных с НКРА: уменьшение ректальной емкости, нарушение ректоанального рефлекса [34].

Мочеполовая дисфункция. НКРА ассоциирована с увеличением урогенитальных нарушений: эректильной дисфункцией, ретроградной эякуляцией, нарушением мочеиспускания, диспареунией у женщин [35].

Формирование стомы. Частота постоянной стомы после НКРА варьирует от 10 % до 56 % в зависимости от тяжести НКРА и локализации анастомоза: НКРА grade A —3–5 % постоянных стом; НКРА grade B —15–25 %; НКРА grade C —40–56 % [36].

Качество жизни. Исследование Marinatou и соавторов (2021) с использованием EORTC QLQ-C30 показало стойкое снижение после НКРА через 6 и 12 месяцев эмоциональной и социальной функции, а также общих показателей качества жизни [37].

Психологические последствия. Систематический обзор выявил высокую частоту психологических нарушений после НКРА: депрессия: 38 % против 18 % без НКРА; тревожное расстройство: 42 % против 22 %; посттравматическое стрессовое расстройство: 15 % против 4 %; страх рецидива рака: выше на 35 % [38].

Заключение

Несостоятельность колоректального анастомоза оказывает негативное глубокое влияние на отдаленные результаты лечения рака прямой кишки, выходящее далеко за рамки непосредственного послеоперационного периода. Накопленные данные убедительно демонстрируют негативное влияние НКРА на онкологические результаты со снижением показателей выживаемости на 10–15 % и увеличением риска локорегионарного рецидива почти в 2 раза. Не менее важными являются долгосрочные функциональные последствия НКРА. Развитие синдрома низкой передней резекции у большинства пациентов, высокая частота формирования постоянных стом и урогенитальная дисфункция значительно снижают качество жизни. Психологические последствия, включая депрессию и тревожные расстройства, часто недооцениваются, но требуют активного выявления и лечения.

Понимание масштаба отдаленных последствий НКРА подчеркивает критическую важность профилактики этого осложнения. При развившейся НКРА ранняя диагностика, адекватное лечение и комплексная реабилитация могут минимизировать отдаленные последствия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кит О.И., Геворкян Ю.А., Солдаткина Н.В., Колесников Е.Н., Харагезов Д.А., Колесников В.Е., Кожушко М.А. Аппаратный межкишечный анастомоз при колоректальном раке: непосредственные результаты. Колопроктология. 2016;(1):48–53. https://doi.org/10.33878/2073-7556-2016-0-1-48-53 [Kit O.I., Gevorkyan Yu.A., Soldatkina N.V., Kolesnikov E.N., Kharagezov D.A., Kolesnikov V.E., Kozhushko M.A. Stapling interintestinal anastomosis in colorectal cancer: short-term results. Koloproktologia. 2016;(1):48–53. (In Russ.) https://doi.org/10.33878/2073-7556-2016-0-1-48-53]
2. Ахметзянов Ф.Ш., Егоров В.И., Ахметзянова Ф.Ф. Ближайшие результаты внутрибрюшных резекций прямой кишки. Поволжский онкологический вестник. 2016;5(27):25–30. [Akhmetzyanov, F.Sh., Egorov V.I., Akhmetzyanova F.F. Immediate results of intra-abdominal rectal resections. Oncology Bulletin of the Volga region. 2016;5(27):25–30 (In Russ.)].
3. Балкаров А.А., Рыбаков Е.Г., Пономаренко А.А., Алексеев М.В., Кашников В.Н. Укрепление колоректального анастомоза как метод профилактики его несостоятельности. Колопроктология. 2018;(4):16-24. https://doi.org/10.33878/2073-7556-2018-0-4-16-24 [Balkarov A.A., Rybakov E.G., Ponomarenko A.A., Alekseev M.V., Kashnikov V.N. Reinforcement of staple line of colorectal anastomosis as a method of leakeage prevention. Koloproktologia. 2018;(4):16-24. (In Russ.) https://doi.org/10.33878/2073-7556-2018-0-4-16-24]
4. Ахметзянов Ф.Ш., Шайхутдинов Н.Т., Ахметзянова Ф.Ф. Валиев Н.А., Шемеунова З.Н., Егоров В.И. Аспирационное дренирование полости малого таза как способ консервативного лечения несостоятельности швов низкорасположенного колоректального анастомоза. Онкологическая колопроктология. 2015;5(1):43-48. doi:10.17650/2220-3478-2015-1-43-48 [Ahmetzyanov F.Sh., Shajhutdinov N.T., Ahmetzyanova F.F. Valiev N.A., Shemeunova Z.N., Egorov V.I. Aspiration drainage of the pelvic cavity as a method of conservative treatment of suture failure of low-lying colorectal anastomosis. Onkologicheskaja koloproktologija. 2015;5(1):43–48. doi:10.17650/2220-3478-2015-1-43-48].
5. Зитта Д.В., Субботин В.М. Влияние превентивной колостомии на непосредственные результаты хирургического лечения больных злокачественными новообразованиями прямой кишки. Колопроктология. 2017;(3):34–39. https://doi.org/10.33878/2073-7556-2017-0-3-34-39 [Zitta D.V., Subbotin V.M. Influence of defunctioning colostomy after low anterior resection for rectal cancer on early postoperative period. Koloproktologia. 2017;(3):34–39. (In Russ.) https://doi.org/10.33878/2073-7556-2017-0-3-34-39
6. Mirnezami A., Mirnezami R., Chandrakumaran K., Sasapu K., Sagar P., Finan P. Increased local recurrence and reduced survival from colorectal cancer following anastomotic leak: systematic review and meta-analysis. Ann Surg. 2011;253(5):890-9. doi: 10.1097/SLA.0b013e3182128929]
7. Wang S., Liu J., Wang S., Zhao H., Ge S., Wang W. Adverse Effects of Anastomotic Leakage on Local Recurrence and Survival After Curative Anterior Resection for Rectal Cancer: A Systematic Review and Meta-analysis. World J Surg. 2017;41(1):277–284. doi: 10.1007/s00268-016-3761-1
8. Ахметзянов Ф.Ш. Хронический пресакральный синус как осложнение тотальной мезоректумэктомии при раке прямой кишки / Ф.Ш. Ахметзянов, В.И. Егоров // Новости хирургии. 2019; 27(4):435–442. doi 10.18484/2305-0047.2019.4.435 [Akhmetzyanov F.Sh., Egorov V.I. Chronic Presacral Sinus as the Outcome of Total Mesorectumectomy in Rectal Cancer Novosti Khirurgii. 2019;27(4):435–442 (In Russ.)]

9. Rahbari N.N., Weitz J., Hohenberger W., Heald R.J., Moran B., Ulrich A., Holm T., Wong W.D., Tiret E., Moriya Y., Laurberg S., den Dulk M., van de Velde C., Büchler M.W. Definition and grading of anastomotic leakage following anterior resection of the rectum: a proposal by the International Study Group of Rectal Cancer. Surgery. 2010;147(3):339–51. doi: 10.1016/j.surg.2009.10.012
10. Yang J., Chen Q., Jindou L., Cheng Y. The influence of anastomotic leakage for rectal cancer oncologic outcome: A systematic review and meta-analysis. J Surg Oncol. 2020;121(8):1283–1297. doi: 10.1002/jso.25921
11. Borstlap W.A.A., Westerduin E., Aukema T.S., Bemelman W.A., Tanis P.J. Dutch Snapshot Research Group. Anastomotic Leakage and Chronic Presacral Sinus Formation After Low Anterior Resection: Results from a Large Cross-sectional Study. Ann Surg. 2017;266(5):870–877. doi: 10.1097/SLA.0000000000002429.
12. Kulu Y., Tarantio I., Warschkow R., Kny S., Schneider M., Schmied B.M., Büchler M.W., Ulrich A. Anastomotic leakage is associated with impaired overall and disease-free survival after curative rectal cancer resection: a propensity score analysis. Ann Surg Oncol. 2015;22(6):2059–67. doi: 10.1245/s10434-014-4187-3
13. Peltrini R., Carannante F., Costa G., Bianco G., Garbarino G.M., Canali G., Mercantini P., Bracale U., Corcione F., Caricato M., Capolupo G.T. Oncological outcomes of rectal cancer patients with anastomotic leakage: A multicenter case-control study. Front Surg. 2022 Sep 12; 9:993650. doi: 10.3389/fsurg.2022.993650.
14. Koedam T.W.A., Bootsma B.T., Deijen C.L., van de Brug T., Kazemier G., Cuesta M.A., Fürst A., Lacy A.M., Haglind E., Tuynman J.B., Daams F., Bonjer H.J. on behalf of the COLOR COLOR II study group. Oncological Outcomes After Anastomotic Leakage After Surgery for Colon or Rectal Cancer: Increased Risk of Local Recurrence. Ann Surg. 2022;275(2): e420–e427
15. Katoh H., Yamashita K., Wang G., Sato T., Nakamura T., Watanabe M. Anastomotic leakage contributes to the risk for systemic recurrence in stage II colorectal cancer. J Gastrointest Surg. 2011;15(1):120–9. doi: 10.1007/s11605-010-1379-4
16. Tonini V., Zanni M. Impact of anastomotic leakage on long-term prognosis after colorectal cancer surgery. World J Gastrointest Surg. 2023 May 27;15(5):745–756. doi: 10.4240/wjgs. v15.i5.745
17. Vojjala N., Gibatova V., Shah R.N., Singal S., Prabhu R., Krishnamoorthy G., Riggins K., Moka N. Integrating Circulating Tumor DNA into Clinical Management of Colorectal Cancer: Practical Implications and Therapeutic Challenges. Cancers (Basel). 2025;17(15):2520. doi: 10.3390/cancers17152520.
18. Merkow R.P., Bentrem D.J., Mulcahy M.F., Chung J.W., Abbott D.E., Kmiecik T.E., Stewart A.K., Winchester D.P., Ko C.Y., Bilimoria K.Y. Effect of postoperative complications on adjuvant chemotherapy use for stage III colon cancer. Ann Surg. 2013;258(6):847–53. doi: 10.1097/SLA.0000000000000312.
19. Des Guetz G., Nicolas P., Perret G.Y., Morere J.F., Uzzan B. Does delaying adjuvant chemotherapy after curative surgery for colorectal cancer impair survival? A meta-analysis. Eur J Cancer. 2010;46(6):1049–55. doi: 10.1016/j.ejca.2010.01.020.
20. Turner M.C., Farrow N.E., Rhodin K.E., Sun Z., Adam M.A., Mantyh C.R., Migaly J. Delay in Adjuvant Chemotherapy and Survival Advantage in Stage III Colon Cancer. J Am Coll Surg. 2018;226(4):670–678. doi: 10.1016/j.jamcollsurg.2017.12.048.
21. Deijen C.L., Tsai A., Koedam T.W., Veltcamp Helbach M., Sietses C., Lacy A.M., Bonjer H.J., Tuynman J.B. Clinical outcomes and case volume effect of transanal total mesorectal excision for rectal cancer: a systematic review. Tech Coloproctol. 2016 Dec;20(12):811–824. doi: 10.1007/s10151-016-1545-0.
22. Sparreboom C.L., Wu Z., Dereci A., Boersema G.S., Menon A.G., Ji J., Kleinrensink G.J., Lange J.F. Cytokines as Early Markers of Colorectal Anastomotic Leakage: A Systematic Review and Meta-Analysis. Gastroenterol Res Pract. 2016; 2016:3786418. doi: 10.1155/2016/3786418
23. Reisinger K.W., Schellekens D.H., Bosmans J.W., Boonen B., Hulsewé K.W., Sastrowijoto P., Derikx J.P., Grootjans J., Poeze M. Cyclooxygenase-2 Is Essential for Colorectal Anastomotic Healing. Ann Surg. 2017 Mar;265(3):547–554. doi: 10.1097/SLA.0000000000001744.
24. Alonso S., Pascual M., Salvans S., Mayol X., Mojal S., Gil M.J., Grande L., Pera M. Postoperative intra-abdominal infection, and colorectal cancer recurrence: a prospective matched cohort study of inflammatory and angiogenic responses as mechanisms involved in this association. Eur J Surg Oncol. 2015 Feb;41(2):208–14. doi: 10.1016/j.ejso.2014.10.052
25. Salvans S., Mayol X., Alonso S., Messeguer R., Pascual M., Mojal S., Grande L., Pera M. Postoperative peritoneal infection enhances migration and invasion capacities of tumor cells in vitro: an insight into the association between anastomotic leak and recurrence after surgery for colorectal cancer. Ann Surg. 2014; 260(5):939–43; discussion 943-4. doi: 10.1097/SLA.0000000000000958
26. Bohle B., Pera M., Pascual M., Alonso S., Mayol X., Salvado M., Schmidt J., Grande L. Postoperative intra-abdominal infection increases angiogenesis and tumor recurrence after surgical excision of colon cancer in mice. Surgery. 2010;147(1):120-6. doi: 10.1016/j.surg.2009.06.035
27. Artinyan A., Orcutt S.T., Anaya D.A., Richardson P., Chen G.J., Berger D.H. Infectious postoperative complications decrease long-term survival in patients undergoing curative surgery for colorectal cancer: a study of 12,075 patients. Ann Surg. 2015 Mar;261(3):497–505. doi: 10.1097/SLA.0000000000000854.
28. Gertsch P., Baer H.U., Kraft R., Maddern G.J., Altermatt H.J. Malignant cells are collected on circular staplers. Dis Colon Rectum. 1992;35(3):238–41. doi: 10.1007/BF02051014
29. Krarup P.M., Nordholm-Carstensen A., Jorgensen L.N., Harling H. Anastomotic leak increases distant recurrence and long-term mortality after curative resection for colonic cancer: a nationwide cohort study. Ann Surg. 2014;259(5):930–8. doi: 10.1097/SLA.0b013e3182a6f2fc.
30. Miki C., Tanaka K., Inoue Y., Araki T., Ohi M., Mohri Y., Uchida K., Kusunoki M. Perioperative host-tumor inflammatory interactions: a potential trigger for disease recurrence following a curative resection for colorectal cancer. Surg Today. 2008;38(7):579-84. doi: 10.1007/s00595-007-3674-6
31. Roxburgh C.S., McMillan D.C. The role of the in situ local inflammatory response in predicting recurrence and survival in patients with primary operable colorectal cancer. Cancer Treat Rev. 2012;38(5):451–66. doi: 10.1016/j.ctrv.2011.09.001.
32. Okamura R., Hida K., Hasegawa S., Sakai Y., Hamada M., Yasui M., Hinoi T., Watanabe M. Japan Society of Laparoscopic Colorectal Surgery. Impact of intraoperative blood loss on morbidity and survival after radical surgery for colorectal cancer patients aged 80 years or older. Int J Colorectal Dis. 2016;31(2):327–34. doi: 10.1007/s00384-015-2405-5.
33. Battersby N.J., Bouliotis G., Emmertsen K.J., Juul T., Glynne-Jones R., Branagan G., Christensen P., Laurberg S., Moran B.J. UK and Danish LARS Study Groups. Development and external validation of a nomogram and online tool to predict bowel dysfunction following restorative rectal cancer resection: the POLARS score. Gut. 2018;67(4):688-696. doi: 10.1136/gutjnl-2016–312695

