

ISSN 2223-2966



СОВРЕМЕННАЯ НАУКА:
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 11 2025 (НОЯБРЬ)

Учредитель журнала
Общество с ограниченной ответственностью
«НАУЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Журнал издается с 2011 года.

Редакция:

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

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

Издатель:

Общество с ограниченной ответственностью
«Научные технологии»

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

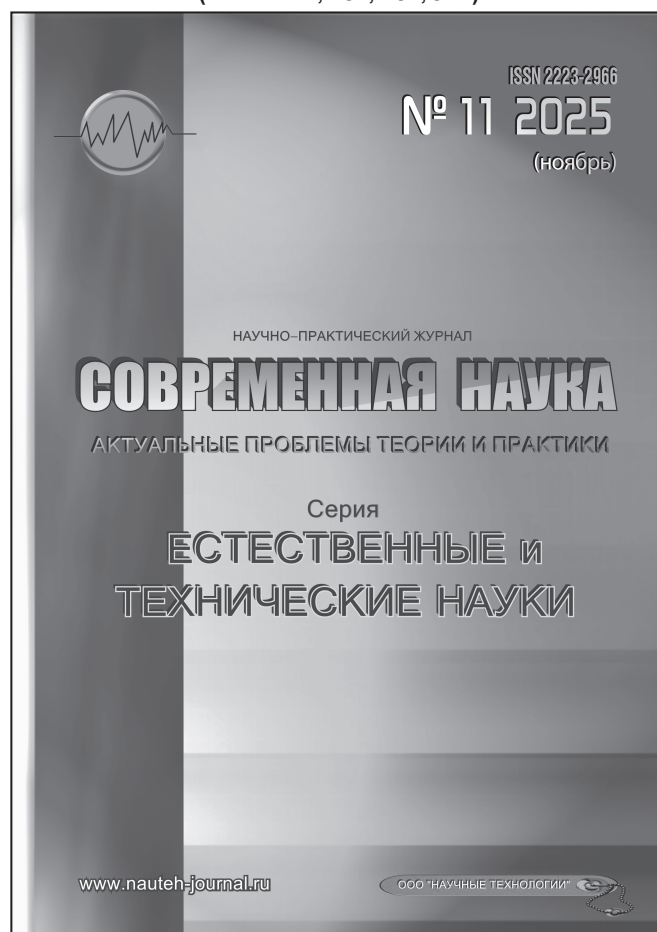
Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия.

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

Научно-практический журнал

Scientific and practical journal

(БАК — 1.1.2, 1.5.x, 2.3.x, 3.1.x)



В НОМЕРЕ:

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

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

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

Журнал отпечатан в типографии
ООО «КОПИ-ПРИНТ» тел./факс: (495) 973-8296
Подписано в печать 10.11.2025 г. Формат 84x108 1/16
Печать цифровая Заказ № 0000 Тираж 2000 экз.

ISSN 2223-2966



Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Общая биология

Бутырская Т.С., Маринина И.А. —

Редактирование генома методом CRISPR/Cas
в медицинской генетике

Butyrskaya T., Marinina I. — Genome editing by the
CRISPR/Cas method in medical genetics.7

Николаев Д.В. — Оценка экологических
последствий интродукции экзотических
представителей семейства Pinaceae на юге
Сахалина: влияние на аборигенные экосистемы,
почвенные характеристики и биоразнообразие
Nikolaev D. — Assessment of the ecological
consequences of the introduction of exotic
representatives of the family Pinaceae in the south
of Sakhalin: impact on native ecosystems, soil
characteristics, and biodiversity.12

Польских С.В., Грызлов В.А. — Новый подход
интенсивного культивирования грибов для ЦЧР:
проблема и решение. пути использования отходов
в животноводстве

Poliskikh S., Gryzlov V. — A new approach to intensive
grain-based fungus cultivation for CCT: problem
and solution. ways of using waste in animal
husbandry20

Уранова В.В., Сальникова Д.А., Ломтева Н.А. —

Определение тяжелых металлов и мышьяка
в растительном сырье, культивируемом
на территории Астраханской области на примере
рода *Scutellaria*

Uranova V., Salnikova D., Lomteva N. — Determination
of heavy metals and arsenic in plant raw materials
cultivated in the Astrakhan region using the example
of the genus *Scutellaria*.24

Информатика, вычислительная техника и управление

Азаб Мохамед Абдалла Эльсайед,

Сила А.С., Коржук В.М. — Интегрированная
и масштабируемая система управления ЭКГ-
данными и адаптивного обнаружения R-волн

Azab Mohamed Abdalla Elsayed, Sila A., Korzhuk V. —
Integrated and scalable system for ECG data
management and adaptive R-wave detection28

Андреев А.В. — Улучшение генерации положения
захвата с помощью GGCNN и метода главных
компонент

Andreev A. — Improving grasp pose generation using
GGCNN and principal component analysis35

Байыр Д.Б., Дулесов А.С., Тугар-оол Э.Ч.,

Ооржак Ч.К., Хойлаарак З.К. — Некоторые
аспекты анализа состояния и надежности сложных
технических систем

*Bayyr D., Dulosov A., Tugar-ool E., Oorzhak Ch.,
Hoylaarak Z.* — Some aspects of the analysis
of the condition and reliability of complex technical
systems43

Зиновьев А.Н. — Системы поддержки принятия
решений для проектно-технологической компании
Zinoviev A. — Decision support systems for a design
and technology company.48

Ильин Р.Д., Никишов С.И. — Интеграция систем
управления проектами и разработкой ПО

Ilyin R., Nikishov S. — Integration of project
management and software development
systems52

Караваяев В.С., Тарасьев А.А. — Оценка
востребованности специальностей на рынке
труда в условиях переменной профессиональной
мобильности

Karavaev V., Tarasyev A. — Assessment of the demand
for specialties in the labor market in conditions of
variable professional mobility.57

Куровский С.В., Мишин Д.А., Рейн Т.С. — Методы
защиты цифрового мультимедийного контента
от фальсификации на основе стеганографии
и технологий искусственного интеллекта

Kurovsky S., Mishin D., Rein T. — Methods of protecting
digital multimedia content from counterfeiting
based on steganography and artificial intelligence
technologies64

Ледовская Е.В. — Математическое моделирование в свёрточных нейронных сетях: базовые принципы и открытые вопросы

Ledovskaya E. — Mathematical modeling in convolutional neural networks: basic principles and open questions70

Мишин Д.А., Куровский С.В., Трунькин А.Н. —

Разработка архитектуры интеллектуальной системы поддержки принятия решений для государственных компаний на основе интеграции предиктивных моделей и Big Data Analytics

Mishin D., Kurovsky S., Trunkin A. — Development of the architecture of an intelligent decision support system for state-owned companies based on the integration of predictive models and Big Data Analytics77

Неволин Ф.Д., Ромашкова О.Н. — Модель и методика взаимодействия для системы управления ИТ-инфраструктурой холдинговых компаний

Nevolin F., Romashkova O. — Model and methodology of interaction for the IT-infrastructure management system of holding companies83

Палванов М.Р., Уварова Л.А. — Влияние критических эффектов на распространение акустических волн в двухфазных системах

Palvanov M., Uvarova L. — The influence of critical effects on acoustic wave propagation in two-phase systems89

Пантелеев М.Г., Литягин С.М. — Архитектура среды имитационного моделирования многоагентных систем реального времени в задачах командного противодействия

Panteleyev M., Lityagin S. — Architecture of a simulation environment for real-time multi-agent systems in the task of team opposition93

Пахوليук В.В., Крепак И.П. — Современные подходы к обеспечению информационной безопасности образов виртуальных машин в облачных инфраструктурах

Pakholiuk V., Krepak I. — Modern approaches to ensuring the security of virtual machine images in cloud infrastructures99

Серезлеев Д.С., Абаев Ю.К. — Алгоритмизация агента искусственного интеллекта для автоматизированной валидации внутрикорпоративной документации

Serezleev D., Abaev Yu. — Algorithmization of an ai agent for automated validation of intracorporate documentation. 103

Степанов М.А. — Модель цифрового следа обучающегося в индивидуальной образовательной траектории студента

Stepanov M. — Model of a student's digital track in an individual student's educational trajectory. . 108

Суперекин И.Ю., Осоркина М.А. — Эволюция цифрового суверенитета в государственном управлении: сравнительный анализ облачных стратегий

Superekin I., Osorkina M. — The evolution of digital sovereignty in public governance: a comparative analysis of cloud strategies. 113

Тырышкин С.Ю. — Конволюционный нейросетевой подход для обнаружения и определения характеристик неисправностей в управляющих системах

Tyryshkin S. — A convolutional neural network-based approach for fault detection and characterization in control systems. 126

Чуднов И.И., Ромашкова О.Н. — Модели ресурсоэффективной дистилляции трансформеров для сохранения критических знаний в задачах NER

Chudnov I., Romashkova O. — Models of resource-efficient distillation of transformers for preserving critical knowledge in NER tasks 132

Шмелев О.С., Бутаков В.А., Трифонов С.В. — Сравнительный анализ беспроводных технологий для распределенного мониторинга в системах контролируемого выращивания растений

Shmelev O., Butakov V., Trifonov S. — Comparative analysis of wireless technologies for distributed monitoring in controlled plant growth systems... 137

Яковлева О.А., Вerezубова Н.А.,

Кишкинова О.А. — Потенциальные инциденты нарушения кибербезопасности сквозь призму этических принципов работы с информацией
Yakovleva O., Verezubova N., Kishkinova O. — Potential incidents of cybersecurity violations through the lens of ethical principles of working with information . 144

Клиническая медицина

Беломестнов С.Р., Пичугова С.В., Чумарная Т.В., Севостьянова О.Ю., Щепкин Д.В., Ксенофонтов А.М. — Ультраструктурные особенности митохондрий синцитиотрофобласта при гестационном сахарном диабете
Belomestnov S., Pichugova S., Chumarnaya T., Sevostyanova O., Shchepkin D., Ksenofontov A. — Ultrastructural features of syncytiotrophoblast mitochondria in gestational diabetes mellitus . . . 149

Борисова Е.П., Горшенина М.С. — Влияние генно-инженерной биологической терапии на течение тяжелой бронхиальной астмы на примере клинического случая
Borisova E., Gorshenina M. — Influence of genetic engineered biological therapy on the course of severe bronchial asthma on the example of a clinical case . . . 155

Галимов Р.Р., Молчанов А.Н., Горгун А.Г., Павлов П.И. — Сравнительная эффективность радиочастотных моноэлектродных и мультиэлектродных систем для денервации почечных артерий при резистентной артериальной гипертензии: результаты 6 месячного наблюдения
Galimov R., Molchanov A., Gorgun A., Pavlov P. — Comparative effectiveness of radiofrequency monoelectrode and multielectrode systems for renal artery denervation in resistant arterial hypertension: results of a 6-month follow-up . . . 158

Гаулика С.О., Молчанов А.Н., Моргунов Д.П. — Результаты в средне-отдалённом послеоперационном периоде влияния постоянной эндокардиальной желудочковой стимуляции на структурно-геометрические параметры сердца при атриовентрикулярных блокадах
Gaulika S., Molchanov A., Morgunov D. — Midterm effects of permanent endocardial ventricular pacing on cardiac structural and geometric parameters in atrioventricular block . . . 164

Гураль А.К., Усынин Е.А., Бощенко В.С., Мустафаев А.Т., Роговская Ю.В. — Фотодинамическая терапия в лечении немышечно-инвазивного рака мочевого пузыря
Gural A., Usynin E., Boshchenko V., Mustafayev A., Rogovskaya Yu. — Photodynamic therapy in the treatment of non-muscle-invasive bladder cancer . . . 169

Каганов О.И., Фролов С.А., Блинов Н.В., Окулевич Н.Б. — Возможности позитронно-эмиссионной томографии для оценки ответа рака прямой кишки на химиолучевую терапию
Kaganov O., Frolov S., Blinov N., Okulevich N. — Efficiency of positron emission tomography in prediction of response after chemoradiotherapy for rectal cancer . . . 175

Карданова М.Х., Идрисова Л.С., Карданова А.З., Джамбекова З.М., Тлупова А.А., Гусейнова Н.Р. — Опыт пациенток при гинекологических процедурах: восприятие боли и роль анестезии
Kardanova M., Idrisova L., Kardanova A., Zhambekova Z., Tlupova A., Guseinova N. — Women's experience with gynecological procedures: pain perception and the role of anesthesia . . . 180

Кривохижин И.В., Парсаданян А.М. — Прогностические критерии, определяющие полный патоморфологический ответ при проведении неоадьювантной терапии HER2+ рака молочной железы
Krivokhizhin I., Parsadanyan A. — Prognostic criteria determining a complete pathomorphological response during neoadjuvant systemic therapy of HER2+ breast cancer». . . 184

Магомедов А.-А.М., Рамазанов М.Р., Магомедов М.А., Абдурахманова З.М. — Гемоциркуляторные показатели при кишечной непроходимости в критической зоне Р. Судека и профилактика спайкообразования после лапароскопических операций
Magomedov A.-A., Ramazanov M., Magomedov M., Abdurakhmanova Z. — Hemocirculatory parameters in intestinal obstruction in the critical zone of P. Sudeck and prevention of adhesions after laparoscopic surgeries . . . 190

Матин Абдул, Никитин И.Г. — Клинические предикторы и факторы риска антитуберкулезного лекарственно-индуцированного поражения печени у пациентов с ко-инфекцией ВИЧ/туберкулез
Matin Abdul, Nikitin I. — Clinical predictors and risk factors of anti-tuberculosis drug-induced liver injury in patients with HIV/tuberculosis co-infection . . . 194

Попова А.Г., Скляр Б.А., Мачалин П.А., Карданов А.М., Скобелева А.А. — Врожденная аномалия развития мочевыводящих путей

Popova A., Sklyarov B., Machalin P., Kardanov A., Skobeleva A. — Congenital malformation urinary tract 200

Поспелов А.Н., Кречетов С.А., Ермилин Д.Р., Аверина К.М. — Окклюзионные изменения в зубных рядах при генерализованной повышенной стираемости твердых тканей зубов в зависимости от типа прикуса
Pospelov A., Kretchetov S., Yermilin D., Averina K. — Occlusal changes in the dentition with generalized increased abrasion of the hard tissues of the teeth, depending on the type of bite 205

Рухляда Н.Н., Россолько Д.С., Прохорович Т.И., Либова Т.А., Воробцова И.Н. — Фокусированная ультразвуковая абляция в лечении миомы матки. Литературный обзор
Rukhlyada N., Rossolko D., Prokhorovich T., Libova T., Vorobtsova I. — Focus ultrasonic ablation in the treatment of uterine fibroids a literature review. . . 212

Симанов И.В. — Особенности течения «гестационного» процесса в зависимости от срока появления и степени тяжести преэклампсии
Simanov I. — Features of the course of the «gestational» process depending on the time of appearance and severity of preeclampsia 217

Султанова О.Э., Чернышева Е.Н., Чивиргина Т.В., Исхаков С.А., Сулейманова З.В., Сугалиев Д.Р. — Коррекция образа жизни и психоэмоционального статуса у пациентов с высоким риском возникновения острого коронарного синдрома на фоне синдрома недифференцированной дисплазии соединительной ткани
Sultanova O., Chernysheva E., Chivirgina T., Iskhakov S., Suleymanova Z., Sugaliyev D. — Lifestyle modification and psychoemotional status correction in patients at high risk of acute coronary syndrome against the background of undifferentiated connective tissue dysplasia syndrome 221

Тхазаплизева М.Т., Батырбекова Ф.Р., Карданова Л.В., Шхагапсоева К.А., Карданова К.Х. — Оценка эффективности лечения пациентов с хроническим катаральным гингивитом путем включения в комплексную терапию озвученного 0,05% раствора хлоргексидина биглюконата
Tkhazaplizheva M., Batyrbekova F., Kardanova L., Shkhagapsoeva K., Kardanova K. — Evaluation of the effectiveness of patient treatment with chronic catarrhal gingivitis by including the announced 0.05% solution of chlorhexidine bigluconate in complex therapy 227

Наши авторы 231

РЕДАКТИРОВАНИЕ ГЕНОМА МЕТОДОМ CRISPR/CAS В МЕДИЦИНСКОЙ ГЕНЕТИКЕ

GENOME EDITING BY THE CRISPR/CAS METHOD IN MEDICAL GENETICS

**T. Butyrskaya
I. Marinina**

Summary. The article is devoted to the modern achievements in genome editing using the CRISPR/Cas system and assesses its potential applications in medical genetics. The paper describes the fundamental principles of the CRISPR/Cas9 mechanism, including the interaction between guide RNA and DNA target sites and the function of Cas endonuclease. A review of studies from 2014 to 2025 is presented, focusing on technological improvements such as Cas12, Cas13, and prime editing systems. Particular attention is paid to the clinical outcomes of CRISPR/Cas-based therapies for hereditary blood disorders, the molecular mechanisms underlying precise DNA modification, and the role of this system in creating new therapeutic strategies. Additional emphasis is placed on the potential of this technology in treating ophthalmological and neurodegenerative diseases, as well as its emerging role in mitochondrial genome correction. The article discusses current challenges related to editing accuracy, delivery systems for target cells, and the ethical and legal aspects of medical implementation. It concludes that CRISPR/Cas represents a highly promising tool for personalized gene therapy, offering innovative strategies for treating genetic diseases while maintaining biosafety and ethical principles.