34. Mongin C., Maggiori L., Agostini J., Ferron M., Panis Y. Does anastomotic leakage impair functional results and quality of life after laparoscopic sphincter-saving total mesorectal excision for rectal cancer? A case-matched study. Int J Colorectal Dis. 2014;29(4):459–67. doi: 10.1007/s00384-014-1833-y
35. Rutegård M., Jutesten H., Buchwald P., Angenete E., Lydrup M.L. Minor impact of anastomotic leakage in anterior resection for rectal cancer on long-term male urinary and sexual function. Int J Colorectal Dis. 2024;39(1):49. doi: 10.1007/s00384-024-04626-7
36. Lindgren R., Hallböök O., Rutegård J., et al. What is the risk for a permanent stoma after low anterior resection of the rectum for cancer? A six-year follow-up of a multicenter trial. Dis Colon Rectum. 2011;54(1):41–47.
37. Marinatou A., Theodoropoulos G.E., Karanika S., et al. Do anastomotic leaks impair postoperative health-related quality of life after rectal cancer surgery? A case-matched study. Dis Colon Rectum. 2021;64(6):711–721
38. Gielen A.H.C., Heuvelings D.J.I., Sylla P., van Loon Y.T., Melenhorst J., Bouvy N.D., Kimman M.L., Breukink S.O. CoReAL Collaborative. Impact of Anastomotic Leakage After Colorectal Cancer Surgery on Quality of Life: A Systematic Review. Dis Colon Rectum. 2025 Feb 1;68(2):154–170. doi: 10.1097/DCR.0000000000003478.

© Сергеев Олег Маркович (oleg.sersergeev@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.42

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГЕМОДИНАМИКИ И ЛАБОРАТОРНЫХ ДАННЫХ У ПАЦИЕНТОВ С ФИБРИЛЛЯЦИЕЙ ПРЕДСЕРДИЙ ПОЖИЛОГО И СТАРЧЕСКОГО ВОЗРАСТА

COMPARATIVE ANALYSIS OF HEMODYNAMIC AND LABORATORY DATA IN ELDERLY AND OLD PATIENTS WITH ATRIAL FIBRILLATION

M. Trushnikova
N. Koriagina
V. Koriagin
A. Avdeev
T. Shikhvintseva
T. Onyanova

Summary. *Relevance*. In the context of a globally aging population, modern cardiology is increasingly faced with the need to manage chronic diseases such as atrial fibrillation (AF) in elderly and senile patients. Along with the increasing incidence of AF in older age groups, so-called geriatric syndromes — multifactorial clinical conditions associated with decreased physiological reserves and increased vulnerability to stressors — are becoming more prominent.

The aim of the study was to comparatively analyze hemodynamic parameters and laboratory data in elderly and senile patients with atrial fibrillation.

Materials and Methods. A retrospective analysis of hospital data was conducted among 267 patients with atrial fibrillation at City Clinical Hospital No. 3, State Budgetary Healthcare Institution of the Perm Region: Group 1 (119 patients aged 75 and older), and Group 2 (147 patients aged 60–74 years). Anthropometric assessment, hemodynamics, complete blood count, coagulation profile, and echocardiography with left ventricular ejection fraction (LVEF, %) were performed.

Results. General clinical examinations revealed differences between the elderly and senile age groups. Patients aged ≥75 years were shorter (median 160 cm, Q_1–Q_3: 155–166 cm) than elderly patients (median 167.5 cm, Q_1–Q_3: 160–174 cm), $p < 0.001$. Body weight was significantly lower in the senile group (median 72 kg, Q_1–Q_3: 61–80 kg) compared to the elderly group (median 80 kg, Q_1–Q_3: 70–95 kg), $p < 0.001$. The body mass index in group 1 (27.2 kg/m^2) was statistically significantly lower than in group 2 (29.4 kg/m^2), p=0.007. Systolic blood pressure was slightly higher in the elderly group (130 mmHg versus 120 mmHg in the elderly group, p=0.571). The median LVEF was 60 % in both groups, which corresponds to preserved systolic function, p=0.797. Elderly patients showed a decrease in red blood cell counts (erythrocytes, hemoglobin, hematocrit), and a significantly higher ESR level. Basic parameters of the blood coagulation system in elderly and senile patients with AF did not differ statistically; the level of soluble fibrin monomer complexes increased significantly in patients 75 years of age and older. *Conclusions*: the clinical profile of a patient with AF in the elderly

Трушникова Мария Александровна
Ассистент, Пермский государственный медицинский университет им. академика Е.А. Вагнера
m-trushnikova08@mail.ru
Корягина Наталья Александровна
доктор медицинских наук, профессор, Пермский государственный медицинский университет им. академика Е.А. Вагнера
nina11-85@mail.ru
Корягин Владимир Сергеевич
Ординатор, Пермский государственный медицинский университет им. академика Е.А. Вагнера
vladimirkoryagin12@gmail.com
Авдеев Алексей Викторович
кандидат медицинских наук, доцент, Пермский государственный медицинский университет им. академика Е.А. Вагнера
svenav@mail.ru
Шихвинцева Татьяна Владиславовна
Пермский государственный медицинский университет им. академика Е.А. Вагнера
tanyashikhvintseva@mail.ru
Онянова Татьяна Олеговна
Пермский государственный медицинский университет им. академика Е.А. Вагнера
vozhakova02@bk.ru

Аннотация. *Актуальность*. Современная кардиология в условиях глобального старения населения всё чаще сталкивается с необходимостью управления хроническими заболеваниями, такими как фибрилляция предсердий (ФП), у пациентов пожилого и старческого возраста. Параллельно с увеличением частоты ФП в старших возрастных группах на первый план выходят так называемые гериатрические синдромы — мультифакторные клинические состояния, ассоциированные со снижением физиологических резервов и повышением уязвимости к стрессорам.

Целью исследования было проведение сравнительного анализа показателей гемодинамики и лабораторных данных у пациентов с фибрилляцией предсердий пожилого и старческого возраста.

Материалы и методы. Пациенты с фибрилляцией предсердий (267 человек), которым проводили ретроспективный анализ данных на госпитальном этапе в ГБУЗ ПК «Городская клиническая больница № 3», 1 группа 120 человек в возрасте 75 и старше, во 2 группе 147 человек в возрасте 60–74 лет. Провели оценку антропометрии, гемодинамики, общего анализа крови и коагулограммы, эхокардиография с оценкой фракции выброса левого желудочка (ФВЛЖ, %).

Результаты. При проведении общеклинических обследований выявлены различия в группах пожилого и старческого возраста. Пациенты ≥75 лет были ниже (медиана 160 см, Q_1–Q_3: 155–166 см), чем пациенты пожилого возраста (медиана 167.5 см, Q_1–Q_3: 160–174 см), $p < 0,001$, масса тела

(≥75 years), compared to an elderly patient, is characterized by lower anthropometric parameters, signs of anemia and increased inflammation, and laboratory signs of increased thrombotic susceptibility despite a formally normal standard coagulation profile. These characteristics must be considered when developing a comprehensive therapeutic strategy, particularly in matters of anemia correction, inflammation control, and thromboembolism risk assessment.

Keywords: atrial fibrillation, elderly, old age.

была значимо ниже в группе старческого возраста (медиана 72 кг, Q_1–Q_3: 61–80 кг) по сравнению с группой пожилых (медиана 80 кг, Q_1–Q_3: 70–95 кг), $p < 0{,}001$. Индекс массы тела в группе 1 (27.2 кг/м^2) был статистически значимо ниже, чем в группе 2 (29.4 кг/м^2), p=0,007. Систолическое артериальное давление было несколько выше в группе пациентов старческого возраста (130 мм рт. ст. против 120 мм рт. ст. в группе пожилых, p=0,571). Медианная ФВЛЖ составила 60 % в обеих группах, что соответствует сохраненной систолической функции, p=0,797. У пациентов старческого возраста наблюдается снижение показателей красной крови (эритроциты, гемоглобин, гематокрит), отмечается достоверно более высокий уровень СОЭ. Базовые параметры свертывающей системы крови у пациентов с ФП пожилого и старческого возраста статистически не различаются, значимое повышение уровня растворимых фибрин мономерных комплексов у пациентов 75 лет и старше.

Выводы: клинический портрет пациента с ФП старческого возраста (≥75 лет), в отличие от пожилого, характеризуется меньшими антропометрическими показателями, признаками анемии и повышенного воспалительного фона, лабораторными признаками повышенной готовности к тромбообразованию при формально нормальной стандартной коагулограмме. Эти особенности необходимо учитывать при разработке комплексной терапевтической тактики, особенно в вопросах коррекции анемии, контроля воспаления и оценки риска тромбоэмболий.

Ключевые слова: фибрилляция предсердий, пожилой, старческий возраст.

Актуальность

Современная кардиология в условиях глобального старения населения всё чаще сталкивается с необходимостью управления хроническими заболеваниями, такими как фибрилляция предсердий (ФП), у пациентов пожилого возраста. ФП является наиболее распространённой устойчивой аритмией, распространённость которой экспоненциально возрастает с возрастом, достигая более 10 % среди лиц старше 80 лет [1]. Параллельно с увеличением частоты ФП в старших возрастных группах на первый план выходят так называемые гериатрические синдромы — мультифакторные клинические состояния, ассоциированные со снижением физиологических резервов и повышением уязвимости к стрессорам. Ключевым интегрирующим понятием среди них является синдром старческой астении или хрупкость, представляющий собой клинический синдром, характеризующийся снижением функциональных резервов и резистентности к стрессам вследствие кумуляции дефицитов в различных физиологических системах [2].

Целью исследования было проведение сравнительного анализа показателей гемодинамики и лабораторных данных у пациентов с фибрилляцией предсердий пожилого и старческого возраста.

Материалы и методы

Пациенты с фибрилляцией предсердий (267 человек), которым проводили ретроспективный анализ данных на госпитальном этапе в ГБУЗ ПК «Городская клиническая больница № 3» с 01.01.2025 по 30.06.2025 года. Сформированы 2 группы пациентов с фибрилляцией предсердий, поступивших в кардиологическое отделение, где 1 группа 119 человек в возрасте 75 и старше, во 2 группе 147 человек в возрасте 60–74 лет. Общеклинические исследования включали антропометрию (рост, масса тела, индекс массы тела), измерение артериального давления и частоты сердечных сокращений. Лабораторные методы состояли из общего анализа крови и коагулограммы. Инструментальная диагностика: эхокардиография с оценкой фракции выброса левого желудочка (ФВЛЖ). Статистический анализ проводился с использованием программы StatTech v. 4.11.1 (разработчик — ООО «Статтех», Россия).

Результаты и обсуждение

При проведении общеклинических обследований выявлены различия в группах пожилого и старческого возраста. В таблице 1 при оценке показателей гемодинамики и функции сердца отмечено, что медиана частоты сердечных сокращений (ЧСС) в обеих группах составила 100 уд/мин, при этом разброс показателей был сопоставим (группа 1: 80–120; группа 2: 80–124,5), p=0,790. Медианное значение систолического артериального (САД) было несколько выше в группе пациентов старческого возраста 130 мм рт.ст. против 120 мм рт.ст. в группе пожилых, p=0,571. Медиана диастолического артериального давления (ДАД) была одинаковой в обеих группах (80 мм

рт. ст.), p=0,686. Медианная ФВЛЖ составила 60% в обеих группах, что соответствует сохраненной систолической функции, p=0,797. По всем антропометрическим параметрам выявлены статистически значимые различия между группами. Пациенты группы 1 (≥75 лет) были достоверно ниже (медиана 160 см, Q_1–Q_3: 155–166 см), чем пациенты группы 2 (медиана 167,5 см, Q_1–Q_3: 160–174 см), p < 0,001. Масса тела также была значимо ниже в группе старческого возраста (медиана 72 кг, Q_1–Q_3: 61–80 кг) по сравнению с группой пожилых (медиана 80 кг, Q_1–Q_3: 70–95 кг), p < 0,001. Медианный индекс массы тела (ИМТ) в группе 1 (27,2 кг/м^2) был статистически значимо ниже, чем в группе 2 (29,4 кг/м^2) (p=0,007), что указывает на тенденцию к большей упитанности или наличию избыточной массы тела в группе пациентов 66–74 лет. Возрастное снижение мышечной массы и силы, которое усугубляется при хронических заболеваниях, включая сердечную недостаточность и сопутствующую ФП [3]. Снижение веса и ИМТ является маркером синдрома хрупкости, который ассоциирован с худшими исходами у пациентов с ФП, включая повышенный риск падений, кровотечений и смертности, что напрямую влияет на баланс рисков антикоагулянтной терапии [4]. Меньшая масса тела может влиять на объем распределения лекарственных препаратов, требуя особого внимания при подборе доз антикоагулянтов и антиаритмических препаратов [5].

Таблица 1.

Показатели гемодинамики пациентов с фибрилляций предсердий пожилого и старческого возраста

Показатели	Категории	Группы исследования		p
		Me	$Q_1 – Q_3$	
ЧСС, уд/мин	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	100,00	80,00–120,00	0,790
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	100,00	80,00–124,50	
САД, мм.рт.ст.)	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	130,00	110,00–140,00	0,571
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	120,00	110,00–140,00	
ДАД, мм.рт.ст.	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	80,00	70,00–85,50	0,686
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	80,00	70,00–80,00	
ФВ ЛЖ, %	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	60,00	57,00–62,00	0,797
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	60,00	57,00–62,00	
Рост, см	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	160,00	155,00–166,00	<0,001*
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	167,50	160,00–174,00	
Вес, кг	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	72,00	61,00–80,00	<0,001*
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	80,00	70,00–95,00	
ИМТ, кг/м^2	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	27,20	24,10–31,40	0,007*
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	29,40	25,95–32,00	

* — различия показателей статистически значимы (p<0,05)

Выявлено два ключевых возрастных отличия в гематологическом статусе пациентов с ФП, таблица 2. У пациентов старческого возраста (≥75 лет) наблюдается выраженное снижение показателей красной крови (эритроциты, гемоглобин, гематокрит), что соответствует более высокой распространенности анемии. У данной же группы пациентов отмечается достоверно более высокий уровень СОЭ, что отражает тяжесть коморбидного фона, активность хронических воспалительных процессов и возрастные изменения в иммунореактивности. Различия имеют важное клиническое значение, поскольку и анемия, и повышенный воспалительный фон являются независимыми факторами риска неблагоприятных исходов у пациентов с фибрилляцией предсердий, и их коррекция требует особого внимания в геронтологической практике. Анемия у пожилых с ФП является независимым фактором риска смертности, сердечной недостаточности, снижения качества жизни и может усугублять течение аритмии [6], генез часто мультифакторный (анемия хронических заболеваний, дефицит железа, почечная дисфункция). Повышение СОЭ является неспецифическим, но устойчивым маркером активации системного вялотекущего воспаления, характерного для старения [7], а при ФП хроническое воспаление способствует прогрессированию фиброза предсердий, поддержанию аритмогенного субстрата и повышению тромбогенного потенциала (феномен «тромбовоспаления») [8].

Сравнительный анализ коагулограммы показал, что базовые параметры свертывающей системы крови (АПТВ, МНО, ПТВ, ТВ) у пациентов с ФП пожилого и старческого возраста статистически не различаются, таблица 3. Ключевым находкой является статистически значимое повышение уровня растворимых фибрин мономерных

Таблица 2.

Показатели общего анализа крови пациентов с фибрилляций предсердий пожилого и старческого возраста

Показатели	Категории	Группы исследования		p
		M ± SD /Me	95 % ДИ / $Q_1 – Q_3$	
Эритроциты, 10^{12}/л	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	4,40	4,10–4,60	<0,001*
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	4,60	4,30–5,00	
Гемоглобин, г/л	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	117,00	114,00–119,00	<0,001*
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	125,50	118,00–141,00	
Гемотрокрит, %	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	37,00	35,00–40,00	0,001*
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	40,00	36,50–43,00	
Ретикулоциты, %	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	0,60	0,40–0,90	0,401
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	0,70	0,40–0,90	
Тромбоциты, 10^9/л	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	199,00	162,50–237,00	0,330
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	205,00	177,50–246,75	
Лейкоциты, 10^9/л	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	6,80	5,80–7,80	0,649
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	6,50	5,53–8,15	
СОЭ, мм/ч	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	19,00	12,00–27,50	<0,001*
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	13,50	8,00–22,00	
Базофилы, %	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	0,00	0,00–1,00	0,790
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	0,00	0,00–0,00	
Эозинофилы, %	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	2,00	1,00–3,00	0,184
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	1,50	1,00–3,00	
Палочко-ядерные нейтрофилы, %	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	1,00	1,00–1,00	0,669
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	1,00	1,00–1,75	
Сегменто-ядерные нейтрофилы, %	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	60,91 ± 11,27	58,81–63,01	0,294
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	59,43 ± 11,11	57,59–61,27	
Лимфоциты, %	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	27,23 ± 10,11	25,35–29,11	0,097
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	29,32 ± 9,82	27,69–30,95	
Моноциты, %	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	8,00	6,00–9,50	0,216
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	7,00	5,00–10,00	

* — различия показателей статистически значимы (p<0,05)

комплексов (РФМК) у пациентов 75 лет и старше, который является маркером интенсификации процессов тромбообразования и активности внутрисосудистого свертывания. В нашей работе полученный результат позволяет предположить, что у пациентов старческого возраста с ФП, даже при сопоставимых стандартных показателях коагулограммы, может наблюдаться прокоагулянтная активность и повышенный тромбогенный потенциал [9], что имеет важное клиническое значение для оценки риска тромбоэмболических осложнений и может влиять на стратегию антикоагулянтной терапии в данной возрастной группе.

Выводы

Клинический портрет пациента с ФП старческого возраста (≥75 лет), в отличие от пожилого, характеризуется меньшими антропометрическими показателями, признаками анемии и повышенного воспалительного фона, лабораторными признаками повышенной готовности к тромбообразованию при формально нормальной стандартной коагулограмме. Эти особенности необходимо учитывать при разработке комплексной терапевтической тактики, особенно в вопросах коррекции анемии, контроля воспаления и оценки риска тромбоэмболий.

Таблица 3.
Показатели коагулограммы у пациентов с фибрилляций предсердий пожилого и старческого возраста

Показатели	Категории	Группы исследования		p
		Me	$Q_1 – Q_3$	
АПТВ, сек	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	31,00	29,00–34,00	0,445
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	31,00	29,00–34,00	
МНО, Ед.	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	1,14	1,03–1,28	0,309
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	1,14	1,04–1,34	
ПТВ, сек.	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	16,00	15,00–18,00	0,470
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	16,00	14,50–18,38	
РФМК Ед.	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	5,00	4,00–8,00	0,003*
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	4,50	4,00–7,00	
ТВ, сек.	Группа 1 (возраст 75 и более лет)	15,75	15,00–17,00	0,431
	Группа 2 (возраст 60–74 лет)	16,00	15,00–16,88	

Сокращения: АПТВ — активированное парциальное тромбопластиновое время, МНО — международное нормализованное отношение, ПТФ — протромбиновое время, РФМК — растворимые фибрин-мономерные комплексы, ТВ — тромбиновое время.

* — различия показателей статистически значимы ($p<0,05$)

ЛИТЕРАТУРА

1. Hindricks G., Potpara T., Dagres N. 2020 ESC Guidelines for the diagnosis and management of atrial fibrillation developed in collaboration with the European Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS): The Task Force for the diagnosis and management of atrial fibrillation of the European Society of Cardiology (ESC) Developed with the special contribution of the European Heart Rhythm Association (EHRA) of the ESC. Eur Heart J. 2021 Feb 1;42(5):373–498. doi: 10.1093/eurheartj/ehaa612.
2. Fried L.P., Tangen C.M., Walston J., Newman A.B., Hirsch C., Gottdiener J., Seeman T., Tracy R., Kop W.J., Burke G., McBurnie M.A.; Cardiovascular Health Study Collaborative Research Group. Frailty in older adults: evidence for a phenotype. J Gerontol a Biol Sci Med Sci. 2001 Mar;56(3):M146–56. doi: 10.1093/gerona/56.3.m146. PMID: 11253156.
3. Cruz-Jentoft A.J., Bahat G., Bauer J., Boirie Y., Bruyère O., Cederholm T., Cooper C., Landi F., Rolland Y., Sayer A.A., Schneider S.M., Sieber C.C., Topinkova E., Vandewoude M., Visser M., Zamboni M; Writing Group for the European Working Group on Sarcopenia in Older People 2 (EWGSOP2), and the Extended Group for EWGSOP2. Sarcopenia: revised European consensus on definition and diagnosis. Age Ageing. 2019 Jan 1;48(1):16–31. doi: 10.1093/ageing/afy169. Erratum in: Age Ageing. 2019 Jul 1;48(4):601. doi: 10.1093/ageing/afz046. PMID: 30312372; PMCID: PMC6322506.
4. Pilotto A., Custodero C., Maggi S., Polidori M.C., Veronese N., Ferrucci L. A multidimensional approach to frailty in older people. Ageing Res Rev. 2020 Jul; 60:101047. doi: 10.1016/j.arr.2020.101047. Epub 2020 Mar 21. PMID: 32171786; PMCID: PMC7461697.
5. Steffel J., et al. 2021 ESC Guidelines for the diagnosis and management of atrial fibrillation. Eur Heart J. 2021.
6. Frigy A., Fogarasi Z., Kocsis I., Máthé L., Nagy E. The prevalence and clinical significance of anemia in patients hospitalized with acute heart failure. F1000Res. 2016 May 26; 5:1006. doi: 10.12688/f1000research.7872.2. PMID: 28928932; PMCID: PMC5599996.
7. Franceschi C., Garagnani P., Parini P., Giuliani C., Santoro A. Inflammaging: a new immune-metabolic viewpoint for age-related diseases. Nat Rev Endocrinol. 2018 Oct;14(10):576–590. doi: 10.1038/s41574-018-0059-4. PMID: 30046148.
8. Rafaqat S., Afzal S., Khurshid H., Safdar S., Rafaqat S., Rafaqat S. The Role of Major Inflammatory Biomarkers in the Pathogenesis of Atrial Fibrillation. J Innov Card Rhythm Manag. 2022 Dec 15;13(12):5265–5277. doi: 10.19102/icrm.2022.13125. PMID: 37293559; PMCID: PMC10246921.
9. Favaloro E.J., Franchini M., Lippi G. Aging hemostasis: changes to laboratory markers of hemostasis as we age — a narrative review. Semin Thromb Hemost. 2014 Sep;40(6):621–33. doi: 10.1055/s-0034-1384631. Epub 2014 Aug 6. PMID: 25099191.

© Трушникова Мария Александровна (m-trushnikova08@mail.ru); Корягина Наталья Александровна (nina11-85@mail.ru); Корягин Владимир Сергеевич (vladimirkoryagin12@gmail.com); Авдеев Алексей Викторович (svenav@mail.ru); Шихвинцева Татьяна Владиславовна (tanyashikhvintseva@mail.ru); Онянова Татьяна Олеговна (vozhakova02@bk.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.47

ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ МИАСТЕНИЧЕСКОГО КРИЗА ПРИ ПОЗДНЕМ ДЕБЮТЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ

FEATURES OF THE COURSE OF MYASTHENIC CRISIS IN LATE-DEBUTING DISEASE

S. Chudopal
E. Ulimbasheva
Zh. Sabanchieva
A. Deshev
A. Poroshina
E. Tatimova

Summary. Myasthenia gravis according to modern concepts is a heterogeneous group of autoimmune pathology with a postsynaptic neuromuscular transmission defectsts and can be classified by the prevalence of the lesion, the detection of specific antibodies, the age at onset of the disease, the presence of thymus pathology. Such a clinico-pathogeneticheterogencity creates difficulties in the diagnostics and treatment of the disease. With late (over 50 years) myasthenia gravis debilily, the disease often has flow characteristics: a predominat lesion of bulbar musculature, a severe progressive course, a lack of proper effect from the therapy. If in patients with myastenia gravis of older age there is vascular load, then it is often mistakenly diagnosed with cerebral stroke. Presented case severe generalized myasthenia gravis with bulbar syndrome in a patient of 60 years old, shows the features of the cours of this disease with late debute. Key words: myasthenia gravis, myasthenic crisis, late onset, case report.

Keywords: myasthenia gravis, myasthenic crisis, late onset, case report.

Чудопал Сергей Михайлович
кандидат медицинских наук,
ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик
chudopal55@mail.ru
Улимбашева Эмма Суфьяновна
доцент,
ГБУЗ Республиканская клиническая больница, г. Нальчик
emmanevrolog07@yandex.ru
Сабанчиева Жанета Хусейновна
доктор медицинских наук, профессор,
ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик
Sabanchiyeva@mail.ru
Дешев Астемир Леонидович
Ассистент,
ФГБОУ Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик
Deshev3655@mail.ru
Порошина Амина Абдулселимовна
Ассистент,
ФГБОУ Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик
asielimova@mail.ru
Татимова Эллина Латмировна
ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик
etatimova@list.ru

Аннотация. Миастения гравис, по современным представлениям, является неоднородной группой аутоиммунной патологии с постсинаптическим дефектом нервно-мышечной передачи и может классифицироваться по распространенности поражения, детекции специфических антител, возрасту начала заболевания, наличию патологии вилочковой железы. Такая клинико-патогенетическая неоднородность создает трудности в диагностике и лечении заболевания. При позднем (старше 50 лет) дебюте миастении заболевание часто имеет особенности течения и проявлений: преимущественное поражение бульбарной мускулатуры, тяжелое прогрессирующее течение, недостаточная эффективность терапии. При наличии сосудистой отягощенности пациентам старшего возраста с миастенией часто ошибочно выставляется диагноз церебрального инсульта. Представленный случай тяжелой генерализованной миастении с бульбарным синдромом у пациентки 75 лет показывает особенности течения этого заболевания при позднем дебюте.

Ключевые слова: миастения гравис, миастенический криз, поздний дебют, клинический случай.