Keywords: CRISPR/Cas9, genome editing, medical genetics, gene therapy, hereditary diseases, prime editing, ethics, personalized medicine.

Бутырская Татьяна Семеновна

канд. биол. наук, доцент,

Российский государственный социальный университет

tbutyrskaya99@gmail.com

Маринина Инна Александровна

канд. биол. наук, доцент,

Российский государственный социальный университет

marinina-inna@bk.ru

Аннотация. Статья посвящена анализу современных достижений в области редактирования генома методом CRISPR/Cas и оценке перспектив его применения в медицинской генетике. Рассмотрены основные принципы действия системы CRISPR/Cas9, включая механизм взаимодействия направляющей РНК с целевыми участками ДНК и функции эндонуклеазы Cas. Проведён обзор исследований 2014–2025 годов, направленных на совершенствование технологии, включая разработку модификаций Cas12, Cas13 и систем «прайм-редактирования». Особое внимание уделяется клиническим результатам применения технологии при лечении наследственных заболеваний крови, анализу молекулярных механизмов, лежащих в основе точечного редактирования ДНК, а также роли CRISPR/Cas в разработке инновационных терапевтических стратегий. Дополнительно рассматриваются возможности использования CRISPR/Cas в терапии офтальмологических и нейродегенеративных патологий, а также новые подходы к коррекции мутаций в митохондриальном геноме. Обсуждаются актуальные проблемы точности редактирования, методы доставки системы в клетки-мишени, а также этические и правовые аспекты использования технологии в медицине. Сделан вывод о высокой перспективности CRISPR/Cas как инструмента персонализированной генной терапии, способного обеспечить новые подходы к лечению наследственных заболеваний при условии соблюдения принципов биобезопасности и этических норм.

Ключевые слова: CRISPR/Cas9, редактирование генома, медицинская генетика, генная терапия, наследственные заболевания, прайм-редактирование, этика, персонализированная медицина.

Введение

Современная медицинская генетика находится на этапе стремительного развития, связанного с внедрением технологий направленного редактирования генома. Одним из наиболее значимых инструментов этого направления стала система CRISPR/Cas (Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats / CRISPR-associated proteins), которая за последние годы заняла ключевое место в молекулярной биологии. Она позволяет вносить точечные изменения в нуклеотидную последовательность ДНК, воспроизводя естественные механизмы бактериального иммунитета против вирусов [11, с. 5430]. Простота, универсальность и высокая эф-

фективность сделали технологию CRISPR/Cas неотъемлемой частью современной биомедицины.

В отличие от ранних подходов — таких как цинковые нуклеазы (ZFN) и системы TALEN — метод CRISPR/Cas использует направляющую РНК, которая обеспечивает точное связывание фермента Cas с целевым участком ДНК, делая процесс редактирования более гибким и экономичным [9, с. 14]. В последние годы были созданы усовершенствованные варианты Cas-ферментов (Cas12, Cas13, CasΦ) и разработаны технологии «мягкого редактирования» — *base editing* и *prime editing*, позволяющие изменять нуклеотиды без разрыва ДНК-цепи, что повышает точность и безопасность редактирования [6, с. 826].

Актуальность темы обусловлена тем, что свыше 10 000 заболеваний человека имеют наследственную природу, а их терапия остаётся ограниченной. Технология CRISPR/Cas открывает возможности точечной коррекции мутаций, восстановления функций генов и создания модельных систем заболеваний для тестирования новых подходов к терапии [2, с. 415]. За последние пять лет проведены клинические исследования, подтвердившие эффективность применения CRISPR/Cas при лечении наследственных болезней крови, офтальмологических патологий и некоторых онкогенетических состояний [1, с. 99].

Целью настоящего исследования является анализ принципов функционирования системы CRISPR/Cas, рассмотрение её применения в медицинской генетике, а также оценка перспектив и ограничений использования технологии в клинической практике.

Материалы и методы

Исследование современных направлений редактирования генома в медицинской генетике проводилось на основе анализа научных публикаций, посвящённых молекулярным механизмам систем CRISPR/Cas и их применению в терапии наследственных заболеваний. В работе использованы данные из ведущих международных изданий (*Science*, *Nature*, *Nature Medicine*) за 2014–2025 гг. [7, с. 1710].

Особое внимание уделялось системам CRISPR/Cas9, Cas12a и Cas13, которые различаются механизмом действия и уровнем специфичности. Эти комплексы включают направляющую РНК и фермент Cas, осуществляющий разрез целевого участка ДНК, после чего запускаются клеточные механизмы репарации, приводящие к изменению нуклеотидной последовательности [5, с. 149].

Для медицинской генетики ключевое значение имеет доставка CRISPR-компонентов в клетки-мишени. Наиболее распространены вирусные векторы (аденоассоциированные вирусы, лентивирусы) и невирусные системы — липидные наночастицы, электропорация. Каждый подход имеет преимущества и ограничения: вирусные векторы обеспечивают высокую эффективность, но могут вызывать иммунный ответ, тогда как невирусные методы безопаснее, однако требуют оптимизации условий трансфекции [14, с. 204].

Методологическая база исследования основана на систематическом обзоре публикаций, охватывающих как фундаментальные, так и прикладные аспекты технологии CRISPR/Cas, что позволило оценить её перспективы для медицинской практики.

Литературный обзор

Первые сведения о необычных повторяющихся участках в геноме бактерий были опубликованы в 1987 году японским исследователем Ё. Ишино и соавторами, которые при изучении гена *IAP* у *Escherichia coli* обнаружили короткие палиндромные повторы, разделённые уникальными фрагментами [11, с. 5430]. В последующие годы аналогичные структуры были выявлены у различных прокариот, однако их функция долгое время оставалась неясной. Лишь в 2007 году было установлено, что эти участки формируют часть адаптивной иммунной системы, обеспечивающей бактериям защиту от бактериофагов [7, с. 1710].

Прорывным моментом стало исследование Дж. Дудны и Э. Шарпантье, впервые продемонстрировавшее возможность целенаправленного разрезания ДНК с использованием системы CRISPR/Cas9 [9, с. 12]. Это открытие положило начало новой эпохе в молекулярной биологии, позволив проводить редактирование генома с высокой точностью и воспроизводимостью. В дальнейшем Ф. Чжан и соавторы адаптировали систему для клеток млекопитающих, что сделало её универсальным инструментом медицинской генетики [15, с. 1475].

С 2015 года активно развиваются модификации Cas12, Cas13 и *prime editing*, позволяющие заменять нуклеотиды без образования двойных разрывов ДНК, что существенно повысило безопасность метода [6, с. 828]. Наибольшие успехи последних лет связаны с клиническим применением технологии, включая терапию серповидноклеточной анемии и β -талассемии в рамках программы CTX001 [14, с. 201].

Широкое развитие получила также CRISPR-терапия в онкогенетике и вирусологии. Исследования показали, что системы Cas13 эффективны для подавления онкогенных РНК и ингибирования вирусов ВИЧ и SARS-CoV-2 в клеточных моделях [4, с. 865]. Это подтверждает перспективы использования CRISPR/Cas в разработке новых противовирусных и противоопухолевых подходов [12, с. 1241].

Особое внимание в последние годы уделяется этическим и правовым аспектам применения CRISPR/Cas. После известного случая редактирования человеческих эмбрионов в Китае в 2018 году [8, с. 442] мировое научное сообщество выступило за ужесточение контроля и разработку международных биоэтических норм. Российские и зарубежные исследователи подчёркивают важность правового регулирования, направленного на обеспечение безопасности и предотвращение злоупотреблений при использовании технологии в клинике [3, с. 416].

В российских исследованиях последних лет акцент делается на вопросах биобезопасности, этического регулирования и создания законодательной базы в области геномных технологий. Учёные подчёркивают необходимость оптимизации систем доставки CRISPR-комплексов и контроля внецелевых эффектов, что является условием безопасного клинического применения [1, с. 97]. В этот контекст вписываются работы, посвящённые разработке единых биоэтических стандартов при использовании методов редактирования генома [3, с. 417].

Таким образом, за последнее десятилетие CRISPR/Cas прошла путь от фундаментального открытия до реального клинического применения. Современные исследования направлены на повышение точности редактирования, минимизацию внецелевых эффектов и формирование этических стандартов ответственного использования технологии в медицине.

Результаты

Применение технологии CRISPR/Cas в медицинской генетике за последнее десятилетие привело к значительным достижениям как в фундаментальных, так и в клинических исследованиях. Система доказала эффективность при коррекции мутаций, моделировании патологий и изучении механизмов наследственных заболеваний [6, с. 832].

Одним из первых успешных направлений стало использование CRISPR/Cas9 при лечении наследственных заболеваний крови. В рамках программы CTX001 (CRISPR Therapeutics и Vertex Pharmaceuticals) проведено редактирование гемопоэтических стволовых клеток у пациентов с β -талассемией и серповидноклеточной анемией. После трансплантации скорректированных клеток достигнута устойчивая ремиссия без выраженных побочных эффектов, что подтвердило безопасность и клиническую применимость технологии [14, с. 205].

Эффективность CRISPR/Cas показана и в лечении офтальмологических патологий. Клинические испытания 2020–2022 гг. при наследственном амаврозе Лебера выявили улучшение зрительных функций у пациентов после локального введения CRISPR-комплекса в клетки сетчатки [13, с. 329]. Эти данные свидетельствуют о реальных возможностях генной терапии в офтальмологии.

В онкогенетике система CRISPR применяется для создания клеточных моделей и изучения мутаций, участвующих в канцерогенезе. Моделирование изменений в генах *TP53*, *KRAS*, *BRCA1* позволило уточнить роль ключевых мутаций и протестировать коррекцию онкогенных дефектов методами *base editing* и *prime editing*, не вызывающими разрывов ДНК [5, с. 150]. Перспективным направлением остаётся подавление вирусных

инфекций. Системы Cas13a и Cas13d показали высокую эффективность при ингибировании репликации вируса иммунодефицита человека и SARS-CoV-2 [4, с. 872]. Эти результаты стали основой для разработки антивирусных платформ нового поколения.

Значимые успехи отмечены и в создании безопасных систем доставки CRISPR-комплексов. Применение липидных наночастиц и модифицированных вирусных векторов повысило эффективность трансфекции при снижении цитотоксичности. В 2022 г. Zhang и соавт. сообщили о нанокапсулах, способных направленно доставлять CRISPR-комплексы в клетки печени, что открывает перспективы терапии наследственных гепатопатий [15, с. 1479]. Основные показатели эффективности редактирования представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Классификация эффективности редактирования генома системой CRISPR/Cas по степени точности и специфичности

Показатель эффективности редактирования	Качественная характеристика результата
0,91–0,99	Высокая точность, минимальные внецелевые эффекты
0,71–0,90	Тесная специфичность, редкие побочные разрезы
0,51–0,70	Умеренная точность, возможны единичные мутации
0,31–0,50	Сниженная специфичность, требует оптимизации направляющей РНК
0,11–0,30	Низкая эффективность, высокая вероятность внецелевого действия
0–0,10	Отсутствие достоверного редактирования

На рисунке 1 схематично представлен механизм действия системы CRISPR/Cas9 в клетке.

В совокупности накопленные данные подтверждают, что CRISPR/Cas — один из наиболее перспективных инструментов современной медицины. Успешные примеры лечения генетических заболеваний и развитие безопасных систем доставки позволяют рассматривать эту технологию как основу будущих персонализированных терапевтических стратегий.

Обсуждение

Несмотря на значительный прогресс в области редактирования генома, применение технологии CRISPR/Cas в медицинской генетике всё ещё сопряжено с рядом методологических, технических и этических ограничений. Главной задачей остаётся повышение точно-



Рис. 1. Механизм действия системы CRISPR/Cas9 при редактировании генома

сти редактирования, поскольку побочные изменения (off-target эффекты) могут вызывать непредсказуемые мутации и повышать риск онкогенных трансформаций [3, с. 826]. Для минимизации подобных эффектов были предложены усовершенствованные варианты ферментов Cas — eSpCas9, НупаCas9 и Cas12f, отличающиеся сниженной активностью вне целевого участка [6, с. 830].

Перспективным направлением является развитие технологий «мягкого редактирования» — *base editing* и *prime editing*, которые позволяют корректировать отдельные нуклеотиды без разрыва цепи ДНК. Эти методы обеспечивают стабильные результаты при лечении моногенных заболеваний, включая серповидноклеточную анемию и β -талассемию [5, с. 152; 10, с. 254].

Не менее важной проблемой остаётся доставка CRISPR-комплексов в клетки-мишени. Вирусные векторы (аденоассоциированные, лентивирусы) демонстрируют высокую эффективность переноса, но могут вызывать иммунный ответ, тогда как невирусные системы — липидные наночастицы и электропорация — обладают меньшей токсичностью, но требуют оптимизации. Последние исследования показывают, что многофункциональные нанокapsулы способны направленно доставлять CRISPR-комплексы в ткани печени, повышая эффективность терапии наследственных заболеваний [15, с. 1478].

Наряду с техническими аспектами актуальны этические и правовые вопросы. После скандала с редактированием эмбрионов человека в Китае в 2018 году

международное сообщество выдвинуло требования по ужесточению контроля и формированию единых биоэтических норм [8, с. 441]. В России также обсуждаются принципы законодательного регулирования в области геномных технологий и обеспечения биобезопасности.

Таким образом, успешное внедрение CRISPR/Cas в клиническую медицину требует комплексного подхода, включающего совершенствование методов доставки, повышение точности редактирования, а также развитие международных этических и правовых стандартов, гарантирующих безопасное применение технологии в персонализированной терапии.

Заключение

Анализ современных исследований показал, что технология CRISPR/Cas является одним из наиболее перспективных инструментов медицинской генетики. Возможность точечного редактирования генома открывает новые подходы к лечению наследственных заболеваний, ранее считавшихся неизлечимыми. С момента открытия CRISPR/Cas9 в 2012 году технология прошла путь от лабораторных экспериментов до клинических испытаний, подтвердивших её эффективность.

Наибольшие успехи достигнуты при коррекции мутаций, вызывающих моногенные патологии — серповидноклеточную анемию, β -талассемию, дистрофию Дюшенна, а также при терапии офтальмологических и вирусных заболеваний, включая ВИЧ и SARS-CoV-2.

Тем не менее остаются нерешёнными вопросы, связанные с точностью редактирования, безопасностью доставки и этическим регулированием применения технологии. Дальнейшее развитие возможно лишь при взаимодействии учёных, клиницистов и экспертов по биоэтике.

В перспективе CRISPR/Cas станет основой персонализированной медицины, обеспечивая индивидуальный генетический подход к профилактике и терапии наследственных заболеваний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В.Н. Геномные технологии в медицине: перспективы и правовое регулирование в России // Российский медико-биологический вестник им. акад. И. П. Павлова. 2023. № 2. С. 97–105.
2. Костюченко И.А. Редактирование генома человека и этические проблемы современной медицины // Вестник Российской академии медицинских наук. 2021. Т. 76. № 5. С. 414–422.
3. Костюченко И.А. Биоэтические аспекты внедрения технологий редактирования генома в клинику // Медицинская генетика. 2022. Т. 21. № 4. С. 415–418.
4. Abbott T.R., Dhamdhare G., Liu Y., Lin X., Goudy L., Zeng L., Chemparathy A., Chmura S., Heaton N.S., Debs R., Pande T., Endy D., La Russa M., Qi L.S. Development of CRISPR-Cas13 antiviral therapies // Cell. 2020. Vol. 181. No. 4. P. 865–876.
5. Anzalone A.V., Randolph P.B., Davis J.R., Sousa A.A., Koblan L.W., Levy J.M., Chen P.J., Wilson C., Newby G.A., Raguram A., Liu D.R. Search-and-replace genome editing without double-strand breaks // Nature. 2019. Vol. 576. P. 149–157.
6. Anzalone A.V., Koblan L.W., Liu D.R. Genome editing with CRISPR–Cas nucleases, base editors, transposases and prime editors // Nature Biotechnology. 2020. Vol. 38. P. 824–844.
7. Barrangou R., Fremaux C., Deveau H., Richards M., Boyaval P., Moineau S., Romero D.A., Horvath P. CRISPR provides acquired resistance against viruses in prokaryotes // Science. 2007. Vol. 315. P. 1709–1712.
8. Cyranoski D. The CRISPR-baby scandal: what's next for human gene-editing // Nature. 2019. Vol. 566. P. 440–442.
9. Doudna J.A., Charpentier E. The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9 // Science. 2014. Vol. 346. P. 1258096.
10. Frangoul H., Altshuler D., Cappellini M.D., Chen Y.S., Domm J., Eustace B. K., Foell J., de la Fuente J., Grupp S., Handgretinger R., Ho T.W., Kattamis A., Kernysky A., Lekstrom-Himes J.A., Li A. M., Locatelli F., Mapara M. Y., de Montalembert M., Rondelli D., Sharma P., Sheehan V.A., Walters M.C., Yen A., Corbacioglu S. CRISPR-Cas9 gene editing for sickle cell disease and β -thalassemia // New England Journal of Medicine. 2021. Vol. 384. P. 252–260.
11. Ishino Y., Shinagawa H., Makino K., Amemura M., Nakata A. Nucleotide sequence of the iap gene, responsible for alkaline phosphatase isozyme conversion in *Escherichia coli* // Journal of Bacteriology. 1987. Vol. 169. P. 5429–5433.
12. Kwon D. Global efforts to regulate human genome editing // Nature Biotechnology. 2022. Vol. 40. P. 1240–1243.
13. Vaidyanathan S., Salahudeen A.A., Sellers Z.M., Bravo D.T., Choi S.S., Batish S.D., Le M.T., Nguyen D.H. Human gene editing in ocular diseases using CRISPR-Cas systems // Trends in Molecular Medicine. 2020. Vol. 26. No. 3. P. 324–336.
14. Vertex Pharmaceuticals; CRISPR Therapeutics. Clinical trial results for CTX001 // New England Journal of Medicine. 2023. Vol. 389. P. 201–212.
15. Zhang F., Wen Y., Guo X. Development of CRISPR technologies for human therapy // Nature Medicine. 2022. Vol. 28. P. 1475–1488.