Актуальность

Нарушения нервно-мышечной передачи могут быть иммунологической, токсической и генетической природы. Наиболее распространенным из этих расстройств является миастения гравис, представляющая собой, по современным представлениям, гетерогенную группу аутоиммунной патологии с постсинаптическим дефектом нервно-мышечной трансмиссии. Миастения может классифицироваться по распространенности поражения (глазная или генерализованная), по детекции специфических антител [к рецепторам ацетилхолина, рецептору мышечной специфической тирозинкиназы (muscle-specificreceptortyrosinekinase — MuSK), белку 4, связанному с рецептором липопротеинов низкой плотности (low-densitylipoproteinreceptor-relatedprotein 4), серонегативная], по возрасту начала заболевания (до пубертата — ювенильная, моложе 50 лет, старше 50 лет), наличию патологии вилочковой железы (атрофия, гиперплазия, тимома) [1]. Такая клинико-патогенетическая гетерогенность создает трудности в диагностике миастении и требует индивидуализированного подхода к лечению. Так, MuSK-позитивная миастения проявляется частым поражением бульбарных, лицевых и дыхательных мышц, более тяжелым течением с развитием кризов, низкой чувствительностью к антихолинэстеразным препаратам [2–4]. В последнее время в мире отмечается рост частоты случаев миастении гравис в позднем возрасте, что связывают с лучшей диагностикой этого заболевания [5, 6]. В 15 % случаев бульбарные симптомы могут быть начальным проявлением миастении, часто серонегативной [7, 8]. В позднем возрасте у пациентов, коморбидных по сосудистой патологии, особенно при наличии поражения бульбарной мускулатуры, отсутствии чувствительности к антихолинэстеразным препаратам, антител к рецепторам ацетилхолина, при миастении, часто ошибочно выставляется диагноз церебрального инсульта [9–11]. Наиболее частой ошибкой в терапии, приводящей к миастеническому кризу, является быстрое снижение дозы иммуносупрессантов [1]. Представляем описание клинического случая миастении гравис, дебютировавшей в позднем возрасте с преимущественного поражения бульбарной мускулатуры, имеющей тяжелое течение и требующей массивной иммуносупрессивной терапии.

Цель работы: оценить клинические проявления и особенности диагностики миастении у пациентов в пожилом возрасте.

Материал и методы

Данные для исследования клинического случая взяты из практической деятельности и собраны путем сбора жалоб и анамнеза у пациента с уточнением всех деталей заболевания, времени начала, симптомов, лечения. Были проанализированы все полученные заключения и результаты с различными видами инструментальных и лабораторных исследований. Также обязательно был проведен тщательный неврологический осмотр пациента и были определены ведущие симптомы болезни.

Результаты

Пациентка Ф., 75 лет, в экстренном порядке госпитализирована в неврологическое отделение РКБ для дальнейшего обследования и лечения после проведения КТ головного мозга. При обращении пациентка имела жалобы на выраженную общую слабость, периодически затрудненное глотание и жевание, быструю утомляемость, боли в шейном отделе позвоночника, онемение в ногах, боли в тазобедренном суставе, периодические подъемы артериального давления и плохой сон.

Анамнез заболевания: со слов родственников, пациентка начала отмечать затрудненное глотание с вечера 24.01.25 г. Утром 02.02.25 г. присоединилось нарушение речи. В связи с чем была доставлена БСМП в п/о РКБ. Осмотрена дежурным неврологом. В экстренном порядке госпитализирована в первичное сосудистое отделение с подозрением на острое нарушение мозгового кровообращения (ОНМК) в вертебро-базилярном бассейне (ВББ). Оставалась под наблюдением в ОРИТ, и на следующие сутки повторно сделали МРТ в DWI-режиме, ОНМК исключено. Проведена электронейромиография (ЭНМГ), выставлен диагноз миастения? и перезакреплена за неврологическим отделением.

При поступлении в неврологическое отделение у пациентки объективно при осмотре: состояние средней тяжести. Гиперстеническое телосложение, повышенное питание. Кожные покровы и видимые слизистые физиологической окраски. Тоны сердца приглушены, ритм правильный. АД в динамике: 120/80, 150/90, 160/90, 140/80, 130/80 мм рт. ст. ЧСС — 76 в минуту. Дыхание самостоятельное, эффективное, аускультативно-везикулярное дыхание, хрипов нет. ЧДД — 18 в минуту. SpO2 — 93 %. Живот мягкий, без особого напряжения. Перистальтика кишечника выслушивается. Физиологические отправления контролирует.

Неврологический статус. В сознании. Контактна. Адекватна. Резко астенизирована. Ориентирована в пространстве и во времени. Обращённую речь понимает, команды выполняет. Менингеальных знаков нет. Движение глазных яблок в полном объёме, нистагмоид. Зрачки D=S, фотореакции живые, содружественные; глазные щели D=S. Полуптоз. Небный и глоточный рефлексы снижены. Лицо симметричное. Язык по средней линии. Сухожильные и периостальные рефлексы s=d, средней живости. Мышечная сила в конечностях снижена диффузно. ПНП выполняется с дисметрией с двух сторон. В позе Ромберга не проверялась.

Проведены дополнительные обследования с помощью лабораторных и инструментальных методов, врачей-специалистов. В общем анализе крови выявлено незначительное понижение уровня гемоглобина до 114 г/л; в общем анализе мочи, биохимическом анализе крови, коагулограммепатологических изменений не обнаружено; на электрокардиограмме (ЭКГ) — признаки гипертрофии левого желудочка, диффузные дистрофические изменения миокарда.

МРТ головного мозга от 29.01.25г.: Данных за объемное новообразование головного мозга или острую цереброваскулярную патологию на момент исследования не получено. МР-признаки церебральной микроангиопатии с недостаточностью кровообращения в вертебро-базилярном бассейне, атрофических изменений 2ст. вещества преимущественно лобных, теменных долей и мозжечка, заместительной наружной гидроцефалии. «Пустое» турецкое седло. МРТ пояснично-крестцового отдела позвоночника с миелографией от 29.01.25г.: МР-признаки дегенеративно-дистрофических изменений пояснично-крестцового отдела позвоночника в виде остеохондроза, циркулярных протрузий межпозвонковых дисков L3-L3, L3-L4, L4-L5, циркулярно-фораменальной левосторонней протрузии межпозвонкового диска L5-S1, интракорпоральных грыж Шморля L1-L3 позвонков, спондилеза, спондилоартроза. Псевдоантелистез L3 позвонка. Гемангиома в теле L4 позвонка. Сколиоз поясничного отдела позвоночника 1ст. Умеренно выраженные атрофические изменения и отек мышц, выпрямляющих позвоночник. Диагноз офтальмолога от 02.02.2025г.: OU — Ангиопатия сетчатки. Осложненная катаракта. Диагноз кардиолога от 02.02.25г.: Гипертоническая болезнь 3 стадии, 3 степени, степень риска 4. ЭМГ от 04.02.25г.: Признаки умеренно выраженного нарушения нервно-мышечной передачи постсинаптического (миастенического) типа с преобладанием в бульбарной группе мышц и проксимальных мышц верхней конечностей. Антитела к антихолинэстеразе от 07.02.25г: 11,17 нмоль/л. КТ грудного отдела от 06.02.25г.: КТ данных за наличие инфильтративных изменений достоверно не выявлено. В связи с полученными миографическими данными проведена КТ органов грудной клетки, не выявившая патологии органов средостения. К лечению с 10.02.2025 был добавлен Прозерин подкожно, 12.02.2025 препарат был заменен на таблетки пиридостигмина бромида (Калимина) по 30 мг 3 раза в день. На фоне лечения уменьшилась выраженность дисфагии, но жалобы на периодическое двоение к вечеру и дизартрия сохранялись. Пациентка была выписана 15.02.2025 с рекомендацией невролога.

Заключение

Представленный случай демонстрирует клиническую гетерогенность миастении гравис и особенности течения этого заболевания в позднем возрасте. У пациентки 75 лет с отягощенным сосудистым анамнезом (гипертрофия левого желудочка на ЭКГ, атеросклероз брахиоцефальных артерий по данным ультразвукового дуплексного сканирования, лакунарные изменения на КТ головного мозга) остро развился бульбарный синдром, что было расценено как ишемический инсульт в вертебрально-базилярной системе. Отсутствие признаков альтернирующего синдрома, присоединение двоения, «мерцание» симптомов в течение суток, анамнестическое указание на ранее бывший эпизод глазодвигательных нарушений (также трактованный как инсульт) позволили заподозрить миастению. Диагноз был подтвержден данными ЭНМГ и прозериновой пробой. Особенностью случая является преобладание бульбарных нарушений в виде тяжелой дисфагии, недостаточная чувствительность к антихолинэстеразным препаратам, необходимость приема иммуносупрессоров в высокой дозе, а также декомпенсация заболевания с развитием кризов и наличие сопутствующей аутоиммунной патологии (псориатического артрита). В литературе имеется информация, что при наличии у больных миастенией ряда особенностей, таких как преимущественная слабость бульбарной мускулатуры и низкая чувствительность к прозерину, достичь полной компенсации состояния часто не удается. Приведенный нами случай заболевания именно такой [12]. Подобные особенности, по данным литературы, свойственны именно миастении в позднем возрасте: доминирование бульбарных нарушений, прогрессирующее тяжелое течение, недостаточная эффективность терапии [13]. В заключение следует отметить, что подобные особенности течения миастении гравис часто приводят пациентов в отделения сосудистой неврологии с диагнозом «инсульт в вертебрально-базилярной системе», где врачам следует иметь настороженность в отношении миастении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басири К., Ансари Б., Оховат А.А. Опасная для жизни ошибочная диагностика бульбарной миастении гравис как заболевания двигательных нейронов: насколько можно полагаться на преувеличенные глубокие сухожильные рефлексы. AdvBiomedRes 2015; 4: 58.
2. Ким С.Дж., Пак Джи, Чой Ю.М. и др. Бульбарная миастения, наложенная намедуллярный инфаркт, диагностированный с помощью фиброоптической эндоскопической оценки глотания с одновременным применением тензиона. Энн Реабилитационная медицина 2017; 41 (6): 1082–7.
3. Бардаков С.Н., Живолупов С.А., Рашидов Н.А. Иммунологическая и клиническая гетерогенность миастении. Вестн. Российской военно-медицинской академии.2016; 1 (53): 154–64.

4. Щербакова Н.И., Пирадов М.А., Павлова Е.М. и др. Причины, факторы риска, клинические предикторы развития кризов у больных миастенией. Неврол. журн. 2013;2: 11–9.
5. Романова Т.В. Миастения с ранним и поздним началом заболевания. Саратов. на-уч.-мед. журн. 2016; 12 (2): 287–92.
6. Санадзе А.Г. Эффективность и целесообразность внутривенного введения человеческого иммуноглобулина в патогенетической терапии больных с генерализованной миастенией. Журн. неврологии и психиатрии им. С.С.Корсакова. 2011; 6:29–32.
7. Школьник В.М., Кальбус А.И., Бараненко А.Н., Погорелов А.В. Миастения: современные подходы к диагностике и лечению / В.М. Школьник и [др.] // Украинский неврологический журнал. 2014. — № 2(31). — С. 12–17.
8. Алексеева Т.М., Косачев В.Д., Халмурзина А.Н. Клинико-иммунологические особенности миастении и подходы к ее терапии у лиц пожилого возраста / Т.М. Алексеева, В.Д. Косачев, А.Н. Халмурзина // Нервно-мышечные болезни. — 2016. — № 6. — С.10–16.
9. Гусев Е.И., Коновалов А.Н., Скворцова В.И. Неврология: Национальное руководство /Е.И. Гусев, А.Н. Коновалов, В.И. Скворцова. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2015. — 1064 с.
10. Косачев В.Д., Жулев Н.М., Невзорова В.В. Особенности начала миастении у лиц пожилого и старческого возраста /В.Д. Косачев, Н.М. Жулев, В.В. Невзорова // Российский семейный врач. — 2010. — № 3. — С.35–37.
11. Романова Т.В. Консервативное лечение миастении в условиях миастенического центра /Т.В. Романова // Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика. — 2013. — №5(4). — С. 28–33.
12. Санадзе А.Г. Миастения и миастенические синдромы /А.Г. Санадзе. — М.: ЛитТерра, 2012. 255 с.
13. Смолин А.И. Миастения: варианты клинического течения, дифференцированное лечение и качество жизни пациентов: дис. … канд. мед. наук. — Иркутск, 2015. — 127 с.

© Чудопал Сергей Михайлович (chudopal55@mail.ru); Улимбашева Эмма Суфьяновна (emmanevrolog07@yandex.ru);
Сабанчиева Жанета Хусейновна (Sabanchiyeva@mail.ru); Дешев Астемир Леонидович (Deshev3655@mail.ru);
Порошина Амина Абдулселимовна (asielimova@mail.ru); Татимова Эллина Латмировна (etatimova@list.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.02.50

ДИАГНОСТИКА И ИНТЕРВЕНЦИОННОЕ ЛЕЧЕНИЕ КАРОТИДНОЙ ПАТОЛОГИИ. КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ЭКСКУРС. ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРВЕНЦИОННОГО ПОСОБИЯ СОЧЕТАННОЙ КАРОТИДНОЙ И КАРДИАЛЬНОЙ ПАТОЛОГИИ

DIAGNOSIS AND INTERVENTIONAL TREATMENT OF CAROTID PATHOLOGY. A BRIEF HISTORICAL EXCURSION. FEATURES OF INTERVENTIONAL BENEFITS FOR COMBINED CAROTID AND CARDIAC PATHOLOGIES

F. Yuldashev
K. Petrosyan
G. Dadabaev
V. Suladze

Summary. The presented review systematizes the historical aspects of invasive treatment of obstructive lesions of the carotid arteries, starting from the earliest mentions in ancient Greek mythology and ending with modern interventional technologies. Detailed consideration is given to methods for diagnosing internal carotid artery stenosis, such as duplex scanning, CT angiography, MR angiography, and digital subtraction angiography, with their comparative analysis in patients with combined carotid and cardiac pathology. Special attention is paid to the evolution of surgical and endovascular techniques, including carotid endarterectomy and carotid artery stenting with various protective devices. A key section of this work is devoted to analyzing treatment strategies for patients with combined cardiac and carotid pathology. Based on data from international studies (SAPPHIRE, CREST, FRIENDS) and the clinical experience of domestic centers, the benefits, and risks of single stage, staged, and hybrid approaches in the treatment of these patients have been evaluated. The work emphasizes the lack of a unified strategy in the current literature and the need for an interdisciplinary approach in selecting the optimal treatment strategy for each category of patients.