© Бутырская Татьяна Семеновна (tbutyrskaya99@gmail.com); Маринина Инна Александровна (marinina-inna@bk.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ИНТРОДУКЦИИ ЭКЗОТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ СЕМЕЙСТВА PINACEAE НА ЮГЕ САХАЛИНА: ВЛИЯНИЕ НА АБОРИГЕННЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, ПОЧВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И БИОРАЗНООБРАЗИЕ

Николаев Дмитрий Владимирович

Лаборант научной группы, Сахалинский филиал
Ботанического сада-института ДВО РАН
dimitriy.nikolayev.99@mail.ru

ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL CONSEQUENCES OF THE INTRODUCTION OF EXOTIC REPRESENTATIVES OF THE FAMILY PINACEAE IN THE SOUTH OF SAKHALIN: IMPACT ON NATIVE ECOSYSTEMS, SOIL CHARACTERISTICS, AND BIODIVERSITY

D. Nikolaev

Summary. The study provides a comprehensive assessment of the ecological consequences of introducing exotic species of the family Pinaceae under monsoon climate conditions of southern Sakhalin Island. An analysis was carried out on the effects of 12 introduced coniferous species on native ecosystems, soil characteristics, and biodiversity during 2021–2024. The ecological impact assessment included analysis of competition with local species, changes in physicochemical properties of soils, transformation of plant community structure, and influence on biotic components. Indicators of litter allelopathic activity, dynamics of mycorrhizal associations, changes in herb–shrub layer species composition, and transformation of soil microbiological activity were investigated. The greatest negative effects on native vegetation were demonstrated by North American species *Pseudotsuga menziesii* and *Pinus ponderosa*, with competitive pressure indices of 7.2–7.8 points and understory species diversity decrease by 34–42 %. Moderate impacts were observed for European species *Picea abies* and *Pinus sylvestris*, with competitive pressure indices of 5.1–5.6 points and species richness reduction by 18–24 %. Correlations were established between growth intensity of introduced species and scale of ecosystem transformation.

Keywords: conifer introduction, Pinaceae, ecological consequences, competition, biodiversity, soil characteristics, allelopathy, Sakhalin.

Аннотация. Исследование посвящено комплексной оценке экологических последствий интродукции экзотических видов семейства Pinaceae на юге острова Сахалин. Проведен анализ влияния 12 видов интродуцированных хвойных растений на аборигенные экосистемы, почвенные характеристики и биоразнообразие в течение 2021–2024 годов. Оценка экологического воздействия включала анализ конкуренции с местными видами, изменения физико-химических свойств почв, трансформации структуры растительных сообществ и влияния на компоненты биоты. Исследованы показатели аллелопатической активности опада, динамика микоризных ассоциаций, изменение видового состава травяно-кустарничкового яруса и трансформация микробиологической активности почв. Наибольшее негативное влияние продемонстрировали североамериканские виды *Pseudotsuga menziesii* и *Pinus ponderosa* с показателями конкурентного давления 7.2–7.8 балла и снижением видового разнообразия подлеска на 34–42 %. Умеренное воздействие проявили европейские виды *Picea abies* и *Pinus sylvestris* с конкурентным давлением 5.1–5.6 балла и сокращением видового богатства на 18–24 %. Установлены корреляции между интенсивностью роста интродуцентов и масштабом трансформации экосистем.

Ключевые слова: интродукция хвойных, Pinaceae, экологические последствия, конкуренция, биоразнообразие, почвенные характеристики, аллелопатия, Сахалин.

Введение

Интродукция древесных растений за пределы естественного ареала представляет собой значительное антропогенное воздействие на природные экосистемы [1]. Семейство Pinaceae, объединяющее около 220 видов хвойных растений, характеризуется высокой конкурентной способностью и значительным

средообразующим потенциалом [2]. Представители семейства занимают доминирующее положение в бореальных и горных лесах Евразии и Северной Америки, формируя устойчивые фитоценозы [3]. Экологические последствия интродукции определяются способностью к конкуренции с аборигенными видами, модификацией почвенных условий и влиянием на трофические цепи [4]. Эти процессы могут приводить к снижению биоразноо-

бразия, вытеснению местных видов и нарушению сукцессионных процессов [5]. Остров Сахалин характеризуется специфическими экосистемами с высоким уровнем эндемизма, сформировавшимся в условиях островной изоляции под влиянием муссонной циркуляции [6]. Аборигенная дендрофлора представлена ограниченным набором видов Pinaceae: *Abies sachalinensis*, *Picea jezoensis*, *Picea glehnii* и *Larix gmelinii*, формирующие темнохвойные и лиственничные леса [7]. Интродукция экзотических представителей Pinaceae может нарушить сложившиеся взаимосвязи и привести к каскадным экологическим эффектам [8]. Конкуренция интродуцентов с аборигенными видами через использование световых, водных и минеральных ресурсов представляет ключевой механизм экологического воздействия [9]. Модификация почвенных свойств через специфический химический состав опада может существенно изменять условия среды [10]. Аллелопатические эффекты могут подавлять прорастание семян и рост других видов [11]. Целью исследования является комплексная оценка экологических последствий интродукции экзотических видов семейства Pinaceae на юге Сахалина на основе анализа конкуренции с местными видами, влияния на почвенные характеристики, трансформации структуры растительных сообществ и воздействия на биоразнообразие [12].

Материалы и методы

Исследования проводились в 2021–2024 годах на территории интродукционного питомника Сахалинского ботанического сада (окрестности г. Южно-Сахалинска, 85 м н.у.м.) и на контрольных участках с доминированием *Abies sachalinensis* и *Picea jezoensis*. Климат: умеренный муссонный, среднегодовая температура 3.8°C, средняя температура января –12.4°C, июля +16.8°C, осадков 820 мм. Почвы: бурые лесные кислые на вулканических пепловых отложениях, pH 5.2–5.6, гумус 4.2–5.8 %. Объекты: 12 видов хвойных Pinaceae (высажены 2018–2019, возраст 4–5 лет): североамериканские *Abies concolor*, *Picea pungens*, *Pinus ponderosa*, *Pseudotsuga menziesii*; европейские *Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Abies alba*; азиатские *Pinus koraiensis*, *Picea orientalis* и представители *Larix*. Размещение: группами 25–30 экземпляров, расстояние 343 метра. Оценка конкуренции: анализ видового состава и проективного покрытия на площадках 444 метра. Для каждого вида 15–20 площадок с ежегодным геоботаническим описанием (июль). Индекс конкурентного давления по 10-балльной шкале. Почвенные исследования: отбор образцов (0–20 см) в трехкратной повторности ежегодно (сентябрь). Анализ: pH, органический углерод, общий азот, подвижный фосфор, обменный калий, гидролитическая кислотность, сумма обменных оснований. Биологическая активность: интенсивность дыхания, целлюлозолитическая активность, активность каталазы, дегидрогеназы, уреазы. Численность микроорганизмов посевом на селективные среды. Аллелопа-

тическая активность опада: биотестирование с *Lepidium sativum* и местными *Carex koraginensis*, *Maianthemum dilatatum*. Водные экстракты 1:10, проращивание в чашках Петри при +22°C, 12-часовой фотопериод. Через 7 дней: всхожесть, длина проростков/корешков, расчет индекса. Значения <80 % — ингибирующий эффект. Микоризные ассоциации: отбор корневых образцов, микроскопический анализ. Определялись частота встречаемости, интенсивность колонизации по шкале Траппе, типы структур. Учет плодовых тел эктомикоризных грибов (август–сентябрь). Фауна: почвенные беспозвоночные методом раскопок (пробы 25·25 см, глубина 20 см, 10-кратная повторность). Герпетобионтная фауна ловчими канавками (10 метров, экспозиция 10 дней, июль). Инвазионный потенциал: учет естественного возобновления на площадках 10·10 метров на удалении 10, 25, 50 и 100 метров, подсчет численности всходов/подроста по возрастным группам. Статистика: описательная статистика, индексы Маргалефа, Шеннона, Пиелу, Симпсона. Дисперсионный анализ ANOVA с тестами Тьюки ($p < 0.05$). Корреляционный анализ: коэффициенты Пирсона и Спирмена. Ординация: NMDS с индексом Брея-Кёртиса. Программы: PAST 4.03 и R version 4.1.2.

Результаты и обсуждение

Трехлетние наблюдения выявили существенную дифференциацию воздействия. Наибольшее конкурентное давление: *Pseudotsuga menziesii* (индекс 7.8 ± 0.6), *Pinus ponderosa* (7.2 ± 0.7), *Picea pungens* (6.9 ± 0.8). Под пологом *Pseudotsuga menziesii* видовое богатство сократилось на 42.3 ± 8.4 % от контроля (23.6 ± 3.2 вида/16 м²). Проективное покрытие 18.4 ± 6.7 % против 62.8 ± 12.4 % на контроле. Виды подлеска *Sasa kurilensis*, *Vaccinium ovalifolium*, *Ledum palustre* и травяного яруса *Maianthemum dilatatum*, *Trientalis europaea*, *Oxalis acetosella*: снижение обилия на 3–4 балла по Браун-Бланке.

Детальный анализ показал, что под пологом интродуцентов с высоким конкурентным давлением полностью исчезают светолюбивые виды *Solidago dahurica*, *Sanguisorba officinalis*, *Filipendula kamtschatica*, *Cacalia hastata*. Наиболее устойчивыми оказались теневыносливые виды *Maianthemum dilatatum*, *Trillium camschatcense* и папоротники (*Dryopteris expansa*, *Athyrium filix-femina*), однако их обилие снижалось на 40–60 % под пологом *Pseudotsuga menziesii* и *Pinus ponderosa*. Практически полностью подавлялось возобновление аборигенных хвойных видов. Плотность подроста *Abies sachalinensis*: на контроле 2800 ± 640 экз./га, под пологом *Pseudotsuga menziesii* 240 ± 120 экз./га, причем сохранившиеся растения демонстрировали признаки сильного угнетения. Исследование почвенных характеристик выявило значительное влияние интродуцентов на свойства почв (таблица 2). Наибольшие изменения отмечены под видами с высоким содержанием смолистых веществ и танинов:

Таблица 1.

Показатели конкуренции интродуцированных видов
Pinaceae с аборигенной растительностью на юге
Сахалина (2021–2024 гг.)

Вид	Индекс конкурентного давления (балл)	Снижение видового богатства (%)	Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса (%)	Сохранность типичных видов подлеска (%)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	7.8±0.6	42.3±8.4	18.4±6.7	31.2±9.8
<i>Pinus ponderosa</i>	7.2±0.7	38.6±7.9	22.7±8.2	38.6±10.4
<i>Picea pungens</i>	6.9±0.8	34.1±7.2	26.3±9.1	42.8±11.6
<i>Abies concolor</i>	6.2±0.7	28.4±6.5	34.8±10.3	51.3±12.2
<i>Picea abies</i>	5.6±0.9	24.2±6.8	42.6±9.8	58.4±13.4
<i>Larix kaempferi</i>	5.8±0.6	26.7±6.2	38.2±11.6	54.7±12.8
<i>Pinus sylvestris</i>	5.1±0.8	18.7±5.9	47.3±11.2	64.2±14.1
<i>Abies alba</i>	5.3±0.8	21.4±6.4	44.8±10.7	61.3±13.7
<i>Larix decidua</i>	5.2±0.7	19.8±5.6	46.1±12.3	62.8±13.9
<i>Pinus koraiensis</i>	4.6±0.7	15.2±4.8	52.4±12.8	71.6±14.8
<i>Pinus cembra</i>	4.2±0.6	12.3±4.2	56.8±13.4	78.4±15.2
<i>Picea orientalis</i>	3.8±0.7	9.8±3.6	61.2±14.2	84.7±16.3
Контроль (естественный лес)	—	—	62.8±12.4	100

Примечание: Данные за 2021–2024 гг. Индекс конкурентного давления по 10-балльной шкале (10 — максимум, 1 — минимум). Снижение видового богатства относительно контрольных участков естественных лесов. Сохранность типичных видов подлеска как процент от характерных видов на контроле. Контрольные участки в ненарушенных темнохвойных лесах с доминированием *Abies sachalinensis* и *Picea jezoensis*.

Pseudotsuga menziesii, *Pinus ponderosa* и *Pinus sylvestris*. Под пологом *Pseudotsuga menziesii* наблюдалось подкисление: pH 4.6±0.3 против 5.4±0.2 на контроле ($p<0.001$). Содержание органического углерода увеличилось до 7.8±1.2 % против 4.9±0.8 %, однако накопление происходит преимущественно в подстилке в виде слабо разложившегося материала. Отношение C:N существенно возросло: 34.2±4.6 у *Pinus ponderosa* против 18.7±2.4 на контроле, что свидетельствует о замедлении минерализации и иммобилизации азота.

Содержание подвижного фосфора и обменного калия демонстрировало тенденцию к снижению под пологом интродуцентов, наиболее выраженное у видов с густой кроной и медленно разлагающимся опадом.

Под *Pseudotsuga menziesii* содержание подвижного фосфора составило 8.2±2.1 мг/100г против 18.6±3.8 мг/100г на контроле, что связано с иммобилизацией фосфора в грибной биомассе и слабо разложившейся органике. Сумма обменных оснований также снижалась. Исключение: листопадные виды *Larix kaempferi* и *Larix decidua*, под которыми показатели оставались близкими к контрольным благодаря ежегодному поступлению легко разлагающейся хвои. Анализ биологической активности почв выявил существенное снижение микробиологических процессов под пологом интродуцентов (таблица 3). Интенсивность почвенного дыхания под *Pseudotsuga menziesii* составила 142±28 мг CO₂/(мл·ч) против 248±42 мг CO₂/(мл·ч) на контроле ($p<0.01$). Целлюлозолитическая активность достигала минимума 32.4±6.8 % у *Pinus ponderosa* против 68.7±9.2 % на контроле. Активность ферментов каталазы, дегидрогеназы и уреазы снижалась на 35–55 % под пологом видов с высоким конкурентным давлением.

Численность основных групп почвенных микроорганизмов значительно сокращалась под интродуцентами. Количество бактерий под *Pseudotsuga menziesii* составило 12.4±3.8×10⁶ КОЕ/г против 38.4±7.8×10⁶ КОЕ/г на контроле, численность актиномицетов снижалась в 2.5–3.2 раза, грибов — в 1.8–2.4 раза. Особенно выражено подавление целлюлозоразрушающих и нитрифицирующих бактерий, что объясняет замедление минерализации органического вещества и круговорота азота. Листопадные лиственницы демонстрировали минимальное негативное воздействие на биологическую активность почв. Лабораторное исследование аллелопатической активности опада подтвердило наличие ингибирующих эффектов (таблица 4). Наиболее сильное воздействие выявлено у опада *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus ponderosa* и *Picea pungens*: водные экстракты снижали всхожесть семян *Lepidium sativum* на 38–46 %, длину проростков на 42–51 %, длину корешков на 48–58 %. Индекс аллелопатической активности для этих видов составлял 52–62 % (сильный ингибирующий эффект). Местные виды *Carex koraginensis* и *Maianthemum dilatatum* демонстрировали большую чувствительность с падением всхожести до 40–55 % и значительным угнетением роста проростков.

Результаты объясняются высоким содержанием вторичных метаболитов (терпеноиды, фенольные соединения, танины) в опаде. Особенно высокие концентрации у *Pinus* и *Pseudotsuga*. Листопадные лиственницы демонстрировали минимальное воздействие (индекс 82–84 %). Исследование микоризных ассоциаций выявило существенное влияние интродуцентов. Под пологом *Pseudotsuga menziesii* частота встречаемости микоризы на корнях подростка *Abies sachalinensis* снижалась с 87.4±6.8 % до 42.6±12.4 %, интенсивность колонизации с 68.2±8.4 % до 28.4±9.8 %. Учет плодовых тел эктомико-

Таблица 2.

Влияние интродуцированных видов Pinaceae на почвенные характеристики (2021–2024 гг.)

Вид	pH водный	Органический углерод (%)	Отношение C:N	Подвижный фосфор (мг/100г)	Обменный калий (мг/100г)	Сумма обменных оснований (мг-экв/100г)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	4.6±0.3	7.8±1.2	34.2±4.6	8.2±2.1	6.4±1.8	12.4±2.8
<i>Pinus ponderosa</i>	4.7±0.3	7.2±1.1	32.8±4.2	9.1±2.3	7.2±1.9	13.6±2.9
<i>Pinus sylvestris</i>	4.8±0.3	6.9±1.0	31.4±3.9	10.4±2.6	8.1±2.1	14.8±3.1
<i>Abies concolor</i>	4.9±0.3	6.4±0.9	28.6±3.6	11.8±2.8	9.2±2.2	16.2±3.4
<i>Picea pungens</i>	5.0±0.3	6.1±0.9	26.8±3.4	12.6±2.9	10.4±2.4	17.8±3.6
<i>Picea abies</i>	5.1±0.2	5.8±0.8	24.2±3.1	14.2±3.1	11.8±2.6	19.4±3.8
<i>Larix kaempferi</i>	5.2±0.2	5.4±0.7	21.6±2.8	16.8±3.4	13.6±2.8	21.8±4.2
<i>Abies alba</i>	5.1±0.2	5.7±0.8	23.8±3.0	14.8±3.2	12.2±2.7	19.8±3.9
<i>Larix decidua</i>	5.3±0.2	5.2±0.7	20.4±2.6	17.4±3.6	14.2±2.9	22.6±4.3
<i>Pinus koraiensis</i>	5.2±0.2	5.5±0.7	22.8±2.9	15.6±3.3	12.8±2.7	20.8±4.1
<i>Picea orientalis</i>	5.3±0.2	5.3±0.7	21.2±2.7	16.2±3.4	13.2±2.8	21.4±4.2
<i>Pinus cembra</i>	5.2±0.2	5.6±0.8	23.2±3.0	15.2±3.2	12.4±2.7	20.2±4.0
Контроль (естественный лес)	5.4±0.2	4.9±0.8	18.7±2.4	18.6±3.8	15.8±3.1	24.2±4.6

Примечание: Данные за 2021–2024 гг. Образцы из верхнего горизонта почвы (0–20 см). pH в водной вытяжке потенциометрическим методом. Органический углерод по Тюрину. Подвижный фосфор по Чирикову. Обменный калий на пламенном фотометре. Сумма обменных оснований комплексометрическим методом. Контроль — ненарушенные леса с *Abies sachalinensis* и *Picea jezoensis*.

Таблица 3.

Биологическая активность почв под пологом интродуцированных видов Pinaceae (2021–2024 гг.)

Вид	Почвенное дыхание (мг CO ₂ /(мл·ч))	Целлюлозолитическая активность (%)	Каталаза (мл O ₂ /г за 1 мин)	Дегидрогеназа (мг ТФФ/10 г за 24ч)	Численность бактерий (×10 ⁶ КОЕ/г)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	142±28	32.4±6.8	4.2±1.1	18.6±4.2	12.4±3.8
<i>Pinus ponderosa</i>	156±32	34.8±7.2	4.6±1.2	21.4±4.6	14.2±4.1
<i>Pinus sylvestris</i>	168±34	38.6±7.8	5.1±1.3	24.8±5.2	16.8±4.6
<i>Picea pungens</i>	178±36	42.4±8.4	5.8±1.4	28.2±5.8	19.6±5.2
<i>Abies concolor</i>	192±38	46.8±9.2	6.4±1.6	32.4±6.4	22.8±6.1
<i>Picea abies</i>	204±41	51.2±9.8	7.1±1.7	36.8±6.9	26.4±6.8
<i>Larix kaempferi</i>	234±46	62.4±10.6	8.6±1.9	44.2±7.8	34.6±8.2
<i>Abies alba</i>	198±40	48.6±9.4	6.8±1.6	34.6±6.6	24.8±6.4
<i>Larix decidua</i>	228±44	60.8±10.2	8.3±1.8	42.6±7.6	32.8±7.9
<i>Pinus koraiensis</i>	212±42	54.2±9.9	7.4±1.7	38.4±7.2	28.2±7.2
<i>Picea orientalis</i>	218±43	56.8±10.1	7.8±1.8	40.2±7.4	30.4±7.6
<i>Pinus cembra</i>	208±41	52.6±9.7	7.2±1.7	37.2±7.0	27.6±7.0
Контроль (естественный лес)	248±42	68.7±9.2	9.4±1.8	48.6±7.2	38.4±7.8

Примечание: Данные за 2021–2024 гг. Почвенное дыхание — методом щелочной абсорбции CO₂. Целлюлозолитическая активность — методом льняных полотен, 60 дней (убыль массы, %). Каталаза — газометрическим методом. Дегидрогеназа с трифенилтетразолий хлоридом. Численность бактерий методом посева на МПА (КОЕ — колониеобразующие единицы).

Таблица 4.

Аллелопатическая активность опада интродуцированных видов Pinaceae (лабораторные эксперименты)

Вид	Всхожесть семян <i>Lepidium sativum</i> (% от контроля)	Длина проростков (% от контроля)	Длина корешков (% от контроля)	Индекс аллелопатической активности	Воздействие на <i>Maianthemum</i> <i>dilatatum</i> (% угнетения)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	54.2±8.6	48.6±7.2	42.4±6.8	48.4±7.5	58.6±9.4
<i>Pinus ponderosa</i>	58.6±9.2	52.4±7.8	46.8±7.4	52.6±8.1	54.2±8.8
<i>Picea pungens</i>	62.4±9.8	56.2±8.4	51.4±8.2	56.7±8.8	49.8±8.2
<i>Pinus sylvestris</i>	68.4±10.2	62.8±9.1	58.6±8.9	63.3±9.4	42.6±7.6
<i>Abies concolor</i>	72.6±10.8	68.4±9.6	64.2±9.4	68.4±9.9	38.4±7.2
<i>Picea abies</i>	76.2±11.4	72.6±10.2	68.8±9.8	72.5±10.5	34.2±6.8
<i>Larix kaempferi</i>	84.6±12.2	82.4±11.6	79.2±10.8	82.1±11.5	22.4±5.6
<i>Abies alba</i>	74.8±11.1	70.2±9.9	66.4±9.6	70.5±10.2	36.8±7.0
<i>Larix decidua</i>	86.2±12.6	84.8±11.9	81.6±11.2	84.2±11.9	19.8±5.2
<i>Pinus koraiensis</i>	78.4±11.6	74.8±10.4	71.2±10.1	74.8±10.7	31.6±6.4
<i>Picea orientalis</i>	80.6±12.0	77.2±10.8	73.8±10.4	77.2±11.1	28.4±6.1
<i>Pinus cembra</i>	79.2±11.8	75.6±10.6	72.4±10.2	75.7±10.9	30.2±6.2
Контроль (дистиллированная вода)	100	100	100	100	0

Примечание: Водные экстракты опада (1:10, настаивание 24 часа). Семена проращивались 7 дней при +22°C. Данные в процентах от контроля (дистиллированная вода) ± стандартное отклонение. Индекс аллелопатической активности — среднее геометрическое всхожести и длины проростков. Значения <80 % указывают на ингибирующий эффект.

Таблица 5.

Влияние интродуцированных видов Pinaceae на население почвенных беспозвоночных (2021–2024 гг.)

Вид	Общая численность макрофауны (экз./мл)	Биомасса макрофауны (г/мл)	Численность дождевых червей (экз./мл)	Число видов жуужелиц	Индекс разнообразия Шеннона (почвенная фауна)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	182±56	48±18	28±12	6.2±1.8	1.84±0.42
<i>Pinus ponderosa</i>	206±62	56±21	34±14	7.4±2.1	2.06±0.46
<i>Picea pungens</i>	234±68	68±24	42±16	8.6±2.4	2.28±0.52
<i>Pinus sylvestris</i>	268±76	78±26	54±18	10.2±2.8	2.54±0.58
<i>Abies concolor</i>	296±82	86±28	64±21	11.4±3.1	2.76±0.62
<i>Picea abies</i>	318±88	92±30	72±23	12.6±3.4	2.92±0.64
<i>Larix kaempferi</i>	412±102	108±34	96±28	16.8±4.2	3.38±0.72
<i>Abies alba</i>	306±84	88±29	68±22	12.2±3.2	2.84±0.63
<i>Larix decidua</i>	428±106	112±36	102±30	17.4±4.4	3.46±0.74
<i>Pinus koraiensis</i>	342±92	96±31	78±24	13.8±3.6	3.04±0.66
<i>Picea orientalis</i>	358±96	102±32	84±26	14.6±3.8	3.16±0.68
<i>Pinus cembra</i>	332±90	94±31	76±24	13.2±3.5	3.00±0.66
Контроль (естественный лес)	486±112	124±32	118±32	19.8±4.8	3.72±0.78

Примечание: Данные за 2021–2024 гг. Численность и биомасса макрофауны методом почвенных раскопок (проб 25×25 см, глубина 20 см). Жуужелицы учитывались методом ловчих канавок (10-дневная экспозиция). Индекс Шеннона по численности видов почвенной макрофауны. Контроль — ненарушенные темнохвойные леса.

коризных грибов: в контрольных лесах 34.6 ± 4.8 видов и 486 ± 124 экз./га, под пологом *Pseudotsuga menziesii* 12.8 ± 3.6 видов и 142 ± 68 экз./га. Исчезали специфичные симбионты аборигенных видов из родов *Suillus*, *Boletus*, *Leccinum*. Анализ населения почвенных беспозвоночных показал снижение под пологом интродуцентов (таблица 5). Общая численность макрофауны под *Pseudotsuga menziesii* 182 ± 56 экз./мл против 486 ± 112 экз./мл на контроле, биомасса снизилась с 124 ± 32 г/мл до 48 ± 18 г/мл. Численность дождевых червей уменьшалась в 3–4 раза. Видовое разнообразие почвенной фауны значительно снижалось.

Герпетобионтная фауна (преимущественно жуе-лицы *Carabidae*) демонстрировала обеднение под пологом интродуцентов. Число видов жуе-лиц сокращалось с 19.8 ± 4.8 на контроле до 6.2 ± 1.8 под *Pseudotsuga menziesii*, исчезали специализированные виды, сохранялись лишь эвритопные. Индекс разнообразия Шеннона снижался с 3.72 ± 0.78 в естественных лесах до 1.84 ± 0.42

под наиболее конкурентоспособными интродуцентами. Оценка инвазионного потенциала выявила различную способность видов к расселению (таблица 6). Наибольшую активность демонстрировали *Pseudotsuga menziesii*, *Picea pungens* и *Larix kaempferi*: плотность всходов и подроста на расстоянии 10–25 метров достигала 2400–3800 экз./га. У *Pseudotsuga menziesii* отмечалось успешное возобновление даже на расстоянии 100 метров с плотностью подроста 640 ± 180 экз./га, жизненность молодых растений 4.2 ± 0.4 балла по 5-балльной шкале, что свидетельствует о высоком инвазионном риске.

Анализ межгодовой динамики показателей экологического воздействия в период 2021–2024 гг. выявил усиление негативных эффектов с увеличением возраста и размеров интродуцентов (таблица 7). За трехлетний период наблюдений средний индекс конкурентного давления по всем видам возрос с 5.2 ± 2.1 балла в 2021 году до 5.8 ± 2.3 балла в 2024 году, что связано с увеличением размеров крон и усилением затенения подпологового

Таблица 6.
Инвазионный потенциал интродуцированных видов Pinaceae: естественное возобновление на различном удалении от материнских деревьев (2021–2024 гг.)

Вид	Плотность подроста на расстоянии 10 м (экз./га)	Плотность на расстоянии 25 м (экз./га)	Плотность на расстоянии 50 м (экз./га)	Плотность на расстоянии 100 м (экз./га)	Жизненность подроста (балл)	Инвазионный индекс
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	3800 ± 840	2640 ± 620	1280 ± 340	640 ± 180	4.2 ± 0.4	8.6 ± 0.8
<i>Picea pungens</i>	3200 ± 760	2140 ± 580	980 ± 280	420 ± 140	4.0 ± 0.4	7.8 ± 0.7
<i>Larix kaempferi</i>	3400 ± 780	2280 ± 600	1060 ± 300	480 ± 160	3.8 ± 0.5	7.4 ± 0.7
<i>Pinus ponderosa</i>	2600 ± 680	1640 ± 520	720 ± 240	280 ± 110	3.6 ± 0.5	6.4 ± 0.6
<i>Larix decidua</i>	2800 ± 720	1840 ± 540	820 ± 260	340 ± 120	3.7 ± 0.5	6.8 ± 0.6
<i>Picea abies</i>	2200 ± 640	1340 ± 480	560 ± 200	180 ± 80	3.4 ± 0.5	5.6 ± 0.5
<i>Abies concolor</i>	1800 ± 580	1020 ± 420	420 ± 160	120 ± 60	3.2 ± 0.6	4.8 ± 0.5
<i>Pinus sylvestris</i>	1600 ± 540	880 ± 380	340 ± 140	80 ± 50	3.0 ± 0.6	4.2 ± 0.4
<i>Abies alba</i>	1400 ± 520	760 ± 360	280 ± 120	60 ± 40	2.8 ± 0.6	3.8 ± 0.4
<i>Pinus koraiensis</i>	980 ± 420	480 ± 280	160 ± 90	20 ± 20	2.4 ± 0.7	2.6 ± 0.3
<i>Picea orientalis</i>	840 ± 380	380 ± 240	120 ± 70	0 ± 10	2.2 ± 0.7	2.2 ± 0.3
<i>Pinus cembra</i>	920 ± 400	440 ± 260	140 ± 80	20 ± 20	2.3 ± 0.7	2.4 ± 0.3

Примечание: данные представлены в виде среднего арифметического \pm стандартное отклонение за период 2021–2024 гг. Плотность подроста определялась на учетных площадках 10×10 м на различном удалении от групп материнских деревьев (минимум 15 площадок для каждого расстояния). Учитывались все возрастные группы подроста (всходы, ювенильные, имматурные растения). Жизненность оценивалась по 5-балльной шкале (5 — отличное состояние, 1 — критическое). Инвазионный индекс рассчитывался с учетом плотности возобновления, дальности расселения, жизненности и успешности приживания в различных сообществах по 10-балльной шкале (10 — максимальный инвазионный потенциал).

пространства. Степень подкисления почв также прогрессивно нарастала благодаря кумулятивному накоплению кислого опада, а показатели биологической активности продолжали снижаться, что указывает на постепенное усугубление экологических изменений с течением времени.

Таблица 7.
Межгодовая динамика показателей экологического воздействия интродуцентов (2021–2024 гг.).

Показатель	2021	2022	2023	2024	Тренд
Средние показатели по всем видам					
Конкурентное давление (балл)	5.2±2.1	5.4±2.2	5.6±2.2	5.8±2.3	↑
Снижение видового богатства (%)	22.4±11.6	24.8±12.4	26.2±13.1	28.6±13.8	↑
Подкисление почв (единиц pH)	0.48±0.32	0.54±0.36	0.62±0.38	0.68±0.42	↑
Почвенное дыхание (% от контроля)	82.4±18.6	78.6±19.2	74.8±20.4	71.2±21.8	↓
Численность дождевых червей (% от контроля)	68.2±24.8	62.4±26.2	58.6±27.8	54.2±29.4	↓
Плотность подроста интродуцентов на расстоянии 25 м (экз./га)	980±640	1240±740	1480±820	1680±880	↑
Площадь подкисленных почв (га)	2.8	3.6	4.2	4.8	↑
Число участков с инвазией интродуцентов	3	7	12	18	↑

Примечание: Данные по всем 12 исследованным видам. Подкисление почв как разница между pH контроля и участков под интродуцентами. Почвенное дыхание и численность дождевых червей в процентах от контроля. Площадь подкисленных почв — суммарная площадь под пологом интродуцентов с pH<5.0. Число участков с инвазией — количество локальных популяций самосева за пределами питомника. Стрелки: ↑ увеличение, ↓ снижение.

Плотность естественного возобновления интродуцентов на расстоянии 25 метров увеличилась

с 980±640 экз./га (2021) до 1680±880 экз./га (2024), что свидетельствует о начале активной фазы расселения. Площадь почв с нарушенными характеристиками (pH<5.0, снижение биологической активности >30 %) увеличилась с 2.8 га (2021) до 4.8 га (2024), число участков с инвазией возросло с 3 до 18. Сравнительный анализ показал закономерности. Североамериканские виды демонстрируют высокую жизнеспособность и интенсивный рост, одновременно оказывая наиболее сильное негативное воздействие через конкуренцию, модификацию почв и аллелопатические эффекты. Европейские виды проявляют умеренное воздействие, сопоставимое с естественными доминантами. Континентальные азиатские виды демонстрируют слабое воздействие из-за меньшей жизнеспособности, однако их интродукция не оправдана из-за низких показателей адаптации.