Keywords: carotid stenosis, carotid endarterectomy, carotid artery stenting, combined carotid and cardiac pathology, hybrid treatment strategies.

Юлдашев Фаридун Шомуротович
Врач, ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева
faridun.yuldashev@mail.ru
Петросян Карен Валерьевич
доктор медицинских наук, врач, ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева
dr.petrosian@gmail.com
Дадабаев Гуламжан Мураджанович
кандидат медицинских наук, врач, ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева
dgmed83_83@mail.ru
Суладзе Владимир Георгиевич
кандидат медицинских наук, врач, сердечно-сосудистый хирург, ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева
vsuladze@yandex.ru

Аннотация. В представленном обзоре систематизированы исторические аспекты инвазивного лечения обструктивных поражений сонных артерий, начиная с первых упоминаний в древнегреческой мифологии и заканчивая современными интервенционными технологиями. Подробно рассмотрены методы диагностики стенозов внутренней сонной артерии, такие как: дуплексное сканирование, КТ-ангиография, МР-ангиография и цифровая субтракционная ангиография с их сравнительным анализом у пациентов с сочетанной каротидной и кардиальной патологией. Особое внимание уделено эволюции хирургических и эндоваскулярных методик, включая каротидную эндартерэктомию и стентирование сонных артерий с различными защитными устройствами.

Ключевой раздел данной работы посвящен анализу стратегий лечения пациентов с сочетанной кардиальной и каротидной патологией. На основании данных международных исследований (SAPPHIRE, CREST, FRIENDS) и клинического опыта отечественных центров оценены преимущества и риски одномоментного, этапного и гибридного подходов в лечении данных пациентов. Работа подчеркивает отсутствие единой стратегии в современной литературе и необходимость междисциплинарного подхода к выбору оптимальной тактики лечения для каждой категории пациентов.

Ключевые слова: каротидный стеноз, каротидная эндартерэктомия, стентирование сонных артерий, сочетанная каротидная и кардиальная патология, гибридные стратегии лечения.

Введение

Согласно мировой статистике, ежегодно регистрируется порядка 6,5 миллионов первичных случаев развития ишемического инсульта [1]. Инсульт — вторая по распространенности причина смерти и одна из основных причин инвалидизации взрослого населения. При этом одним из основных этиологических факторов развития ишемического инсульта, составляющего около 20 % от всего пула причин, является окклюзия атеросклеротически измененной области бифуркации общей сонной артерии. Следует также отметить, что атеросклероз сонных артерий часто протекает бессимптомно вплоть до манифестации развернутой клинической картины инсульта. Также немало важными являются такие факторы риска, как сахарный диабет, гипертоническая болезнь, гиперлипидемия и курение значительно усугубляющие течение атеросклеротической болезни. Несмотря на то, что не у всех пациентов с атеросклеротическим поражением сонных артерий наблюдается манифестация картины ишемического инсульта, при этом, существует выраженная корреляция между степенью стеноза области бифуркации общей сонной артерии и выраженностью клинических проявлений ишемии головного мозга [2].

Под термином «клинически значимый стеноз области бифуркации общей сонной артерии» в различных источниках обозначается разная степень стеноза, однако при системном анализе вышеупомянутых работ это значение верифицировано в диапазоне от 50 до 60 %. Стоит отметить, что распространенность данной патологии в общей популяции составляет приблизительно 0,5 %–1 %, при этом, данное значение находится в прямой корреляции с возрастом, и у лиц в возрасте более 65 лет данное значение составляет уже выше 1 %. Примечательным является тот факт, что учету не подвергаются ситуации с так называемым «молчащим стенозом», достигающим порой значений обструкции области бифуркации общей сонной артерии> 70 %. При этом, учитывая, данную патологию распространенность атеросклеротического поражения сонных артерий увеличивается до 3,1 %. Говоря про прямую корреляцию распространенности вышеописанного заболевания с возрастом пациентов и учитывая системность данной патологии, очевидным становится тот факт, что изолированное поражение каротидного бассейна является крайне редкой находкой. В связи с чем актуальности набирает проблема интервенционного лечения сочетанной каротидной и кардиальной патологии [3].

В данном литературном обзоре рассмотрены основные проблемы, касающиеся диагностики и интервенционного лечения, сопутствующей каротидной и кардиальной патологии, а также приведен краткий исторический очерк по данной теме.

Исторические аспекты инвазивного лечения обструктивных поражений сонных артерий

В контексте исторического развития оценки значимости брахиоцефальных артерий в перфузии головного мозга точкой отсчета можно считать дату возведения древнегреческого Парфенона (447–438 год до нашей эры), поскольку именно на одном из барельефов Парфенона, отображающих эпизод древнегреческой мифологии, изображен кентавр сдавливающий сонную артерию латифскому войну (рис. 1).

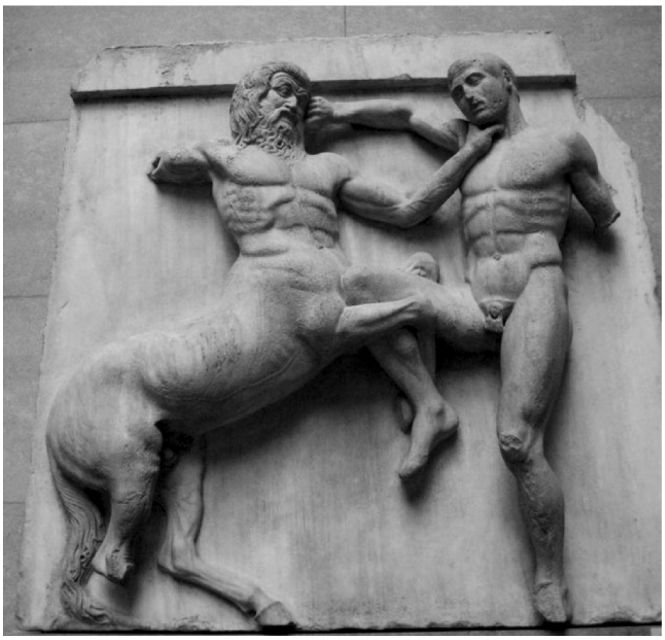


Рис. 1. Барельеф Парфенона отображающий цикл древнегреческой мифологии — битву лапифов с кентаврами или Кентавромахию

По мере увеличения общей продолжительности жизни населения земли и, как следствие, увеличения количества хронических, вялотекущих заболеваний, таких как атеросклероз, врачеватели и ученые своего времени стали активно заниматься поиском патогенетической основы развития данных состояний. Однако, принимая во внимание сложность патологических процессов, научное обоснование их развития удалось получить лишь в начале 20-го века. Так, после открытия Gowers WR и соавторов в 1875 году роли окклюзии брахиоцефальных артерий в развитии ишемического инсульта, H. Chiari в 1905 году провел систематический анализ 400 аутопсийных материалов и окончательно закрепил роль области бифуркации сонных артерий в развитии ишемии головного мозга. Данную работу по праву можно считать первым задокументированным случаем описания патофизиологии церебральной эмболии. На основании наблюдений представленных H. Chiari, J. Hunt представил серию описания клинических случаев гемипареза у пациентов на фоне прекращения пульсации сонных артерий с контралатеральной стороны поражения [4].

По-настоящему прорывной можно считать работу E. Monitz. В 1927 году он впервые представил результат церебральной ангиографии на заседании неврологического общества в Париже. Уже в 1936 году O. Sjøqvist впервые описал случай окклюзии внутренней сонной артерии (ВСА) установленной по данным ангиографии. Данная работа является отправной точкой на пути к инвазивному лечению атеросклеротического поражения ВСА, поскольку она обеспечила оперирующим хирургам возможность увидеть первопричину поражения — «я вижу причину и пойму как это лечить» [5].

Спустя почти 20 лет, в 1953 году, M. De Bakey впервые в мировой практике выполнил каротидную эндартерэктомию (КЭАЭ) из внутренней сонной артерии 53-летнему мужчине с транзиторными ишемическими атаками. Сравнительная простота и эффективность данной процедуры позволила эффективно выстроить кривую обучения для хирургов по всему миру и по праву занять место «золотого стандарта» лечения патологии ВСА на долгие годы вперед.

По мере внедрения в медицинскую практику эндоваскулярных методов лечения патологии сердца и сосудов были также предложены интервенционные методы борьбы с обструктивным поражением сонных артерий. Так, к примеру, в 1981 году K. Mathias впервые выполнил эндоваскулярную баллонную ангиопластику ВСА. Несмотря на ангиографический успех, данная процедура была признана не эффективной из-за высочайшего риска развития ишемических церебральных осложнений на фоне дефрагментации атеромы, миграции её компонентов по ходу кровотока и феномена «эластического возврата» после баллонной ангиопластики [6].

По мере поступления в клиническую практику новых имплантируемых устройств, в частности внутрисосудистых стентов, начала нарастать и публикационная активность в данной области. Так в 2001 году опубликованы результаты исследования CAVITAS. В рамках данного исследования выполнялось стентирование ВСА, однако без применения защитного устройства. Результаты вмешательства были неоспоримо лучше, чем при обычной баллонной ангиопластике, однако в значительной мере уступали КЭАЭ.

Уже в 2004 году, в рамках исследования SAPPHIRE проводилось сравнение результатов КЭАЭ и стентирования сонных артерий (СтСА) с применением защитных устройств дистального типа. Данные защитные устройства представляют собой конусообразный микрофильтр, способствующий прохождению кровотока через поры и задерживающий возможные микро- и макро-эмболы потенциально возникающие в процессе имплантации и оптимизации стента (рис. 2) [7].

Работа в данной области продолжалась и уже в 2010 году опубликованы результаты исследования CREST в которых представлены неоспоримые доказательства необходимости применения защитных устройств при выполнении эндоваскулярных вмешательств на ВСА. Стоит отметить, что именно исследования CREST и SAPPHIRE условно сопоставили эффективность КЭАЭ и СтСА и сделали их равнозначными оперативными методами борьбы с обструкцией ВСА.



Рис. 2. Устройство защиты от эмболии дистального типа

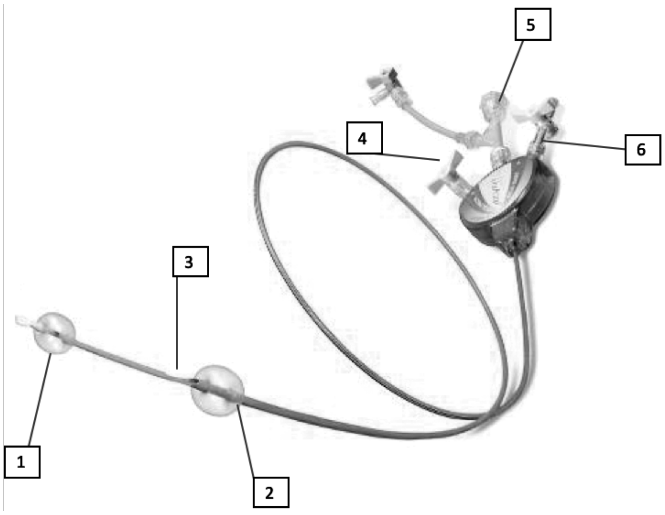


Рис. 3. Устройство защиты от эмболии проксимального типа

1 — дистальный баллон, раздуваемый в наружной сонной артерии. 2 — проксимальный баллон раздуваемого в общей сонной артерии. 3 — выводной порта рабочего канала. 4 — порт для сдувания/раздувания проксимального и дистального баллонов. 5 — гемостатический клапана. 6 — порт для промывания микротуб проксимального и дистального баллонов.

Если основополагающий метод КЭАЭ претерпел мало изменений с 1953 года, то с течением времени в арсенале эндоваскулярного хирурга продолжают появляться всё больше инструментов, потенциально способствующих улучшению результативности СтСА. Так, к примеру, в 2010 году, после клинических испытаний, было представлено новое устройство защиты проксимального типа — MO.MA (рис. 3) [8].

Принцип действия данного защитного устройства основан на реверсивном кровотоке за счет интракардиальных коллатералей и «вымыванию» потенциальных эмболов из системы внутренней сонной артерии.

Современные методы диагностики стенотических поражений ВСА

Дуплексное ультразвуковое сканирование

Являясь неинвазивным методом диагностической визуализации, дуплексное ультразвуковое сканирование представляет собой один из наиболее широко применяемых методов диагностики стенотического поражения сонных артерий. Последовательность эхо импульсов формирует отображение сканируемой области в виде «цветового» пятна, при этом градация цветовых шкал напрямую зависит от удаленности отражающего импульс объекта, что позволяет оценить кровоток в исследуемой зоне (рис. 4).

Другим распространенным методом УЗ-диагностики стенотических поражений брахиоцефальных артерий является серошкальное сканирование в В-режиме (grey-scale B-mode). При этом данный метод ориентирован на изучение анатомических особенностей исследуемой зоны, в частности зоны стеноза. Стоит отметить, что в ходе исследования участков атеросклеротического поражения сосудов с помощью данного метода отчетливо визуализируются зоны самого стеноза, также, исходя из эхогенности атеросклеротических наложений, представляется возможным оценить структуру самой бляшки с целью определения дальнейшей тактики лечения (рис. 5).

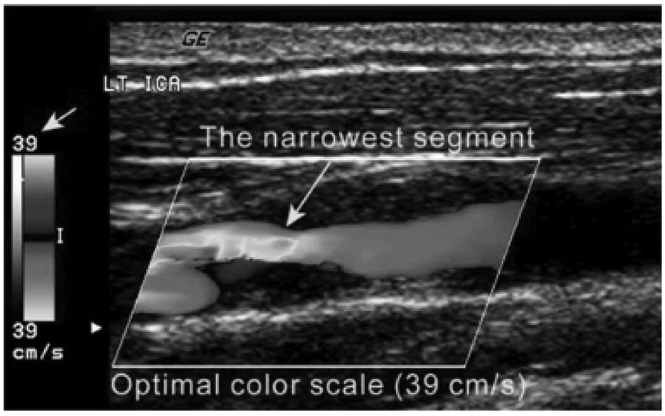


Рис. 4. Дуплексное ангиосканирование сонных артерий. Цветное доплеровское изображение, полученное с оптимальной настройкой цветовой шкалы, показывает область наибольшей скорости, которая соответствует самому узкому сегменту ВСА

Первая оценка толщины стенки сонной артерии в соотношении интима-медиа с помощью ультразвука в В-режиме и с подтверждением полученных данных по средствам гистологического исследования была выполнена в 1986 году под руководством Pignolic и соавт. С этих пор оценка толщины сосудистой стенки в соотношении интима-медиа в В-режиме позволила провести множество исследований для изучения корреляции между возникновением атеросклероза сонных артерий и такими факторами, как возраст, пол, раса, наличие/отсутствие сахарного диабета, частота пульса и вредные привычки [9].

Поскольку диагностика в В-режиме зависит от соотношения толщины интима-медиа, точное определение

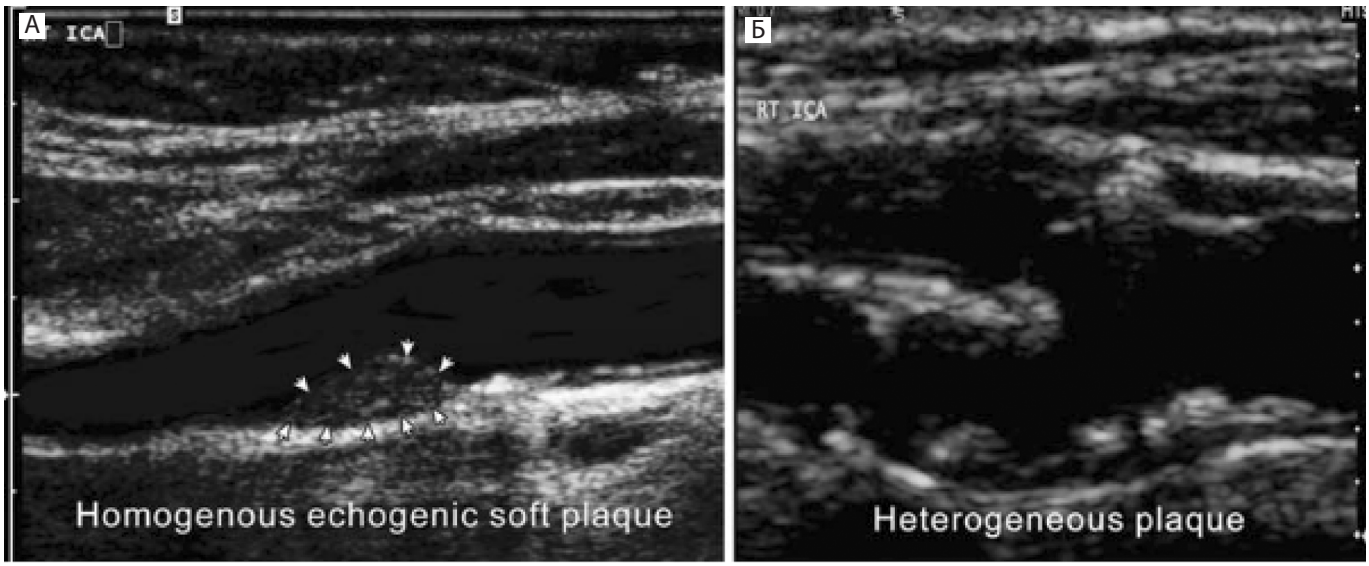


Рис. 5. Дуплексное ангиосканирование сонных артерий в В-режиме
(А) Мягкая бляшка — однородная эхогенность не обызвествленной бляшки. (Б) Неоднородная бляшка. На ультразвуковом изображении в серой шкале показана неоднородная бляшка (нестабильная бляшка) в проксимальном отделе правой ВСА.

границ стенок является основополагающим фактором в диагностике. Чтобы свести к минимуму вариативность толщины интима-медиа (в 2–4 раза) в 1994 году Selzer R. и соавт., впервые использовали автоматизированный алгоритм обнаружения краев интимы, при котором была определена точка максимальной интенсивности градиента в перпендикулярном срезе сосуда, и таким образом проведено четкое разграничение структур [9].

Мультиспиральная КТ-ангиография сонных артерий

При выполнении рутинного ангиографического исследования объемного органа получается двухмерное изображение, при этом большая часть информации теряется. Для того чтобы нивелировать этот недостаток, в 1973 году был разработан первый компьютерный томограф, который оказался в 100 раз чувствительнее традиционного рентгеновского аппарата. При КТ-ангиографии выполняется построение изображения трехмерного тела на основе срезов, а для всего трехмерного тела генерируется серия изображений — срезов (определенной толщины). С целью улучшения визуализации, при помощи программного обеспечения можно свободно выполнить трехмерную реконструкцию исследуемого сегмента из двухмерных послойных срезов (рис. 6) [10].

Оборудование КТ-ангиографа состоит из источника рентгеновского излучения, который с одной стороны облучает часть трехмерного тела и детектора, принимающего сигналы с обратной стороны. Источник и детектор вращаются вокруг тела, позволяя получить изображения срезов, и таким образом выполняют полное сканирование всего тела. КТ-ангиография позволила значительно сократить количество используемого контрастного вещества, необходимого для исследования, по сравнению с традиционной ангиографией, что стало своего рода революцией в медицинской визуализации.

По мере развития технологий обработки и анализа изображений были предложены полуавтоматические и автоматические программы анализа и построения 3D КТ-ангиографии. Так, в ходе недавно выполненного исследования, посвященного использованию автоматизированной серии КТ-ангиографий с последующим автоматическим анализом полученных результатов, была отмечена довольно высокая точность обнаружения стенозов сонных артерий, составившая порядка 75 %. При этом вначале исследователи провели нормализацию исходных изображений — срезов, а далее следовала автоматическая идентификация интересующей области, в данном случае зоны бифуркации сонных артерий в диапазоне пороговых значений плотности в 200–450 Hu и диаметра 2–6 мм соответственно, что соответствует маркировке сонной артерии. Следует также отметить,



Рис. 6. Демонстрация возможности КТ-ангиографии сонных артерий
А — трехмерная реконструкция КТ ангиографии брахицефальных артерий; Б — двухмерное изображение (продольный срез) на уровне бифуркации общей сонной артерии

что на сегодняшний день популярность набирает так называемый обратный подход, при котором до выведения сонной артерии сегментируется и удаляется область кости, при этом подходе точность проведения исследования составляет уже порядка 99 %. В будущем также планируется введение в данный протокол оценки скорости кровотока, что может еще больше повысить диагностическую эффективность КТ-ангиографии [11].

Магнитно-резонансная ангиография

На сегодняшний день МРТ-ангиография широко используется для выявления различной патологии сонных артерий. С целью повышения точности базовой методики МРТ, и удовлетворения потребности в регистрации информации о кровотоке, был разработан метод магнитно-резонансной ангиографии (МРА). При этом, чтобы добиться получения изображения движущейся крови по сосудам, и подавить статическое электрическое поле, генерируемое окружающими тканями, используется так называемая проекционная МРА-визуализация. Так в одном из крупных исследований, коллегия авторов во главе с Vanninen R, используя современные протоколы процессинга полученных данных, обнаружила, что процент выявления стеноза сонных артерий (n=55) с помощью проекционной МРА по всем актуальным критериям значительно выше, чем при стандартной «непроекционной» МРА [30]. В другом крупном исследовании Claudia Fellner и соавторы сравнивали чувствительность и специфичность методов обычной МРТ-ангиографии с МРТ-ангиографией высокого разрешения и контрастным усилением (high-resolution contrast-enhanced HRCE), а также метод контрастно усиленной 3-х мерной магнитно-резонансной ангиографии (TOF) с временным разрешением в серии у 21 пациента. По результатам исследования чувствительность всех методик по отношению к стенозам брахиоцефальных артерий составила 100 %. При этом специфичность контрастно-усиленной 3 х мерной магнитно-резонансной ангиографии (TOF) была наибольшей и составила 96,7 % в сравнении с МРТ-ангиографией высокого разрешения и контрастным усилением составившей 80,6 %. Метаанализ показал, что общая чувствительность и специфичность TOF MRA для диагностики тяжелого стеноза сонных артерий (70 % ≤ S ≤ 99 %) составляет 91,2 % и 82,3 % соответственно. Таким образом, TOF MRA является наиболее специфичной и чувствительной методикой МР диагностики стенозов брахиоцефальных артерий [12].

На сегодняшний день широкую популярность обрело использование компьютерных программ автоматизированной сегментации сосудов, что позволяет выполнить максимально точную ангиометрию. Так в исследовании под руководством Hoyos MH и соавт. в эксперименте с использованием метода сегментации волн, при котором алгоритм вычисляет распространение виртуальной волны для сегментации сосуда после ручной идентификации начальной и конечной точек трехмерной траектории, автоматическая ангиометрия показала высокий коэффициент корреляции (r= 0,99) с истинным диаметром. В другом, уже клиническом исследовании с использованием полуавтоматической сегментации и стандартной мануальной ангиометрией сонных артерий, были выявлены различные степени соответствия результатов двух вышеописанных методик. В то время как артерии со стенозом в диапазоне от 1 до 49 % были идентифицированы со 100 % соответствием результатов, анализ артерий со стенозом в диапазонах от 50 до 69 % и от 70 до 99 % показал расхождение результатов автоматизированного и ручного выявления стенозов в диапазоне от 57 %

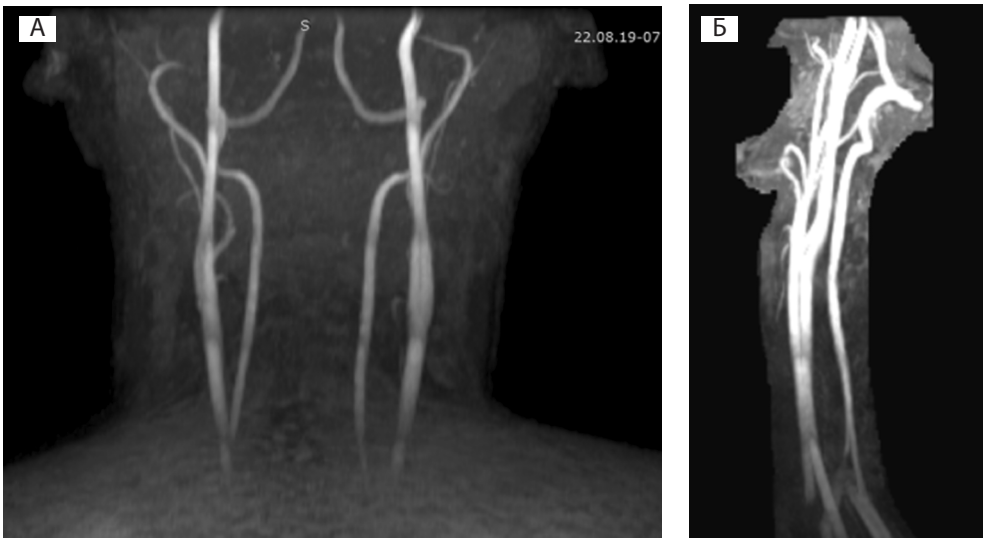


Рис. 7. Демонстрация возможности МР-ангиографии сонных артерий
А — трехмерная реконструкция МР ангиографии брахицефальных артерий; Б — двухмерное изображение (сагиттальный срез) на уровне бифуркации общей сонной артерии

до 77 %, что натолкнуло коллегию авторов на необходимость совершенствования алгоритмов автоматизированного секвенирования сосудов. Основной проблемой автоматизированных систем секвенирования сосудов и выявления стенозов явилась верификация границ стенозированного сосуда, а также непосредственно стенок самого сосуда с необходимостью их ручного указания. Для решения данной проблемы в одном из недавних исследований под руководством Gao S и соавт. была предпринята попытка, создания модели самообучающейся программы с применением контролируемого классификатора k-NN для обнаружения границы просвета сосуда, как в неизмененных артериях (n=15), так и в пораженных атеросклерозом (n=20). В эксперименте с данной программой индекс сходства между показателями ангиометрии, выполненной программным обеспечением и ручным сегментированием зонированием составил 87 %, что явилось крайне высоким показателем сходства (рис. 7) [12].

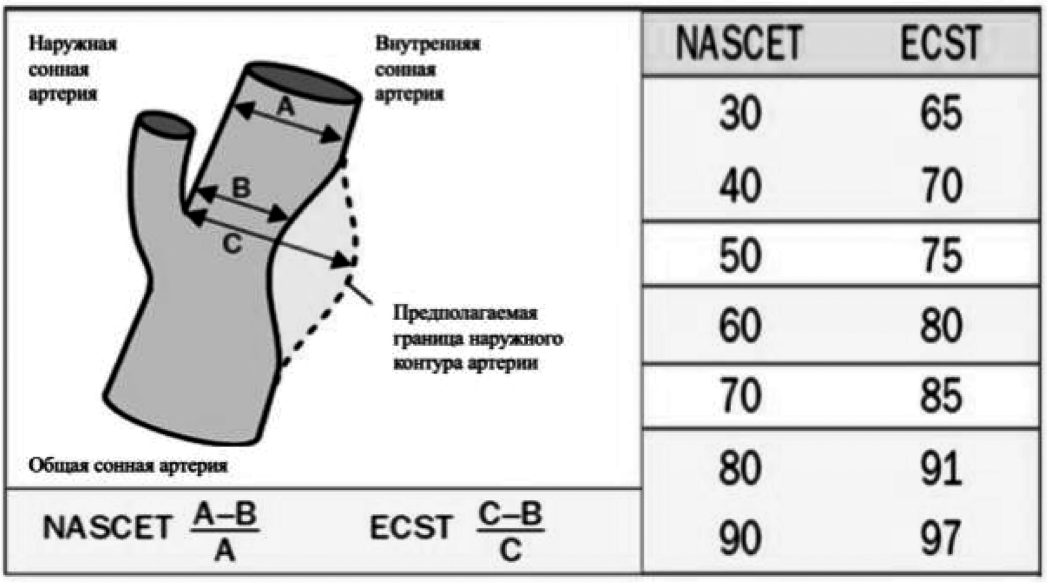
Цифровая субтракционная ангиография

Инвазивная цифровая субтракционная ангиография (ЦСА) представляет собой обработку ангиографического изображения специальным программным протоколом, позволяющим получить изолированное изображение исследуемого сосуда при использовании малых доз контрастного агента [10]. В основе данного метода лежит сопряжение двух рентгеновских серий снимков до и после введения контрастного вещества. При этом по данным актуальных исследований, в сравнении со стандартной ангиографией, цифровая субтракционная ангиография имеет значительно более высокие показатели чувствительности, специфичности и точности (95 %, 99 % и 97 % соответственно) [11]. Цифровая субтракционная ангиография активно применялась в рандомизированных исследованиях ECST (European Carotid Surgery Study) и NASET (North American Symptomatic End arterectomy Trial) сравнивающих эффективность каротидной эндартерэктомии и каротидного стентирования при умеренных (от 50 до 69 %) и выраженных (от 70 до 99 %) стенозах сонных артерий согласно критериям NASCET (рис 8.) [15].