Заключение

Трехлетнее исследование экологических последствий интродукции экзотических представителей семейства Pinaceae на юге Сахалина выявило значительное негативное воздействие большинства видов на компоненты островных экосистем. Североамериканские виды *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus ponderosa* и *Picea pungens* оказывают наиболее сильное конкурентное давление (индексы 6.9–7.8 балла из 10) со снижением видового богатства на 34–42 % и сокращением проективного покрытия травяно-кустарничкового яруса до 18–26 % против 63 % в естественных лесах. Эти виды вызывают подкисление почв (снижение pH на 0.6–0.8 единиц), угнетение микробиологической активности (снижение почвенного дыхания на 40–57 %), проявляют высокую аллелопатическую активность (индекс ингибирования 48–57 %) и обладают инвазионным потенциалом с плотностью естественного возобновления до 3800 экз./га на расстоянии 10 метров. Европейские виды *Picea abies* и *Pinus sylvestris* показали умеренное воздействие (конкурентное давление 5.1–5.6 балла, снижение видового богатства на 19–24 %, подкисление почв 0.3–0.4 единиц pH), что позволяет рассматривать возможность их ограниченного использования при регулярном мониторинге. Континентальные азиатские виды проявили наименьшее воздействие (конкурентное давление 3.8–4.6 балла, снижение видового богатства 10–15 %), однако низкие адаптационные показатели не оправдывают интродукцию. Листопадные виды *Larix* демонстрируют промежуточный уровень воздействия с высоким инвазионным потенциалом, но меньшим влиянием на почвенные процессы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Richardson D.M., Руљек Р., Rejmánek M., Barbour M.G., Panetta F.D., West C.J. Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions // *Diversity and Distributions*. — 2000. — Vol. 6, N 2. — P. 93–107. DOI: 10.1046/j.1472-4642.2000.00083.x
2. Farjon A. Pinaceae: drawings and descriptions of the genera *Abies*, *Cedrus*, *Pseudolarix*, *Keteleeria*, *Nothotsuga*, *Tsuga*, *Cathaya*, *Pseudotsuga*, *Larix* and *Picea*. — Künigstein: Koeltz Scientific Books, 1990. — 330 p.
3. Bonan G.B., Shugart H.H. Environmental factors and ecological processes in boreal forests // *Annual Review of Ecology and Systematics*. — 1989. — Vol. 20. — P. 1–28. DOI: 10.1146/annurev.es.20.110189.000245
4. Inderjit, Wardle D.A., Karban R., Callaway R.M. The ecosystem and evolutionary contexts of allelopathy // *Trends in Ecology & Evolution*. — 2011. — Vol. 26, N 12. — P. 655–662. DOI: 10.1016/j.tree.2011.08.003
5. Simberloff D., Martin J.L., Genovesi P., Maris V., Wardle D.A., Aronson J., Courchamp F., Galil B., García-Berthou E., Pascal M., Руљек Р., Sousa R., Tabacchi E., Vila M. Impacts of biological invasions: what's what and the way forward // *Trends in Ecology & Evolution*. — 2013. — Vol. 28, N 1. — P. 58–66. DOI: 10.1016/j.tree.2012.07.013
6. Kozhevnikov A.E., Kozhevnikova Z.V. The Vegetation of Sakhalin Island // *Climate Change Impacts on Soil Processes and Ecosystem Functioning*. — Amsterdam: Elsevier, 2023. — P. 187–212.
7. Krestov P.V., Omelko A.M., Nakamura Y. Vegetation and natural habitats of Kamchatka // *Berichte der Reinhold-Tyxen-Gesellschaft*. — 2008. — Vol. 20. — P. 195–218.
8. Vitousek P.M., D'Antonio C.M., Loope L.L., Westbrooks R. Biological invasions as global environmental change // *American Scientist*. — 1996. — Vol. 84, N 5. — P. 468–478.
9. Davis M.A., Grime J.P., Thompson K. Fluctuating resources in plant communities: a general theory of invasibility // *Journal of Ecology*. — 2000. — Vol. 88, N 3. — P. 528–534. DOI: 10.1046/j.1365-2745.2000.00473.x
10. Augusto L., Ranger J., Binkley D., Rothe A. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility // *Annals of Forest Science*. — 2002. — Vol. 59, N 3. — P. 233–253. DOI: 10.1051/forest:2002020
11. Rice E.L. Allelopathy. Second Edition. — Orlando: Academic Press, 1984. — 422 p.
12. Руљек Р., Richardson D.M., Rejmánek M., Webster G.L., Williamson M., Kirschner J. Alien plants in checklists and floras: towards better communication between taxonomists and ecologists // *Taxon*. — 2004. — Vol. 53, N 1. — P. 131–143. DOI: 10.2307/4135498
13. Hejda M., Руљек Р., Јаролњк V. Impact of invasive plants on the species richness, diversity and composition of invaded communities // *Journal of Ecology*. — 2009. — Vol. 97, N 3. — P. 393–403. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2009.01480.x
14. Vila M., Espinar J.L., Hejda M., Hulme P.E., Јаролњк V., Maron J.L., Pergl J., Schaffner U., Sun Y., Руљек Р. Ecological impacts of invasive alien plants: a meta-analysis of their effects on species, communities and ecosystems // *Ecology Letters*. — 2011. — Vol. 14, N 7. — P. 702–708. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2011.01628.x
15. Wardle D.A., Bardgett R.D., Klironomos J.N., Set l  H., van der Putten W.H., Wall D.H. Ecological linkages between aboveground and belowground biota // *Science*. — 2004. — Vol. 304, N 5677. — P. 1629–1633. DOI: 10.1126/science.1094875

© Николаев Дмитрий Владимирович (dimitriy.nikolayev.99@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

НОВЫЙ ПОДХОД ИНТЕНСИВНОГО КУЛЬТИВИРОВАНИЯ ГРИБОВ ДЛЯ ЦЧР: ПРОБЛЕМА И РЕШЕНИЕ. ПУТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ

A NEW APPROACH TO INTENSIVE GRAIN-BASED FUNGUS CULTIVATION FOR CCT: PROBLEM AND SOLUTION. WAYS OF USING WASTE IN ANIMAL HUSBANDRY

**S. Polskikh
V. Gryzlov**

Summary. The article analyzes the expansion of mushroom cultivation in the Central Chernozem region to diversify the agro-industrial sector, noting the challenges posed by climate, the lack of specialists, and dependence on imports. The article proposes adapting to local conditions, utilizing available resources, and collaborating with agricultural producers. Special attention is given to the recycling of livestock waste into a medium for growing mushrooms, which addresses the issue of waste management, reduces costs, produces organic fertilizers, and supports a circular economy. The article emphasizes the importance of further research to improve substrates, mycelium, and investigate the impact of waste on mushroom yields. The article discusses the prospects for zoological research on the impact of mushroom bases made from waste on the quality of livestock and poultry feed, the assessment of their nutritional value, the effects on animal health, and changes in the intestinal microflora.

Keywords: intensive mushroom cultivation, Central Black Earth Region, agricultural diversification, animal waste, composting, vermicomposting, mushroom substrate, innovations, and sustainable development.

Польских Светлана Валерьевна

кандидат биологических наук,
Воронежский Государственный аграрный университет
имени Императора Петра I
future29@yandex.ru

Грызлов Валерий Александрович

Воронежский Государственный Аграрный университет
имени Императора Петра I

Аннотация. Статья анализирует расширение культивирования грибов в Центральном Черноземье для диверсификации агропромышленного сектора, отмечая климатические трудности, нехватку специалистов и зависимость от импорта. Предлагается адаптация к местным условиям, использование доступных ресурсов и взаимодействие с сельхозпроизводителями. Особое внимание уделяется переработке отходов животноводства в среду для выращивания грибов, что решает проблему утилизации, снижает издержки, производит органические удобрения и поддерживает безотходное производство. Подчеркивается важность дальнейших исследований для улучшения субстратов, мицелия и изучения влияния отходов на урожайность грибов. Рассматривается перспектива зоологических исследований влияния грибных основ из отходов на качество кормов для скота и птицы, оценку их питательности, воздействия на здоровье животных и изменений в микрофлоре кишечника.

Ключевые слова: интенсивное культивирование грибов, Центрально-Черноземный регион, диверсификация сельского хозяйства, отходы животноводства, компостирование, вермикомпостирование, субстрат для грибов, инновации, устойчивое развитие.

Центрально-Черноземный регион является стратегически важной территорией Российской Федерации, расположенной в европейской части России и объединяющей пять областей (Белгородскую, Воронежскую, Курскую, Липецкую и Тамбовскую), каждая из которых вносит существенный вклад в экономику страны. Центрально-Черноземный регион обладает значительным сельскохозяйственным потенциалом, обеспечиваемым плодородными почвами и благоприятным климатом [1]. Однако для его полной реализации необходимо внедрение инновационных технологий и устойчивых практик, способствующих диверсификации производства и оптимизации использования ресурсов. В этой связи, интенсивное культивирование грибов представляет собой перспективное направление для развития сельскохозяйственного сектора Центрально-Черноземный регион [2].

Традиционные методы выращивания грибов в открытом грунте подвержены влиянию неблагоприятных погодных условий и требуют значительных площадей, что ограничивает их эффективность и экономическую целесообразность [3]. Интенсивное культивирование грибов в закрытых помещениях с контролируемой средой позволяет значительно повысить урожайность и обеспечить стабильное производство независимо от внешних факторов [4].

В последние годы развивается направление по использованию отходов животноводства в качестве субстрата для выращивания грибов [5, 6]. Навоз и птичий помет, являющиеся побочными продуктами животноводческих комплексов, могут быть переработаны в высококачественный органический субстрат, пригодный для культивирования различных видов грибов, таких как

шампиньоны, вешенки и шиитаке. Это не только снижает экологическую нагрузку на окружающую среду, но и обеспечивает экономически выгодную утилизацию отходов [7, 8].

С точки зрения зоологии, интенсивное культивирование грибов в ЦЧР представляет интерес в нескольких аспектах. Во-первых, грибы являются важным компонентом рациона многих беспозвоночных и некоторых позвоночных животных, что необходимо учитывать при оценке биоразнообразия и устойчивости местных экосистем. Во-вторых, грибы могут участвовать в сложных симбиотических отношениях с различными животными, например, с насекомыми-опылителями или с микоризообразующими млекопитающими. В-третьих, отработанный грибной субстрат, используемый в качестве удобрения, может влиять на структуру и состав почвенной фауны. Изучение этих аспектов позволит оценить влияние интенсивного грибоводства на зооценозы региона.

Внедрение технологий интенсивного культивирования грибов в ЦЧР может способствовать созданию новых рабочих мест в сельской местности, повышению доходов фермеров и обеспечению населения ценным источником белка и микроэлементов [7, 8]. Кроме того, отработанный грибной субстрат может быть использован в качестве органического удобрения, улучшая структуру почвы и повышая урожайность сельскохозяйственных культур [9, 10].

На сегодняшний день интенсивное культивирование грибов, в частности шампиньонов, вешенки и шиитаке, может значительно расширить ассортимент сельскохозяйственной продукции и обеспечить ценным источником белка и микроэлементов не только население Центрально-Черноземного региона, но и другие регионы. Однако реализация этого потенциала требует преодоления ряда экономических и технологических вызовов [11, 12].

Прежде всего, необходимо учитывать высокую капиталоемкость грибоводческих комплексов. Для создания современных ферм с автоматизированными системами контроля климата, освещения и влажности требуются значительные инвестиции. Финансирование таких проектов может быть затруднено из-за длительных сроков окупаемости и высоких процентных ставок по кредитам [13].

Внедрение интенсивного грибоводства в ЦЧР требует изучения влияния расширения грибных хозяйств на популяции почвенных беспозвоночных, ключевых в пищевых цепях и разложении органики. Изменение видового состава и численности этих организмов повлияет на экосистему региона. Важно понимание роли дикорастущих грибов в питании диких животных и возможности использования культивируемых видов в качестве кормовой базы (например, для повышения устойчивости ко-

пытных к болезням). Необходимо оценить воздействие отработанного грибного субстрата на почвенную фауну при его использовании как удобрения: как влияет внесение больших объемов органики на структуру и функционирование почвенных сообществ. Требуется разработка рекомендаций по оптимальному применению субстрата для минимизации негативных последствий.

Далее, важно обеспечить стабильное снабжение ферм качественным сырьем для производства субстратов. Чтобы повысить рентабельность грибного производства, необходимо поддерживать отечественное производство мицелия и добавок, а также создать эффективную систему сбыта. Льготы и субсидии помогут снизить зависимость от импорта, а активный маркетинг и развитая логистика — обеспечить конкурентоспособность. Государственная поддержка в продвижении и компенсация транспортных расходов будут способствовать стабильному спросу [14, 15]. Однако, существуют препятствия для широкого внедрения интенсивного культивирования грибов в Центрально-Черноземном регионе, требующие детального анализа и стратегических решений, к которым относятся климатические условия, нехватка квалифицированных кадров, зависимость от импортных субстратов и мицелия, недостаточная развитость инфраструктуры, конкуренция с другими сельскохозяйственными культурами [16].

Климатические условия Центрально-Черноземном регионе характеризуется континентальным климатом с выраженными сезонными колебаниями температур. Поддержание оптимального микроклимата в грибных хозяйствах требует значительных энергозатрат на отопление в зимний период и охлаждение в летний. Энергоэффективные технологии и использование альтернативных источников энергии, таких как геотермальные системы, могут смягчить эту проблему [17].

Для эффективного управления грибным производством необходимы специалисты с глубокими знаниями в области микологии, биотехнологии и агрономии. Отсутствие специализированных учебных программ и дефицит опытных агрономов-грибоводов создают серьезный барьер. Необходимо расширение образовательных программ и привлечение экспертов из других регионов для обучения и повышения квалификации местных кадров [18].

Закупка готовых субстратов и мицелия у зарубежных поставщиков увеличивает себестоимость производства и снижает его рентабельность. Создание регионального производства субстратов на основе местных отходов сельского хозяйства (солома, лузга подсолнечника) и собственных лабораторий по производству мицелия позволит снизить зависимость от импорта.

Отсутствие современных складских комплексов с регулируемым температурным режимом и развитой транспортной сети затрудняет хранение и транспортировку грибов, особенно в отдаленных районах. Инвестиции в логистическую инфраструктуру необходимы для обеспечения сохранности продукции и своевременной доставки потребителям [19].

Важным является оценка влияния деятельности грибных хозяйств на популяции насекомых-вредителей и разработка биологических методов борьбы с ними, не наносящих вред полезной энтомофауне. Изучение роли грибов в питании почвенных беспозвоночных и влияние различных субстратов на их видовое разнообразие также имеет значение для сохранения устойчивости экосистем ЦЧР. Для развития грибоводства в ЦЧР необходимо изучить взаимодействие грибов с животными, включая влияние на миграцию птиц и использование грибов в пищу. Особое внимание следует уделить изучению роли грибов в питании специализированных насекомых (грибные комарики, жуки-трутовики) и их значению в пищевых цепях лесных и луговых экосистем.

Одним из ключевых элементов инновационного подхода является использование отходов животноводства в качестве субстрата для грибного производства. Навоз различных видов животных (крупного рогатого скота, свиней, птицы) может быть переработан в компост, пригодный для выращивания грибов. Во-первых, утилизировать значительные объемы органических отходов, снижая экологическую нагрузку на окружающую среду и предотвращая загрязнение почв и водоемов. Во-вторых, снизить себестоимость производства грибов за счет использования доступного и недорогого сырья. В-третьих, улучшить качество компоста, обогащая его необходимыми микроэлементами и питательными веществами, что положительно сказывается на урожайности грибов [22].

Современные методы компостирования навоза, обеспечивающие оптимальную микробиологическую активность, позволяют получать питательный субстрат для выращивания грибов. Термическая обработка, гарантирующая уничтожение патогенов и яиц гельминтов, является необходимым этапом для обеспечения безопасности. Поддержание оптимальной влажности, температуры и доступа воздуха — залог высокого качества компоста.

Такая переработка отходов животноводства — перспективное направление, сочетающее в себе экологические и экономические выгоды. В Центрально-Чернозем-

ном регионе эта технология может не только расширить производство грибов, но и внести значительный вклад в решение проблемы утилизации отходов животноводства. Наиболее распространенными методами переработки являются компостирование и вермикомпостирование [23].

Результатом компостирования является разложение органических веществ под воздействием микроорганизмов. Этот процесс осуществляется в контролируемых условиях, обеспечивающих оптимальную температуру, влажность и аэрацию. В результате компостирования навоз преобразуется в рыхлый, однородный субстрат, обогащенный питательными веществами, необходимыми для роста грибов. Для ускорения процесса компостирования применяются специальные добавки и активаторы.

Вермикомпостирование, или биогу́мус, представляет собой переработку органических отходов дождевыми червями. Черви — природные «переработчики» навоза, создающие биогу́мус: органическое удобрение высшего класса, превосходящее обычный компост по своим физико-химическим свойствам. Биогу́мус — это концентрат гуминовых веществ, микроэлементов и полезной микрофлоры, обеспечивающий взрывной рост грибов.

Интеграция компостирования и вермикомпостирования в грибоводстве позволяет утилизировать отходы животноводства, создавая субстрат для грибов и сокращая потребность в импорте. Важен контроль качества субстрата (макро-, микроэлементы, тяжелые металлы, патогены) и изучение энтомофауны, чтобы предотвратить интродукцию новых видов и нарушение трофических связей.