Данное исследование нашло применение и в ФГБУ НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева, где ежегодно выполняется более 80 эндоваскулярных вмешательств при атеросклеротическом поражении внутренней сонной артерии. С целью оценки анатомии подводящих сосудов, а также для планирования операции, цифровая субтракционная ангиография применяется в качестве основного дооперационного метода диагностики. Также, применение субтракционной маски «roadmap» в значительной мере позволило сократить объем вводимого контрастного вещества, и, тем самым, снизить лучевую нагрузку на пациента и персонал [13] (рис. 9).

Оперативное лечение каротидной и сопутствующей кардиальной патологии

Говоря про патологические сужения сонных и позвоночных артерий в контексте этиологического фактора ишемического инсульта, было отмечено, что данная патология присуща взрослым слоям населения. Также был отмечен системный механизм атеросклеротического поражения сосудов, в связи с чем актуальность набирают методы интервенционной коррекции сочетанной кардиальной и каротидной патологии. Данные проблемы поднимаются в представленных раннее исследованиях. Так, в рамках исследования CREST при оценке непосредственных, средне-отдалённых и отдаленных (36 суток, 5 и 10 лет соответственно) результа-



NASCET	ECST
30	65
40	70
50	75
60	80
70	85
80	91
90	97

Рис. 8. Схематичное изображение алгоритма расчета степени стеноза ВСА по данным NASCET и ECST



Рис. 9. Ангиография сонных артерий
(А) До стентирование ВСА и ОСА (критическое сужение ВСА — отмечено стрелкой). (Б) После стентирование ВСА и ОСА

тов СтСА и КЭАЭ несмотря на практически одинаковую низкую частоту 30-дневной летальности, развития ишемического инсульта и неврологических осложнений, эндоваскулярный подход был более предпочтительной стратегией лечения у пациентов с крайне тяжелым риском при наличии коронарной патологии [14]. К аналогичному заключению приходит и коллегия авторов исследования SAPPHIRE, отдавая предпочтение интервенционным пособия при лечении стенозов ВСА у пациентов с сочетанной каротидной и кардиальной патологией. Несмотря на то, что данная проблема поднимается в таких крупных международных исследованиях, рассмотрена она скорее номинально [7].

В свою очередь, в международном регистре REACH у достаточно большого количества пациентов выявлены следующие сочетания атеросклеротических поражений: гемодинамически значимые поражения 3 артериальных бассейнов (коронарные, церебральные, периферические артерии) с характерной клинической картиной заболеваний в 3,3 % случаев, сочетанное поражение коронарных и церебральных артерий — в 8,4 %, коронарных и периферических артерий — в 11,8 %, церебральных и периферических артерий — в 3,8 % случаев [15].

Как было отмечено ранее, с увеличением возраста частота больных ишемической болезнью сердца (ИБС) и сочетанной патологией увеличивается, достигая примерного соотношения 36 случаев на 1000 пациентов старше 65 лет. В связи с чем F. Bassan и V. Azevedo опубликовали обобщённые мета-анализы литературных источников, посвященных результативности этапных и одномоментных оперативных вмешательств по устранению каротидной и кардиальной патологии. При обобщении полученных данных было выявлено, что общий показатель летальности был самым высоким (до 4,6%), у больных, перенесших одномоментное коронарное шунтирование (КШ) и каротидную эндартерэктомию, тогда как проведение КШ перед отсроченной КЭАЭ было ассоциировано с высоким риском инсульта (до 6,3 %). Ожидаемо, показатель частоты развития послеоперационного ИМ был наиболее высоким у больных, перенесших первым этапом КЭАЭ, и вторым — КШ (до 6,5 %). Суммарный показатель (смерть + ИМ + инсульт) при любом — последовательном или одновременном кардит-хирургическом подходе был в пределах 11 % [16].

Обращаясь к опыту отечественных авторов, нельзя не отметить работы ученых ФГБУ НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева МЗ РФ. В частности, работу под руководством М. Алшибая с соавторами, которые выполнили крупный сравнительный анализ одномоментной и этапной хирургической коррекции каротидной и кардиальной патологии у 130 пациентов. По результатам данной работы было отмечено, что при одномоментных хирургических вмешательствах показатель частоты периоперационного ИМ составил 4,5 %, частоты инсультов — 3,8 %, показатель летальность — 5,4 %. В свою очередь, при двухэтапных операциях, частота ИМ составила — 5,4 %, частота инсультов — 4,7 % и летальность была в пределах 6 % [17].

Также, нельзя не упомянуть работу В. Авалиани, в которой автор проводил сравнение одномоментной (n=51) и этапной (n=52) стратегии лечения у пациентов с сопутствующей каротидной и кардиальной патологией. По результатам наблюдений, частота госпитальной летальности при одномоментном подходе составила 7,8 %, в то время как при этапном — 3,8 %. В свою очередь, показатель ТИА также был выше в группе одномоментных вмешательств — 4 %, в то время как в этапной группе данный показатель составил 1,9 %. При этом показатели отдаленной выживаемости в группе этапных вмешательств по сравнению с сочетанными составили 79,1 % и 74,4 % соответственно [18].

В зарубежной литературе представлены сообщения о так называемых «гибридных» стратегиях лечения, подразумевающих эндоваскулярное стентирование ВСА с последующим выполнением операции КШ в этот же день. Так коллегия авторов во главе с M. Sahin предста-

вили результаты СтСА и КШ, выполненных в один день у 356 пациентов. Спустя календарный месяц суммарный показатель больших кардиальных и церебральных осложнений (БКЦО) составил 6,8 %, а общее число фатальных и не фатальных инсультов спустя 31 месяцев после операции составило 1,1 % (2 пациента) [19].

В одной из последних опубликованных работ, S. Micovic сравнивал результативность однодневного стнетирования ВСА+ КШ и одномоментной КЭАЭ + КШ у 20 пациентов. В группе одномоментных вмешательств (КЭАЭ+КШ) летальность отмечалась у 1 (10 %) пациента и ещё у одного пациента (10%) отмечался инвалидизирующий инсульт, при нулевых показателях осложнений в группе однодневного стентирования ВСА+ КШ [20].

Чернявский М.А с соавторами в своем исследовании опубликовали клинический случай многоэтапного лечения пациентки с комбинированным аортальным пороком, коронарной патологией и многоуровневым билатеральным поражением брахиоцефальных артерий. Первым этапом выполнена гибридная операция: каротидная эндартерэктомия из правой внутренней сонной артерии и стентирование устья правой общей сонной артерии (ОСА). Вторым этапом проведена баллонная ангиопластика со стентированием левой ОСА. Третьим — протезирование аортального клапана механическим протезом с одномоментным аортокоронарным шунтированием. Пациентка выписана в удовлетворительном состоянии. Выбранная тактика демонстрирует эффективное и безопасное выполнение коррекции гемодинамически значимых тандемных стенозов брахиоцефальных артерий, без развития неврологических осложнений в ходе лечения пациентов с кардиологической патологией [21].

По данным Бокерия Л.А. за период с 2009 по 2016 гг. было прооперировано 194 пациента с сочетанной каротидной патологией. При этом в ходе исследования коллегия авторов разделила пациентов на 2 группы: 1-я группа стентирование сонных артерий, 2-я группа — каротидная эндартерэктопия. Так в 1-ой группе 66,6 % пациентам была проведена этапная реваскуляризация миокарда, во второй группе данный ситуация наблюдалась у 44,3 % пациентов, при этом одномоментная реваскуляризация миокарда с лечением каротидной патологии наблюдалась в 1,7 % случаев. Доля выполнения эндартерэктомии увеличилась относительно 2015 г. с 69,3 до 70,6 %, в то время как частота выполнения рентгенэндоваскулярных процедур уменьшилась с 17,9 до 16,1 %. Летальность после операций на сонных артериях составила 0,58 % [22].

Заключение

Подводя итог, следует отметить, что анализ современных данных свидетельствует о том, что каротидная эндартерэктомия и стентирование сонных артерий с использованием эмболозащитных устройств представляют собой равнозначные по эффективности методы лечения изолированных обструктивных поражений внутренней сонной артерии, что подтверждается результатами крупных исследований SAPPHIRE и CREST. Однако при сочетании каротидной и кардиальной патологии выбор оптимальной стратегии лечения остается сложной клинической задачей, требующей индивидуального подхода.

Систематизация данных показывает, что одномоментные операции сопровождаются повышенным риском периоперационного инфаркта миокарда (до 6,5 %), тогда как этапные вмешательства, особенно при первичном выполнении коронарного шунтирования, ассоциированы с высоким риском инсульта (до 6,3 %). Гибридные стратегии, объединяющие эндоваскулярное стентирование сонных артерий с последующим коронарным шунтированием в один день, демонстрируют перспективные результаты с суммарным показателем осложнений около 6,8 % и низкой частотой отдаленных инсультов (1,1% через 31 месяц).

Ключевым выводом является необходимость мультидисциплинарного подхода при принятии решения о тактике лечения, учитывающего анатомические особенности поражения, сопутствующую патологию, возраст пациента и индивидуальные риски. Отсутствие крупных рандомизированных исследований, посвященных именно сочетанной патологии, определяет потребность в создании междисциплинарных протоколов и регистров пациентов с комплексной оценкой критериев отбора для определения стратегий вмешательства. Будущие исследования должны быть направлены на оптимизацию алгоритмов выбора методов реваскуляризации, учитывающих не только анатомические, но и патофизиологические характеристики атеросклеротических бляшек.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vasu S., Luis G., Dileep R. Global Epidemiology of Stroke and Access to Acute Ischemic Stroke Interventions Neurology Nov 2021, 97 DOI: 10.1212/WNL.0000000000012781
2. Benjamin E., Blaha M., Chiuve S., et al. Heart Disease and Stroke Statistics—2017 update: a report from the American Heart Association. Circulation. 2017;135(10): e146–e603.
3. Wolff T., Guirguis-Blake J., Miller T., et al. Screening for carotid artery stenosis: an update of the evidence for the U.S. preventive services task force. Ann Intern Med. 2007;147(12):860.

4. Chiari H. UeberVerhalten des Teilung-swinkels der CarotisCommunisbei der Endarteritis Chronica Deformans. VerhDtschGes Pathol.1905; 9:326
5. Moniz E. L'encephalographiearterielle, son importance dans la localisation des tumeurscerebrales. Rev Neurol.1927; 2:72–90.
6. Mathias K. Perkutane transluminale katheter behandlung supraaortaler Arterienobstruktionen. Angiology. 1981; 3:47–50.
7. Massop D., Dave R., Metzger C., et al. SAPPHIRE Worldwide Investigators. Stenting and angioplasty with protection in patients at high-risk for endarterectomy: SAPPHIRE Worldwide Registry first 2,001 patients. Catheter Cardiovasc Interv. 2009 Feb 1;73(2):129-36. doi: 10.1002/ccd.21844. PMID: 18924164.
8. Ansel G., Hopkins L., Jaff M., et al. Investigators for the ARMOUR Pivotal Trial. Safety and effectiveness of the INVATEC MO.MA proximal cerebral protection device during carotid artery stenting: results from the ARMOUR pivotal trial. Catheter Cardiovasc Interv. 2010 Jul 1;76(1):1-8. doi: 10.1002/ccd.22439.
9. Martin K. Introduction to B-mode imaging. In: Hoskins P, Martin K, Thrush A, editors. Diagnostic ultrasound: physics and equipment. 2nd ed. New York: Cambridge University Press; 2010. p. 1–10.
10. dos Santos F., Joutsen A., Paci M., et al. Automatic detection of carotid arteries in computed tomography angiography: a proof-of-concept protocol. Int J Cardiovasc Imaging. 2016; 32:1299–310. https://doi. org/10.1007/s10554-016-0880-6.
11. Kalender W. X-ray computed tomography. Phys Med Biol. 2006;51: R29–43. https://doi. org/10.1088/0031-9155/51/13/R03.
12. Gao S., van'tKlooster R., Kitslaar P., et al. Learning-based automated segmentation of the carotid artery vessel wall in dual-sequence MRI using subdivision surface fitting. Med Phys. 2017; 44:5244–59.
13. Bozkurt F., Köse C., Sarı A. An inverse approach for automatic segmentation of carotid and vertebral arteries in CTA. Expert Syst Appl. 2018; 93:358–75.
14. Mantese V., Timaran C., Chiu D., et al. CREST Investigators. The Carotid Revascularization Endarterectomy versus Stenting Trial (CREST): stenting versus carotid endarterectomy for carotid disease. Stroke. 2010 Oct;41(10 Suppl): S31-4. doi: 10.1161/STROKEAHA.110.595330.
15. Ohman E., Bhatt D., Steg P., et al. REACH Registry Investigators. The REduction of Atherothrombosis for Continued Health (REACH) Registry: an international, prospective, observational investigation in subjects at risk for atherothrombotic events-study design. Am Heart J. 2006 Apr;151(4): 786.e1-10. doi: 10.1016/j.ahj.2005.11.004.
16. Bassan F., Azevedo V., Santos A., et al. Comparison Between Treatment Strategies of Carotid Stenosis in Patients Undergoing Coronary Artery Bypass Grafting. Braz J Cardiovasc Surg. 2022 May 23;37(3):315–320. doi: 10.21470/1678-9741-2020-0425.
17. Бокерия Л.О., Работников В.С., Алшибая М.М., и соавт. Сочетанные операции АКШ и КЭАЭ монография
18. Бокерия Л.А., Авалиани В.М., Буторин С.П.. Венозные трансплантаты и новые перспективы их состоятельности в ближайшем и отдаленном периоде после аортокоронарного шунтирования. Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. 2014; 56 (1): 19–26.
19. Sahin M., Açar G., Ozkan B., et al. Comparison of short-term outcomes after carotid artery stenting according to different stent designs. PostepyKardiolInterwencyjnej. 2013;9(2):121-5. doi: 10.5114/pwki.2013.35445.
20. Mićović S., Bošković S., Sagić D., et al. Simultaneous hybrid carotid stenting and coronary bypass surgery versus concomitant open carotid and coronary bypass surgery: a pilot, feasibility study. Eur J Cardiothorac Surg. 2014 Nov;46(5):857-62. doi: 10.1093/ejcts/ezu009. Epub 2014 Feb 19.
21. Чернявский М.А., Гусев А.А., Чернова Д.В., и соавт. Этапное лечение многоуровневого поражения брахиоцефальных артерий в сочетании с коронарной и клапанной патологией сердца. Ангиология и сосудистая хирургия. 2018; 24 (2): 165–70.
22. Алекян Б.Г., Бокерия Л.А., Голухова Е.З., и соавт. Непосредственные и отдаленные результаты стентирования и каротидной эндартерэктомии у пациентов с атеросклеротическим поражением внутренней сонной артерии. Эндоваскулярная хирургия. 2021; 8 (1): 27–36. DOI: 10.24183/2409-4080-2021-8-1-27–36.

© Юлдашев Фаридун Шомуротович (faridun.yuldashev@mail.ru); Петросян Карен Валерьевич (dr.petrosian@gmail.com);
Дадабаев Гуламжан Мураджанович (dgmed83_83@mail.ru); Суладзе Владимир Георгиевич (vsuladze@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

Наши авторы

Alexandrov D. — National Research Nuclear University MEPhI, Moscow

Avdeev A. — Candidate of Medical Sciences, associate professor, Perm State Medical University named after acad. E.A. Wagner

Balter R. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Samara State Medical University

Barkhatova E. — South Ural State Medical University, Chelyabinsk

Barkhatova N. — Doctor of Medical Sciences, Professor, South Ural State Medical University, Chelyabinsk

Belov V. — postgraduate student, Russian Presidential Academy of National Economy, and Public Administration, Moscow

Belova M. — Psychiatrist, head of the branch V.A. Gilyarovsky Psychiatric Hospital of the Moscow State Medical University; Psychiatric Clinical Hospital No. 4 named after P.B. Gannushkin, Moscow

Bessarabskaya I. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow Institute of Radio Engineering, Electronics, and Automation, Russian Technological University

Birch E. — Senior Lecturer, Ulyanovsk State University

Bogatyreva V. — Postgraduate student, Omsk State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation; Rheumatologist of the Rheumatology Department of the Regional Clinical Hospital

Bogdanova E. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Volga State University of Telecommunications and Informatics, Samara

Bryutova S. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Burygina L. — Candidate of Medical Sciences, Chief Physician, Moscow; Psychiatric Clinical Hospital No. 4 named after P.B. Gannushkin, Moscow

Chebykin S. — Postgraduate student, Ulyanovsk State University

Chekulaev A. — Moscow State Academy of Veterinary Medicine, and Biotechnology named after K.I. Scriabin

Our authors

Chernobrovkina T. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Academy of Postgraduate Education, Federal State Budgetary Institution Federal Scientific, and Clinical Center for Specialized Types of Medical Care and Medical Technologies of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Moscow

Chernyaev M. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Peoples' Friendship University of Russia; Doctor of X-ray endovascular diagnostics and treatment, Federal State Budgetary Institution «NMITS TPM», Moscow

Chudopal S. — Candidate of Medical Sciences, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov. (Nalchik)

Chumak R. — Engineer, Moscow State University of Technology «Stankin»

Dadabaev G. — Candidate of Medical Sciences, Doctor, Physician, A.N. Bakulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery

Deshev A. — Assistant Professor, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov, (Nalchik)

Dobrynina T. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow City University

Dolgikh A. — Postgraduate student, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow

Evseev R. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Ulyanovsk State University

Fetaroni Malak — Postgraduate, National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow

Gerasimova E. — Graduate Student, Volga State University of Telecommunications and Informatics, Samara

Gorpinich A. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education, State University of Education, Moscow

Goryachkin B. — candidate of technical Sciences, associate Professor, Bauman Moscow State Technical University

Guliyeva G. — Radiotherapist, A.F. Tsyba MRRC, National Medical Research Radiological Center

Igumnov S. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Professor, Department of Psychiatry and Medical Psychology, Institute of Neuroscience and Neurotechnology, Pirogov Russian National Research Medical University. The city of Moscow

Ilchenko O. — Candidate of Medical Sciences, Assistant, Samara State Medical University

Istomina V. — Psychiatrist, head of the General Psychiatric Department No. 19 of the V.A. Gilyarovsky Psychiatric Hospital, a branch of the State Budgetary Healthcare Institution, Moscow; Psychiatric Clinical Hospital No. 4 named after P.B. Gannushkin, Moscow

Ivanov S. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding Member, Russian Academy of Sciences; Director, Medical Radiological Research Center named after A.F. Tsyb; Peoples' Friendship University of Russia

Ivanova T. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Samara State Medical University

Kantalinskiy-Rodin A. — Director, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow

Kapliyenko A. — Russian Technological University MIREA

Kaprin A. — Doctor of Medical Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, General Director, NMIC of Radiology of the Ministry of Health of the Russian Federation; Peoples' Friendship University of Russia; P.A. Herzen Moscow Institute of Medical Sciences, branch, Federal State Budgetary Institution NMIC of Radiology

Kardashian R. — Doctor of Medical Science, Professor, Department of Psychiatry, Psychotherapy and Psychosomatic Pathology, FNMO. Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

Katasonov D. — Research Associate, Institute of Automation and Electrometry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor, Novosibirsk State Technical University

Khannanov N. — Graduate student, Ufa University of Science and Technology

Kim A. — Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow

Klychkov M. — Engineer, Postgraduate Student, MEPhI

Kochina A. — Resident of the Department of Psychiatry, Narcology and Psychotherapy, Academy of Postgraduate Education, Federal State Budgetary Institution Federal Scientific, and Clinical Center for Specialized Types of Medical Care and Medical Technologies of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Moscow

Kondratyuk M. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Academy of Postgraduate Education, Federal State Budgetary Institution Federal Scientific, and Clinical Center for Specialized Types of Medical Care and Medical Technologies of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Moscow

Koriagin V. — Resident, Perm State Medical University named after acad. E.A. Wagner

Koriagina N. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Perm State Medical University named after acad. E.A. Wagner

Kostyuk G. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Chief Physician of the Moscow State Medical University, Psychiatric Clinical Hospital No. 1 named after N.A. Alekseev, Moscow

Kozyulina S. — Teaching Assistant, FSBEI HE Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology named after K.I. Skryabin

Krepak I. — head of information security group, Klinika Bud Zdorov LLC; post-graduate student, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow

Krikunova L. — Doctor of Medical Sciences, Professor, A.F. Tsyba MRRC, National Medical Research Radiological Center

Krynetskaya A. — Assistant, RTU MIREA, Moscow

Kucherov V. — Candidate of Medical Sciences, A.F. Tsyba MRRC, National Medical Research Radiological Center

Kuchmin V. — leading specialist, «RAKO APK» federal state budgetary educational institution of additional professional education; post-graduate student, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow

Kurbanova S. — Senior Lecturer, Ulyanovsk State University

Leontyeva T. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Litvinov S. — Graduate student, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education National Research Technological University 'MISIS'

Lomova I. — Candidate of Medical Sciences, senior research of the Research Laboratory of Cerebrovascular Pathology, Research center, Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine, EMERCOM of Russia, St. Petersburg

Mkrtchyan L. — Doctor of Medical Sciences, A.F. Tsyba MRRC, National Medical Research Radiological Center

Morova N. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Omsk State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation

Moskalev A. — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Moskaleva V. — Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

Moskalov I. — Assistant Professor, Moscow Technical University of Communications, and Informatics

Nikiforov I. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Academy of Postgraduate Education, Federal State Budgetary Institution Federal Scientific, and Clinical Center for Specialized Types of Medical Care and Medical Technologies of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Moscow

Nikishov S. — Doctor of Economics, Associate Professor, Russian Presidential Academy of National Economy, and Public Administration, Moscow

Nistratov G. — Candidate of Medical Sciences, Doctor of X-ray Endovascular diagnostics and Treatment, No. 2 branch of Oncocenter No. 1 of the S.S. Yudin State Clinical Hospital of Moscow

Onyanova T. — Perm State Medical University named after acad. E.A. Wagner

Osadchaya E. — Applicant, Samara State Medical University; International Bio Clinic IBC Russia, Samara

Ovchinnikov A. — Candidate of Economic Sciences, Tolyatti Higher Military Command and Engineering Construction School; National Research Moscow State University of Civil Engineering; Russian university of cooperation

Ovchinnikov D. — Bauman Moscow State Technical University

Papko A. — National Research Nuclear University MEPhI, Moscow

Pedich G. — Senior lecturer, FSBEI HE Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology named after K.I. Skryabin

Petrosyan K. — Doctor of Medical Sciences, doctor, A.N. Bakulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery of the Russian Ministry of Health

Petrov D. — Postgraduate Student, I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary

Petrunina A. — Senior Lecturer, Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Podoprigora V. — Candidate of Economic Sciences, assistant professor, Plekhanov Russian University of Economics; National Research Nuclear University MEPhI, Moscow

Popkov S. — Chief Specialist, Software Development Department of Web-bee LLC; Dubna State University

Popov D. — National Research Nuclear University MEPhI, Moscow

Popov D. — Postgraduate student, Surgut State University

Poroshina A. — Assistant Professor, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov (Nalchik)

Radostev E. — National Research Nuclear University MEPhI, Moscow

Romanova D. — Postgraduate Student of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov

Romanovsky P. — Russian Technological University MIREA

Romashkova O. — Doctor of Engineering, Professor, Russian Presidential Academy of National Economy, and Public Administration

Rudakov R. — graduate student, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Rusakov A. — Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Russian Technological University MIREA

Rykov S. — Doctor of X-ray endovascular diagnostics and treatment, No. 2 branch of Oncocenter No. 1 of the S.S. Yudin State Clinical Hospital of Moscow

Sabanchieva Zh. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov, (Nalchik)

Sagymbaev B. — Doctor, A.N. Bakulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery

Samborenko E. — Russian Technological University MIREA

Samoylov D. — Bauman Moscow State Technical University

Sergeev O. — Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volgograd State Medical University

Serov M. — Post-graduate student, Moscow City University

Shatalov R. — Candidate of Medical Sciences, Surgeon, State Healthcare Institution of the Oryol Region, Oryol Regional Clinical Hospital, Oryol

Shikhvintseva T. — Perm State Medical University named after acad. E.A. Wagner

Shipulin G. — Candidate of Law Sciences, Associate Professor, RTU MIREA; Associate Professor, Moscow Polytechnic University

Slesareva E. — Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, Ulyanovsk State University

Smetanin V. — Russian Technological University MIREA

Smolkina A. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Ulyanovsk State University

Sobolev D. — National Research Nuclear University MEPhI, Moscow

Soldatov A. — Doctor of Technical Sciences, Professor, Tomsk Polytechnic University; Professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

Solokhov T. — postgraduate student, Senior Lecturer, Financial University under the Government of the Russian Federation

Suladze V. — Candidate of Medical Sciences, Doctor, Cardiovascular Surgeon, A.N. Bakulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery

Tatimova E. — Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov (Nalchik)

Tikhonova M. — clinical resident, Russian Center of Neurology and Neurosciences, Moscow

Titov D. — Post-graduate student, Moscow City University, Moscow

Trushina V. — Assistant, RTU MIREA, Moscow

Trushnikova M. — Assistant professor, Perm State Medical University named after acad. E.A. Wagner

Tselkovich L. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Samara State Medical University

Tsimberov D. — Candidate of Military Sciences, associate Professors, Moscow Polytechnic University

Tsygankov N. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Ulimbasheva E. — Associate Professor, Republican Clinical Hospital (Nalchik)

Vaneeva A. — Doctor, Researcher, A.N. Bakulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery

Verezubova N. — Candidate of economic sciences, associate professor, Moscow State Academy of Veterinary Medicine, and Biotechnology named after K.I. Scriabin

Yakovleva N. — Candidate of agricultural sciences, associate professor, Moscow State Academy of Veterinary Medicine, and Biotechnology named after K.I. Scriabin

Yuldashev F. — Doctor, A.N. Bakulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery

Zagorulko A. — Candidate of Medical Sciences, Doctor of X-ray endovascular diagnostics and treatment, Doctor of Cardiovascular Surgery, No. 2 branch of Oncological Center No. 1 of the S.S. Yudin State Clinical Hospital of Moscow; Assistant Professor, Peoples' Friendship University of Russia. Patrice Lumumba, Moscow

Zhamnova M. — Moscow State Technical University names Bauman

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).