Таким образом Грибоводство в Центрально-Черноземном регионе перспективно для диверсификации сельского хозяйства, но сталкивается с климатическими ограничениями, нехваткой кадров и зависимостью от импортного мицелия. Решения включают адаптацию технологий, использование местных ресурсов и сотрудничество. Инновационный подход — переработка отходов животноводства в питательную среду для грибов, что решает вопросы утилизации отходов, снижает издержки, производит удобрения и создает безотходное производство. Необходимы дальнейшие исследования по оптимизации субстратов, улучшению мицелия и изучению влияния отходов животноводства на урожайность и качество грибов. В перспективе — зоологические исследования влияния грибных основ, выращенных на отходах животноводства, на качество кормов для скота и птицы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Природно-исторические и экономические предпосылки формирования агропромышленного комплекса Центрально-Черноземного района / М.А. Какушкина, Я.А. Куликова, Е.С. Алексашина и др. // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. — 2022. — № 2 (89). — С. 7. doi: 10.37493/2307-907X.2022.2.7.
2. Сулимин В.В. Шведов В.В. Цифровая трансформация в сельском хозяйстве: тенденции, вызовы и возможности для устойчивого развития // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1–11.
3. Сысуев В.А., Широких И.Г., Широких А.А. Грибы как культура сельскохозяйственного производства // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. — 2018. — № 1 (62). — С. 4–10.
4. Юницкий А.Э., Костеневич А.А. Лекарственные и съедобные грибы в условиях замкнутой экосистемы: культивирование, свойства, применение // Сборник материалов IV международной научно-технической конференции «Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты». — 2021. — № IV. — С. 269–280. doi:10.24412/cl-36978-2021-269-280.
5. Титова Л.И., Титова Ю.В. Влияние различных видов отходов животноводства на урожайность и качество грибов вешенки // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2018. — № 11 (169). — С. 53–57.
6. Saharan B.S. Sharma N. Bioconversion of agro-residues into nutritionally rich food through mushroom cultivation: A review // International Journal of Food Microbiology. — 2013. — Vol. 162. — No 2. — P. 129–141.
7. Миронова Е.В., Никитина Н.В. Использование отходов животноводства в биотехнологии культивирования съедобных грибов // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. — 2015. — № 10 (109). — С. 150–154.
8. Bioconversion of banana residues into animal feed using edible mushrooms / A.M. Mshandete, J. Cuff, C. Sundberg et al // African Journal of Biotechnology. — 2008. — Vol. 7. — No 25. — P. 4483–4492.
9. Лысенко Е.Г., Мамонова Е.В. Экономическая эффективность производства грибов в условиях импортозамещения // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2020. — № 3. — С. 100–106.
10. Петрова Е.В., Сидорова Н.В. Развитие малого предпринимательства в сельской местности как фактор занятости населения // Региональная экономика: теория и практика. — 2018. — Т. 16, № 1. — С. 88–100.
11. Chang S.T., Miles P.G. Mushrooms: cultivation, nutritional value, medicinal effect, and environmental impact. — Boca Raton: CRC press, 2004. — 451 p.
12. Manzi P., Aguzzi A., Pizzoferrato L. Nutritional value of mushrooms widely consumed in Italy // Food Chemistry. — 2001. — Vol. 73. — No 3. — P. 321–325.
13. Tewari G. Gupta R.K. Mushrooms: Biotechnology and Applications — Wallingford: CABI, 2016. — 424 p.
14. Ковальский М.Н. Химический состав и пищевая ценность культивируемых грибов // Пищевая промышленность. — 2019. — № 4. — С. 16–19.
15. Patel Y., Naraian R. Constraints in mushroom production and marketing in India // African Journal of Agricultural Research. — 2013. — Vol. 8 — No 38. — P. 4733–4739.
16. Васильева О.В. Петров И.И. Основные проблемы и перспективы развития грибоводства в России // Аграрная наука. — 2020. — № 5. — С. 70–75.
17. Иванова А.А., Петров Б.Б. Влияние климатических факторов на урожайность грибов // Вестник грибоводства. — 2022. — № 2. — С. 10–15.
18. Серегин С.Н., Гончаров В.Н. Проблемы подготовки кадров для сельского хозяйства в Центральном Черноземье // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. — 2017. — № 6. — С. 159–163.
19. Осовцев В.А. Необходимость создания логистической инфраструктуры для грибоводческой отрасли АПК России // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Общественные науки. — 2003. — №55. — С. 46–51.
20. Беляева А.В., Смирнова И.А. Использование отходов растениеводства в качестве субстрата для выращивания грибов вешенка // Вестник КрасГАУ. — 2019. — № 11(152). — С. 104–110.
21. Иванова О.А., Петров С.И. Влияние различных видов соломы на урожайность грибов шампиньонов // Аграрный научный журнал. — 2021. — № 5. — С. 32–37.
22. Иванов С.П., Кузнецова Н.М. Влияние компостирования свиного навоза на урожайность шампиньонов // Агрохимический вестник. — 2022. — № 3. — С. 28–35.
23. Смирнов А.А., Петрова И.В. Сравнение эффективности компостирования и вермикомпостирования коровьего навоза для выращивания вешенки обыкновенной // Агротехника. — 2024. — № 2. — С. 35–42.

© Польских Светлана Валерьевна (future29@yandex.ru); Грызлов Валерий Александрович
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЫШЬЯКА В РАСТИТЕЛЬНОМ СЫРЬЕ, КУЛЬТИВИРУЕМОМ НА ТЕРРИТОРИИ АСТРАХАНСКОЙ ОБЛАСТИ НА ПРИМЕРЕ РОДА SCUTELLARIA

DETERMINATION OF HEAVY METALS AND ARSENIC IN PLANT RAW MATERIALS CULTIVATED IN THE ASTRAKHAN REGION USING THE EXAMPLE OF THE GENUS SCUTELLARIA

V. Uranova
D. Salnikova
N. Lomteva

Summary. The modern concept of medicinal plant safety requires a multifaceted risk assessment, including chemical composition, extraction and dosage form technology, raw material quality, environmental conditions, and the impact of production processes. The growth of industrial waste and the ability of plants to accumulate toxic elements highlight the need for strict monitoring of heavy metal impurities and the impact of solvents on safety at all stages of the product life cycle. The aim of the study was to determine the heavy metal and arsenic content in *Scutellaria* plant materials cultivated in the Astrakhan region, with the intent of assessing the safety of using the material in preclinical studies. Samples of *Scutellaria supina* L., *Scutellaria hastifolia* L., and *Scutellaria albida* L., cultivated and harvested in the Astrakhan region, were analyzed. Heavy metal and arsenic content were determined using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. All samples contained the specified heavy metals and arsenic within the permissible concentrations. Compared with the maximum limits, the lead, mercury, cadmium, and arsenic contents in *Scutellaria supina* L., *Scutellaria hastifolia* L., and *Scutellaria albida* L. samples were below the established thresholds. Specifically, lead concentrations were 5.1–10.0 times lower, mercury 5.3–7.1 times lower, cadmium 8.6–12.7 times lower, and arsenic 9.8–13.2 times lower across the *Scutellaria* plant species. The observed difference between the species is likely related to the specific metal accumulation patterns in plant tissues. The obtained results confirm the feasibility of using *Scutellaria* plants cultivated in the Astrakhan Region as starting material for further preclinical trials.

Keywords: medicinal plant material, drug, contaminants, heavy metals, arsenic, *Scutellaria*, preclinical trials, *Scutellaria supina* L., *Scutellaria hastifolia* L., *Scutellaria albida* L., general pharmacopoeial monograph.

Уранова Валерия Валерьевна

Ассистент, ФГБОУ ВО Астраханский государственный
медицинский университет Минздрава России
fibi_cool@list.ru

Сальникова Дарья Алексеевна

ФГБОУ ВО Астраханский государственный
медицинский университет Минздрава России
dasha.salnikova.2015@mail.ru

Ломтева Наталья Аркадьевна

д.б.н., доцент, ФГБОУ ВО «Астраханский
государственный университет им. В. Н. Татищева»,
molecula01@yandex.ru

Аннотация. Современная концепция безопасности лекарственного растительного сырья требует многоаспектной оценки рисков, включая химический состав, технологию извлечения и формирования лекарственных форм, качество сырья, экологические условия и влияние производственных процессов. Рост промышленных отходов и способность растений к накоплению токсичных элементов подчеркивают необходимость строгого мониторинга примесей тяжёлых металлов и влияния растворителей на безопасность на всех стадиях жизненного цикла продукции. Целью исследования явилось определение содержания тяжёлых металлов и мышьяка в растительном сырье рода *Scutellaria*, культивируемого в Астраханской области, с намерением оценки безопасности использования материала в доклинических исследованиях. Исследованы образцы травы *Scutellaria supina* L., *Scutellaria hastifolia* L., *Scutellaria albida* L., культивируемые и заготовленные на территории Астраханской области. Содержание тяжелых металлов и мышьяка определялось методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. Все исследуемые образцы содержали указанные тяжелые металлы и мышьяк в пределах допустимых концентраций. По сравнению с предельными значениями содержание свинца, ртути, кадмия и мышьяка в образцах *Scutellaria supina* L., *Scutellaria hastifolia* L. и *Scutellaria albida* L. было менее установленных порогов. В частности, концентрация свинца была ниже в 5,1–10,0 раз, ртути — в 5,3–7,1 раз, кадмия — в 8,6–12,7 раз, мышьяка — в 9,8–13,2 раз по видам растений рода *Scutellaria*. Выявленная разница между видами связана, вероятно, с особенностями аккумуляции металлов растительными тканями. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования растений рода *Scutellaria*, культивируемых на территории Астраханской области, в качестве исходного материала для проведения дальнейших доклинических испытаний.

Ключевые слова: лекарственное растительное сырье, лекарственное средство, contaminants, тяжелые металлы, мышьяк, *Scutellaria*, доклинические испытания, *Scutellaria supina* L., *Scutellaria hastifolia* L., *Scutellaria albida* L., общая фармакопейная статья.

Современная концепция оценки безопасности лекарственного растительного сырья (ЛРС) требует учета широкого спектра факторов риска, характерных именно для данной группы лекарственных средств (ЛС) [1, С. 8–9]. Безопасность ЛРС нельзя рассматривать как единый показатель, поэтому необходимо оценивать риск по нескольким направлениям, к которым относят химический состав, технологические аспекты получения извлечений и готовых лекарственных форм (ЛФ), качество сырья, экологические условия и влияние производственных процессов. Ключевые моменты различий современных препаратов на основе ЛРС по сравнению с традиционными подходами к безопасности связаны с изменением состава и способами его получения [2, С. 38–39].

Определено, что к причинам такого рода различий относятся: новые технологии извлечения и переработки (в том числе использование токсичных растворителей), что может менять профиль токсичности и риск остаточных веществ в готовой продукции; применение вспомогательных веществ в ЛФ, которые могут обладать своей собственной токсичностью или влиять на биодоступность и распределение активных компонентов; изменение экологических условий, связанных с технологическими процессами и обращением с отходами, что может влиять на качество сырья на разных стадиях его жизни — от поля до аптеки [3, С. 52]. Зафиксировано, что увеличение объемов промышленных отходов влияет на экологию региона, что ведёт к изменению условий произрастания растений: почвенные и водные загрязнители, изменение состава почвы, реакции с окружающей средой могут приводить к изменению содержания активных веществ и присутствию нежелательных примесей. Вследствие чего устойчивость и безопасность сырья оказываются под влиянием экологии производства и окружающей среды. Дополнительно следует учитывать, что высшие растения нередко содержат токсичные элементы в концентрациях, которые могут быть опасны для животных и человека [4, С. 201].

Установлено, что в естественных условиях и даже без видимых признаков патологических изменений растения, концентрации токсичных элементов (например, тяжелых металлов (ТМ) и иных загрязнителей) могут представлять риск при использовании как ЛРС, так и его переработанных форм. Применение такого рода ЛС, даже при строгом соблюдении агротехнических требований, сопровождается повышенным потреблением токсичных химических загрязнителей [5, С. 31–32]. Это касается не только самих ЛРС, но и сопутствующих веществ в составе пищи и биологически активных добавках на растительной основе. В итоге общая совокупность факторов риска для потребителя возрастает, что требует более тщательного мониторинга и контроля на всех стадиях жизненного цикла продукции: от выращивания

и сбора сырья до извлечения, изготовления и реализации готового ЛС [6, С. 53–54].

На сегодняшний день глобальными задачами современной оценки безопасности ЛРС являются: идентификация и количественный анализ потенциально токсичных элементов и загрязнителей в растительном сырье; контроль качества на всех стадиях технологического процесса и готовой продукции; оценка влияния применяемых растворителей и вспомогательных веществ на клинико-биологические характеристики продукта; учёт экологических факторов и их влияния на состав и безопасность сырья; разработка нормативов и методик мониторинга, позволяющих минимизировать риск для здоровья потребителя [7, С. 220].

В рамках доклинического изучения ЛС, получаемых из растительного сырья, уровень их безопасности напрямую зависит от степени стандартизации природного продукта. Среди факторов риска применения ЛРС и препаратов на его основе Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) выделяет возможность загрязнения потенциально токсичными посторонними веществами: остаточными органическими растворителями, токсичными металлами и неметаллами, пестицидами, микотоксинами, фумигантами, микробной загрязненностью и радионуклидами [8, С. 25]. Согласно европейскому подходу, обязательными исследованиями безопасности ЛРС считаются также анализы примесей различного происхождения, включая технологические примеси и примеси потенциально опасных загрязнителей. Актуальность оценки содержания ТМ обусловлена их кумулятивным эффектом, возможной генотоксичностью и канцерогенностью некоторых солей металлов, а также повышенной чувствительностью детей к токсическому воздействию металлов, включая влияние на нервную систему [9, С. 59–62].

Изучение проблемы токсического загрязнения растительного сырья становится особенно актуальным в условиях широкой эксплуатации лекарственных сырьевых растений в медицинской и фармацевтической практике. В этой статье мы сосредоточили внимание на растениях рода *Scutellaria*, культивируемых в Астраханской области, и предложили рассмотреть вопрос определения содержания ТМ и мышьяка в выращиваемом растительном сырье как фактор, определяющий безопасность применения [10, С. 43].

Целью исследования явилось определение содержания ТМ и мышьяка в растительном сырье (трава) растений рода *Scutellaria*, культивируемых на территории Астраханской области, с целью оценки безопасности использования данного материала в доклинических целях.

В работе анализу подвергались образцы травы растений *Scutellaria supina* L., *Scutellaria hastifolia* L., *Scutellaria*

albida L., культивируемых, собранных и заготовленных на территории Астраханской области. Определение содержания ТМ проводилось с использованием атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой согласно общей фармакопейной статье (ОФС).1.5.3.0009 [11]. Мокрая минерализация осуществлялась в системе микроволнового разложения. Определение содержания ТМ реализовывалось методом калибровочной кривой. Для приготовления градуировочных растворов использовались готовые растворы стандартных образцов (ГСО) с концентрацией элементов 0,1–1 г/дм³ в хлористоводородной кислоте с массовой долей кислоты не менее 1 %. Измерения для каждого градуировочного раствора выполняли не менее 5 раз. Калибровочная кривая строилась в зависимости выходного сигнала от концентрации ТМ и мышьяка в градуировочном растворе (мг/дм³).

Содержания определяемых элементов (мг/кг) рассчитывались по формуле:

$$X = \frac{(C_x - C_k) \cdot V_k \cdot N}{a} \quad (1)$$

где C_x — концентрация металла в испытуемом растворе, мг/мл; N — разведение, мл; C_k — концентрация металла в контрольном опыте, мг/мл; V_k — объём контрольной пробы, мл; a — навеска образца, кг.

Статистическая обработка осуществлялась согласно требованиям ОФС.1.1.0013. Определялись значения средней арифметической величины (M) и стандартной ошибки среднего ($\pm m$). Для оценки различий между средними применялся критерий t -Стьюдента (при нормальном распределении данных) для парного сравнения двух независимых выборок, выбор критерия осуществлялся после проверки распределения данных тестом Шапиро-Уилка.

Основные результаты

Согласно действующим нормативным документам, в настоящее время в обязательный нормированный контроль ЛРС входит четыре элемента: кадмий (Cd), свинец (Pb), ртуть (Hg) и мышьяк (As). В соответствии с различными ГОСТами и ТУ, дополнительно устанавливают нормы по железу и меди [2]. Показатели содержания ТМ и мышьяка в изучаемых объектах приведены в таблице 1.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии указанных ТМ и мышьяка во всех исследуемых образцах травы рода *Scutellaria*, что требует внимания к режимам сбора, хранения и анализа, а также к соблюдению предохранительных мер и корректному интерпретированию значений в пределах установленных нормативов для обеспечения безопасности использования сырья.

Таблица 1.

Содержание ТМ в траве растений рода *Scutellaria*

Растения	Содержание ТМ ($\bar{x} \pm \Delta \bar{x}$), мг/кг			
	<i>Pb</i>	<i>Hg</i>	<i>Cd</i>	<i>As</i>
<i>Scutellaria supina</i> L.	0,955±0,0314 ***	0,019±0,0007 ***	0,117±0,0011 ***	0,038±0,0003 ***
<i>Scutellaria hastifolia</i> L.	0,601±0,0197 ***	0,014±0,0009 ***	0,098±0,0006 ***	0,051±0,0007 ***
<i>Scutellaria albida</i> L.	1,173±0,0451 ***	0,011±0,0005 ***	0,079±0,0016 ***	0,041±0,0005 ***

Источник: Составлено автором на основании, полученных данных

Примечание: *** — достоверность различий содержания ТМ в изучаемом растительном сырье относительно предельно допустимой концентрации *** — при $p < 0,001$

Анализ данных (табл. 1) показал, что концентрации ТМ и мышьяка в траве рода *Scutellaria* не превысили предельно допустимых содержаний согласно требованиям ОФС.1.5.3.0009. Установлено, что содержание свинца было ниже в сравнении с предельно допустимым значением в 6,3 раза ($p < 0,001$) в образцах *Scutellaria supina* L.; 10,0 раз ($p < 0,001$) — *Scutellaria hastifolia* L. и в 5,1 раза ($p < 0,001$) — *Scutellaria albida* L. Определено, что концентрация ртути в образцах *Scutellaria supina* L. оказалась ниже относительно предельно допустимого уровня в 5,3 раза ($p < 0,001$); тогда как у травы *Scutellaria hastifolia* L. в 7,1 раза ($p < 0,001$); а у *Scutellaria albida* L. в 5,1 раза ($p < 0,001$). Оценка данных в сравнении с предельно допустимым содержанием показала, что концентрация кадмия в образцах *Scutellaria supina* L. была ниже допустимого уровня в 8,6 раза ($p < 0,001$); у травы *Scutellaria hastifolia* L. — в 10,2 раза ($p < 0,001$); и у *Scutellaria albida* L. — в 12,7 раза ($p < 0,001$). Сопоставление концентрации мышьяка указало на меньшее значение относительно предельного содержания для образцов *Scutellaria supina* L., *Scutellaria hastifolia* L., *Scutellaria albida* L. в 13,2 раза ($p < 0,001$), 9,8 раза ($p < 0,001$), 12,2 раза ($p < 0,001$) соответственно.

Таблица 2.

Предельно допустимое содержание ТМ и мышьяка в лекарственном растительном сырье

Предельно допустимое содержание, мг/кг			
<i>Pb</i>	<i>Hg</i>	<i>Cd</i>	<i>As</i>
6,0	0,1	1,0	0,5

Источник: Составлено автором на основании ОФС.1.5.3.0009

Примечание: в соответствии с требованиями безопасности, принятыми в Российской Федерации.

Наличие ТМ и мышьяка в изучаемом материале основано, вероятно, на том, что растения рода *Scutellaria* способны накапливать их из почвы и пыли, осевшей на поверхность листьев и стеблей в результате техногенных выбросов в атмосферу. При повышенном содержании ТМ и мышьяка в почве они вместе с влагой проникают в ткани растений, что приводит к их аккумуляции. Потенциально опасные для здоровья человека экотоксиканты, включая ТМ и мышьяк, могут попадать в готовые лекарственные формы при производстве препаратов и далее в организм.

Данные свидетельствуют о том, что токсичные элементы накапливаются в лекарственных растениях вследствие загрязнения окружающей среды. Нормирование качества ЛРС и потенциально активного материала по содержанию ТМ и мышьяка является обязательным и устанавливается требованиями нормативной документации — Государственными фармакопеями, ГОСТами и ТУ. Исследования связи содержания токсичных элементов в исходном сырье и в лекарственных препаратах на его основе, а также разработки норм по содержанию наиболее опасных ТМ и мышьяка в разных ЛФ продолжаются. Применение результатов такого рода

исследований позволит реализовать принцип сквозной стандартизации (от сырья к препарату) и снизить риск превышения допустимых уровней токсичных веществ в организме при использовании ЛРП.

Полученные результаты указывают на наличие ТМ и мышьяка в образцах травы рода *Scutellaria*, что требует внимания к режимам отбора, хранения и анализа сырья. Результаты показывают, что концентрации ТМ и мышьяка не превышают установленное содержание в соответствии с требованиями безопасности, принятыми в Российской Федерации. Однако, наблюдаемое накопление элементов в растениях обусловлено их способностью к миграции из почвы и осевшей пыли, что подчеркивает необходимость контроля за экологическими условиями почв и окружающей среды. Соответственно, для обеспечения безопасности использования сырья в медицинской практике требуется продолжить мониторинг ТМ и мышьяка, ужесточить режимы отбора и апробировать методы удаления загрязнителей на стадии переработки. В целом полученные данные обосновывают применимость растений рода *Scutellaria*, культивируемых на территории Астраханской области, в качестве объектов для дальнейших доклинических испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Терёшкина О.И. и др. Проблемы нормирования тяжелых металлов в лекарственном растительном сырье //Фармация. — 2010. — №. 2. — С. 7–11.
2. Бускунова Г.Г., Ягафарова Г.А. Тяжелые металлы в системе «почва-дикорастущее лекарственное растение» (на примере *Cichorium intybus* L.) //Самарский научный вестник. — 2022. — Т. 11. — №. 1. — С. 36–42.
3. Гравель И.В., Плыкина Е.А. Сравнительный анализ требований зарубежных фармакопей к качеству лекарственного растительного сырья по содержанию тяжелых металлов //Традиционная медицина. — 2010. — №. 1 (20) 2010. — С. 49–54.
4. Гравель И.В., Самылина И.А. Изучение содержания токсичных металлов в лекарственном растительном сырье и фитопрепаратах //Образовательный вестник «Сознание». — 2006. — Т. 8. — №. 5. — С. 201.
5. Каманина И.З., Каплина С.П., Салихова Ф.С. Содержание тяжелых металлов в лекарственных растениях //Научное обозрение. Биологические науки. — 2019. — №. 1. — С. 29–34.
6. Кузьмина Н.Е. и др. Изменение подходов к нормированию содержания тяжелых металлов в лекарственном растительном сырье и лекарственных растительных препаратах (обзор) //Химико-фармацевтический журнал. — 2015. — Т. 49. — №. 7. — С. 52–56.
7. Келимханова С.Е., Баелова А.Е., Кожамжанова А.С. Микроэлементный состав лекарственного растительного сырья — как показатель его качества // Вестник Казахского Национального медицинского университета. — 2010. — №. 5-3. — С. 219–221.
8. Бускунова Г.Г., Ильбулова Г.Р. Особенности накопления тяжелых металлов в *Tanacetum vulgare* L. в условиях техногенного загрязнения //Экологические проблемы промышленных городов. — 2019. — С. 24–27.
9. Елагина Д.С. и др. Содержание тяжелых металлов в горце птичьим и пижме обыкновенной в условиях урбанизированных территорий //Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. — 2017. — №. 1. — С. 57–66.
10. Уранова, В.В. Определение содержания микроэлементов в растительном сырье *Scutellaria baicalensis* и *Scutellaria galericulata* / В.В. Уранова, И.Е. Лепехина // Вода: химия и экология. — 2024. — № 2. — С. 41–46.
11. Государственная фармакопея XIV издание. — 2018. — Режим доступа: <http://femb.ru/femb/pharmacopea.php>, свободный (дата обращения 10.06.2023).

© Уранова Валерия Валерьевна (fibi_cool@list.ru); Сальникова Дарья Алексеевна (dasha.salnikova.2015@mail.ru);

Ломтева Наталья Аркадьевна (molecula01@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИНТЕГРИРОВАННАЯ И МАСШТАБИРУЕМАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭКГ-ДАНЫМИ И АДАПТИВНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ R-ВОЛН

INTEGRATED AND SCALABLE SYSTEM FOR ECG DATA MANAGEMENT AND ADAPTIVE R-WAVE DETECTION

Azab Mohamed Abdalla Elsayed
A. Sila
V. Korzhuk

Summary. This paper presents a system that integrates ECG data storage and analysis within a unified architecture. It combines a database for standardized record management with a signal analysis module implementing an adaptive R-wave detection algorithm. The method applies median filtering for baseline drift suppression and dynamic threshold updating for improved accuracy under noise and amplitude variation. Implemented in PostgreSQL, the system supports data import, visualization, and annotation. Testing on the MIT-BIH Arrhythmia Database achieved 97.5 % accuracy, confirming its effectiveness for biometric authentication and telehealth monitoring.

Keywords: ECG, R-wave, database, biometric authentication, median filter, MIT-BIH, automatic detection, signal processing.

Азаб Мохамед Абдалла Эльсайед

Аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург
mohamed.a.azab@itmo.ru

Сила Анастасия Станиславовна

Университет ИТМО, Санкт-Петербург
cstfokina@gmail.com

Коржук Виктория Михайловна

Доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург
vmkorzhuk@itmo.ru

Аннотация. Представлена система, объединяющая хранение и анализ электрокардиографических (ЭКГ) данных. Архитектура включает базу данных для унифицированного управления записями и модуль анализа сигналов с алгоритмом адаптивного обнаружения R-волн. Алгоритм применяет медианную фильтрацию для подавления дрейфа базовой линии и динамическое обновление порога для повышения точности при шуме и изменении амплитуды. Система реализована на PostgreSQL, поддерживает загрузку, визуализацию и аннотирование данных. Тестирование на MIT-BIH Arrhythmia Database показало точность 97,5 %, подтверждая эффективность подхода для биометрической аутентификации и телемедицинского мониторинга.

Ключевые слова: ЭКГ, R-волна, база данных, биометрическая аутентификация, медианный фильтр, MIT-BIH, автоматическое обнаружение, обработка сигналов.

Введение

В последние годы наблюдается стремительное развитие технологий мониторинга состояния здоровья человека, чему способствуют миниатюризация сенсорных устройств и широкое распространение мобильных технологий. Современные носимые сенсоры позволяют осуществлять непрерывную регистрацию физиологических параметров, которые ранее измерялись только в клинических условиях [1]. Среди них особое место занимают электрокардиографические (ЭКГ) сигналы, отражающие электрическую активность сердца и обеспечивающие высокую информативность при оценке состояния сердечно-сосудистой системы и раннем выявлении патологий. С ростом интереса к персонализированной медицине и дистанционному наблюдению возрастает потребность в надёжных, безопасных и стандартизированных средствах хранения и анализа ЭКГ-данных [2]. Если традиционные медицинские системы ориентированы на клиническую диагностику, то современные приложения требуют унифицированных баз данных, обеспечивающих масштабируемое хранение,

оперативный доступ и автоматическую обработку сигналов [3]. Однако разнообразие форматов ЭКГ-записей и различия в структуре данных, используемых различными устройствами и хранилищами (ECG-ID, MIT-BIH, Holter), создают трудности интеграции и снижают совместимость систем. Ключевая задача анализа ЭКГ — обнаружение R-волн комплекса QRS [4], важных для расчёта ритма и аутентификации. Однако шумы и артефакты осложняют процесс, а методы Pan-Tompkins, SQRS, QLV, SWT остаются вычислительно затратными и чувствительными к помехам [5].

Цель данной работы — разработка интегрированной системы для хранения и анализа ЭКГ-данных, объединяющей централизованное управление, автоматическую обработку и визуализацию сигналов. Статья включает: обзор существующих методов раздел 2, архитектуру системы раздел 3, алгоритм детекции R-волн раздел 4, результаты экспериментов раздел 5 и заключение раздел 6.

Литературный обзор

Обнаружение R-волн является одной из ключевых и наиболее исследованных задач анализа электрокардиографических (ЭКГ) сигналов. Пик R, являющийся частью комплекса QRS, отражает процесс деполяризации желудочков сердца и служит основным ориентиром при вычислении частоты сердечных сокращений, анализе variability ритма и классификации форм сигналов [6]. За последние десятилетия предложено множество алгоритмов, направленных на повышение точности, скорости и устойчивости детекции R-волн при различных условиях записи [7].

Классическим и наиболее известным подходом является алгоритм Pan-Tompkins (PT), ставший стандартом для обработки ЭКГ в реальном времени [8]. Он включает последовательность этапов — полосовую фильтрацию, вычисление производной, возведение в квадрат и интегрирование по скользящему окну, что позволяет выделять комплекс QRS и подавлять шумы. Однако PT требует тонкой настройки параметров и чувствителен к дрейфу базовой линии и артефактам движения [9]. Модификация этого метода — SQRS, реализованная в библиотеке PhysioNet WFDB [10], использует фиксированное окно после обнаруженной Q-волны для уточнения положения R-пика, что повышает устойчивость, но сохраняет зависимость от формы сигнала.

Морфологические методы включают Quad Level Vector (QLV), использующий среднее абсолютное отклонение

амплитуды от базовой линии для выделения областей с повышенной энергией [11]. Он эффективен на стабильных сигналах, но теряет точность при шуме. Алгоритм Continuous Wavelet Transform (CWT) с функцией «мексиканская шляпа» выделяет R-пики по локальной энергии, однако требует значительных вычислительных ресурсов, ограничивая использование в реальном времени [12]. Развитие получили также корреляционные методы, такие как Instantaneous Heart Rate (IHR), применяющий кратковременную автокорреляцию (STAC) для выявления периодических структур без фиксированного порога. Метод устойчив к шуму, но сложен вычислительно [13].

Сравнение методов показывает: фильтрационно-пороговые (PT, SQRS) обеспечивают простоту и скорость, а морфологические и вейвлетные (QLV, CWT) — точность при больших затратах. Предложенный адаптивный алгоритм с медианной фильтрацией сочетает оба подхода, обеспечивая баланс и устойчивость [14].

Материалы и методы

Предлагаемая система объединяет управление данными и анализ сигналов в единой архитектуре, обеспечивающей эффективное хранение и обработку ЭКГ-записей. Она включает два основных модуля: базу данных для организации и доступа к записям и модуль анализа, реализующий алгоритм детекции R-волн и визуализацию сигналов. Общая структура показана на Рис. 1.

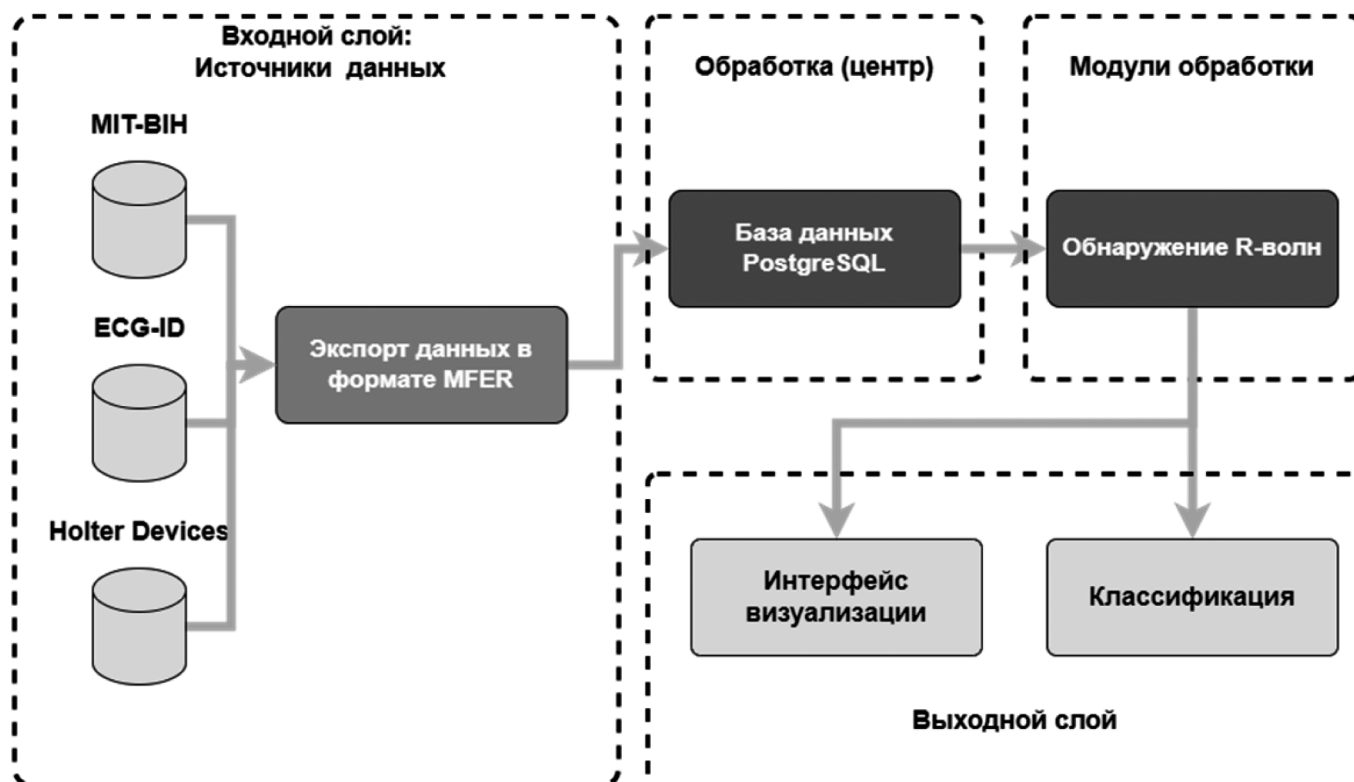


Рис. 1. Общая архитектура системы

База данных является центральным элементом системы, обеспечивающим хранение ЭКГ-сигналов в унифицированной форме. Реализована на PostgreSQL, она поддерживает масштабируемость и надёжность. Структура включает четыре взаимосвязанные таблицы: сигналы, метаданные, аннотации и субъекты. В них хранятся значения ЭКГ, параметры записи, временные метки R-волн и демографические данные пользователей. Все таблицы связаны уникальным идентификатором (Record ID), что гарантирует целостность и облегчает выборку данных. Схематическая структура базы представлена на Рис. 2.

Система поддерживает импорт ЭКГ-записей в форматах MFER, MIT-BIH и ABS1 [15], автоматически конвертируя их в стандарт MFER [16]. Архитектура легко расширяется добавлением новых модулей преобразования, обеспечивая гибкость и совместимость с различными устройствами регистрации ЭКГ. Для анализа и визуального контроля реализован интерактивный модуль просмотра ЭКГ, позволяющий отображать многоканальные сигналы, перемещаться по временной шкале и просматривать автоматически обнаруженные R-пики. Интерфейс состоит из окна отображения сигнала и панели временной навигации, обеспечивая удобное взаимо-

действие пользователя с системой и контроль результатов обработки.

Модульная архитектура системы обеспечивает расширяемость и независимость компонентов. Каждый элемент — база данных, модуль обработки и визуализация — может функционировать автономно или в составе единой платформы. Такой подход упрощает сопровождение, позволяет интегрировать внешние аналитические инструменты и поддерживает использование системы как в исследовательских лабораториях, так и в телемедицинских приложениях.

Алгоритм обнаружения R-волн

Автоматическое обнаружение R-волн является ключевым элементом системы анализа ЭКГ. Алгоритм сочетает высокую точность и низкую вычислительную сложность, включая три этапа: удаление дрейфа, поиск R-пики и адаптивное обновление порога Рис. 3.

Первый этап устраняет дрейф базовой линии, вызванный дыханием и движением электродов. Применяется медианная фильтрация, вычисляющая среднее значение в окне 450 мс (по 225 мс влево и вправо) для

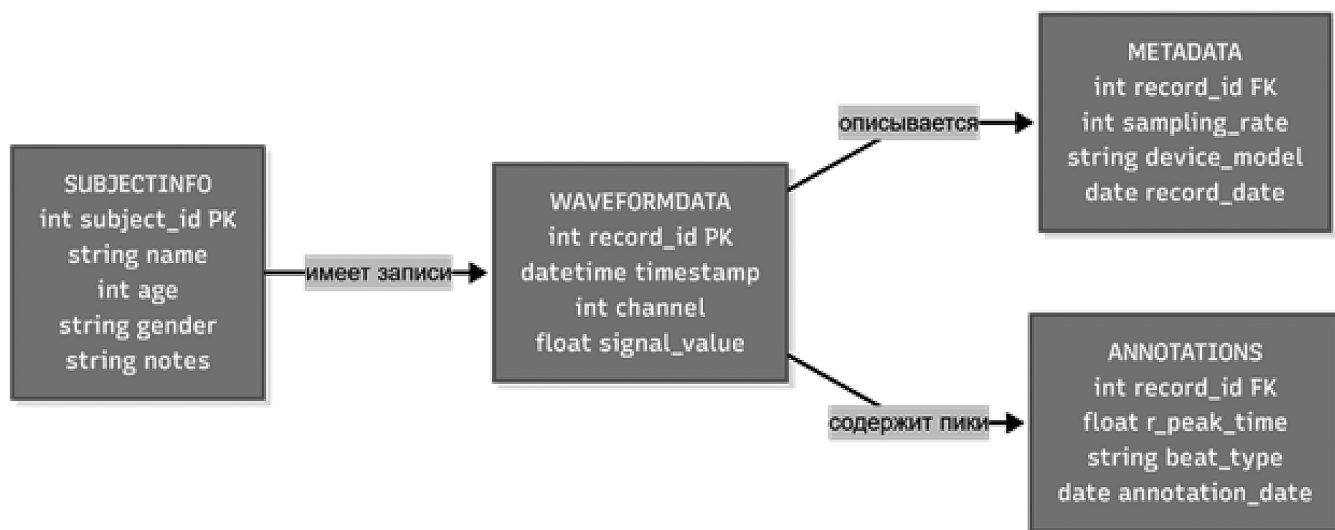


Рис. 2. Структура базы данных

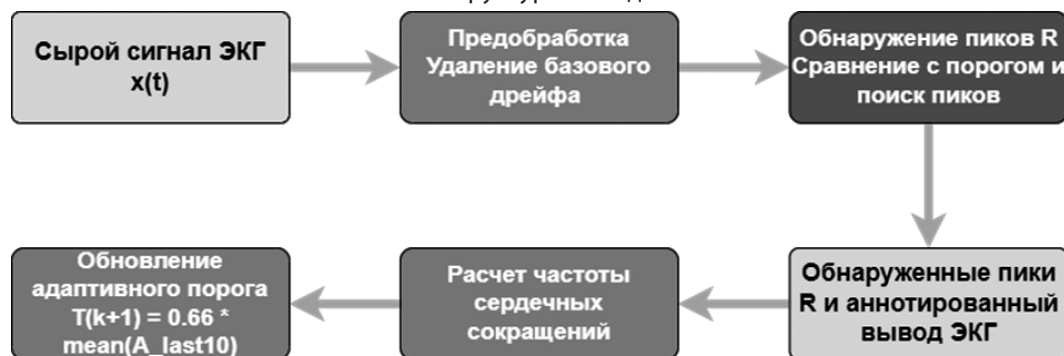


Рис. 3. Общая схема работы алгоритма обнаружения R-волн

удаления низкочастотных компонентов. Очищенный сигнал $y(t)$ определяется выражением [17]:

$$y(t) = x(t) - b(t)$$

Где $x(t)$ — исходный сигнал, а $b(t)$ — значение медианного фильтра. Такое преобразование эффективно устраняет дрейф базовой линии, не искажая форму комплекса QRS.

На втором этапе выполняется поиск R-пиков с использованием адаптивного порога. Первоначальное значение порога T_0 устанавливается равным 0,66 от максимальной амплитуды сигнала, зарегистрированной в первые 10 секунд наблюдения. Алгоритм выполняется последовательно по следующим шагам: (1) Определяются интервалы, где $y(t)$ превышает текущее пороговое значение T_k ; (2) В каждом интервале вычисляется локальный максимум, который рассматривается как кандидат на R-пик; (3) Проверяется временной интервал между текущим кандидатом и предыдущим обнаруженным R-пиком. Если он превышает 0.03 с, пик подтверждается как R-волна; (4) После подтверждения значение порога обновляется по формуле [17]:

$$T_k = 0.66 \times \frac{1}{10} \sum_{i=k-9}^k A_i$$

Где A_i — амплитуда ранее обнаруженных R-волн. Таким образом, алгоритм динамически корректирует чувстви-

тельность порога в зависимости от амплитуды сигнала, адаптируясь к изменениям формы волны. На заключительном этапе производится расчёт частоты сердечных сокращений (ЧСС). После того как все R-пики обнаружены, мгновенная частота вычисляется как [17]:

$$HR = \frac{60}{\Delta t_i}$$

Где Δt_i — временной интервал между двумя последовательными R-пиками. Усреднение этого значения по скользящему окну позволяет получить сглаженную оценку частоты сердечного ритма, которая используется для мониторинга состояния и анализа физиологических показателей.

Предложенный алгоритм отличается простотой и адаптивностью. В отличие от методов Pan-Tompkins и CWT, он не требует сложных вычислений и статических параметров. Динамическое обновление порога обеспечивает точное выделение R-пиков при шуме, что делает его пригодным для встроенных и биометрических систем.

Результаты

Для оценки эффективности системы проведены эксперименты с использованием MIT-BIH Arrhythmia Database, содержащего 48 аннотированных двухканальных записей ЭКГ. Аннотации экспертов использовались как эталон, а качество работы алгоритма оценивалось по трём метрикам: Precision, Recall и Accuracy. Для срав-

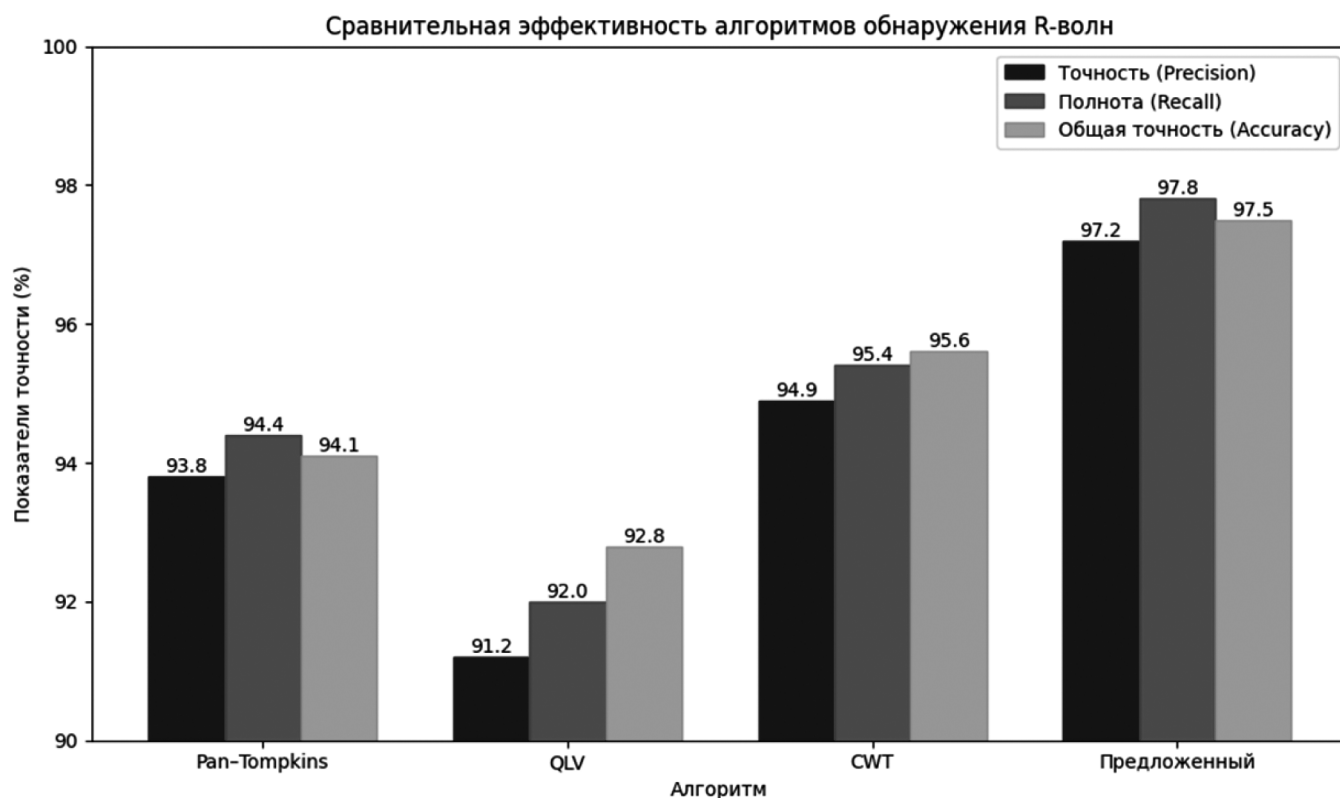


Рис. 4. Сравнение точности обнаружения R-волн

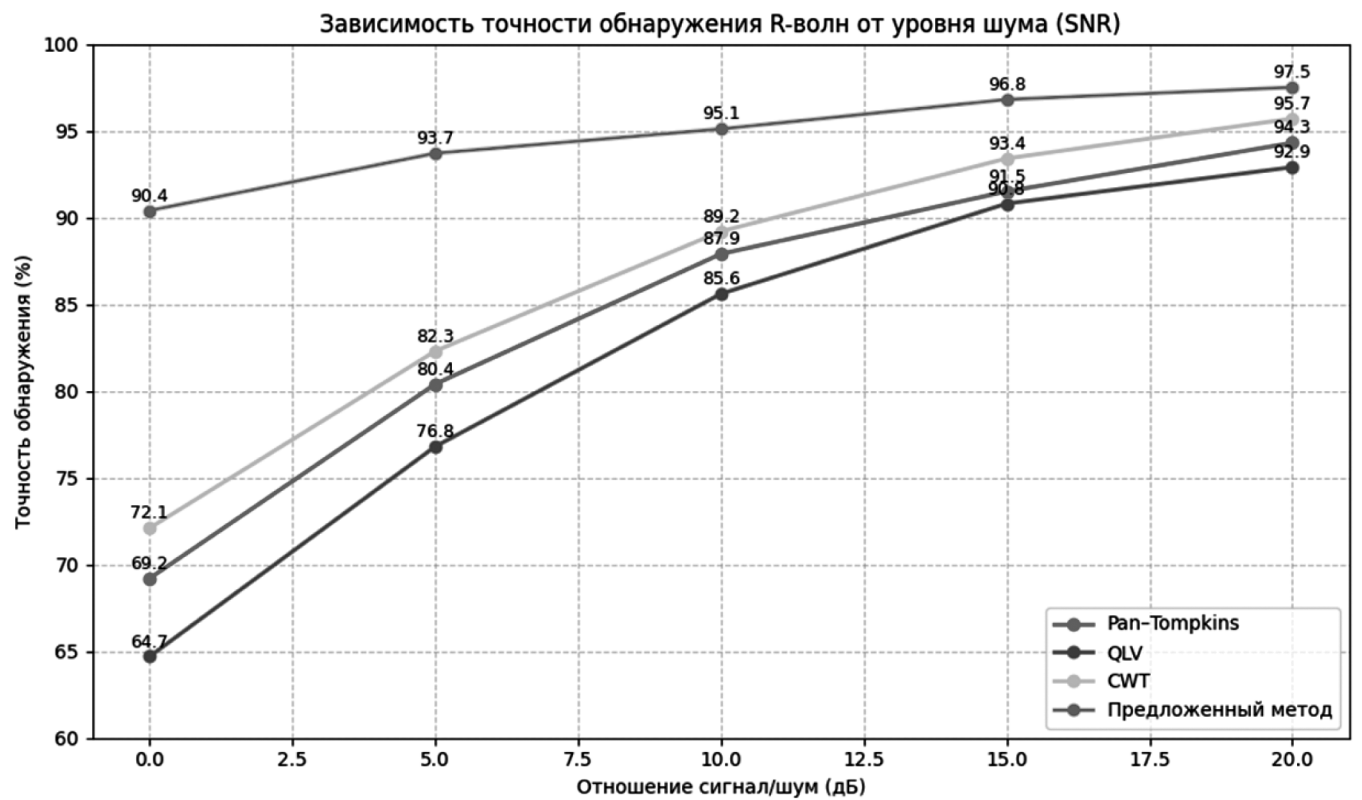


Рис. 5. Анализ устойчивости алгоритмов к шумам

нения эффективности алгоритм протестирован наряду с методами Pan-Tompkins, QLV и CWT на одинаковых участках сигнала. Результаты Рис. 4–5 показывают наивысшую точность и устойчивость предложенного метода к шумам и деформациям сигнала.

Средняя точность детекции составила 97,5 %, превысив результаты Pan-Tompkins (94,1 %), QLV (92,8 %) и CWT (95,6 %). Наибольшее преимущество наблюдалось при дрейфе базовой линии и низкой амплитуде сигнала, где классические методы ошибались. Медианная фильтрация и адаптивный порог обеспечили стабильную работу алгоритма. Для оценки устойчивости алгоритма данные разделены на две группы: А — записи высокого качества и В — сигналы с артефактами. Средние результаты (Табл. 1) показали: в группе А точность 98,3 %, полнота 97,8 %; в группе В — 92,6 %, что на 10–12 % выше классических методов QLV и CWT.

Рис. 6 показывает детекцию P-, QRS- и T-волн с точным определением R-пику и сохранением формы сигнала.

Рис. 7 показывает влияние шума и эффективность фильтрации. Верхний график демонстрирует зашумлённый сигнал с дрейфом и искажением P- и R-волн, нижний — восстановленный после медианной и низкочастотной фильтрации, подтверждающий устойчивость алгоритма при низком отношении сигнал/шум.

Матрица ошибок Рис. 8 показывает минимальное число ложных и пропущенных R-волн, что подтверждает

Таблица 1. Результаты работы алгоритма по группам А и В

Группа	Тип данных	Точность (Precision %)	Полнота (Recall %)	Общая точность (Accuracy %)	Комментарий
А	Сигналы высокого качества (Precision > 0,7, Recall > 0,7)	98,4	97,8	98,3	Стабильная базовая линия, нормальная морфология
В	Сложные сигналы с шумом и артефактами	93,1	92,0	92,6	Дрейф базовой линии, артефакты движения

высокую точность и устойчивость предложенного алгоритма.

Для оценки вычислительной эффективности проведено сравнение времени обработки (30 мин, 360 Гц, Рис. 9). Предложенный метод работает менее чем за 1,2 с, почти вдвое быстрее Pan-Tompkins и CWT, что подтверждает пригодность для систем реального времени.

Полученные результаты демонстрируют, что предложенный метод обеспечивает оптимальный баланс между вычислительной эффективностью и точностью

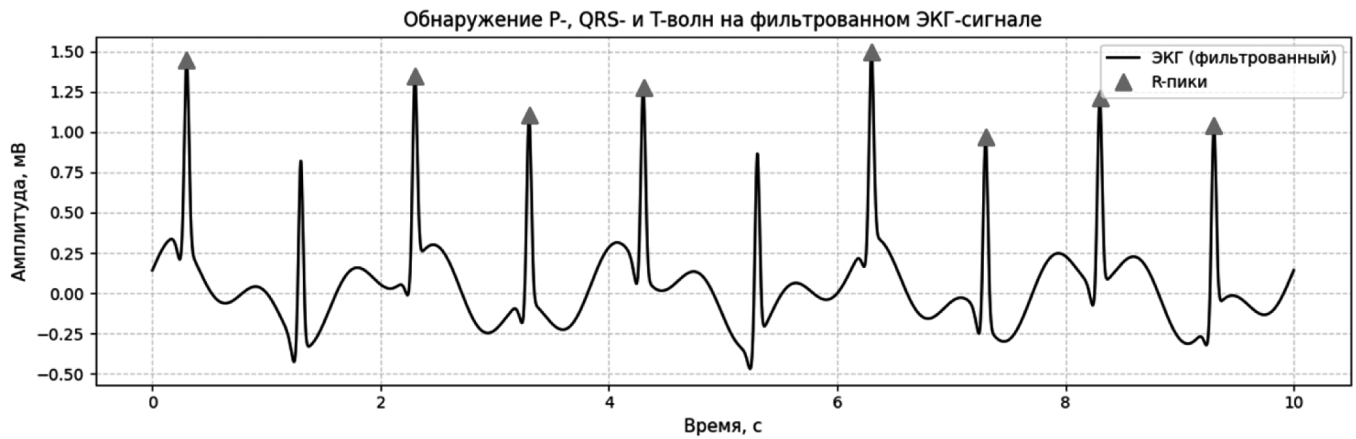


Рис. 6. Обнаружение P-, QRS- и T-волн на фильтрованном ЭКГ-сигнале

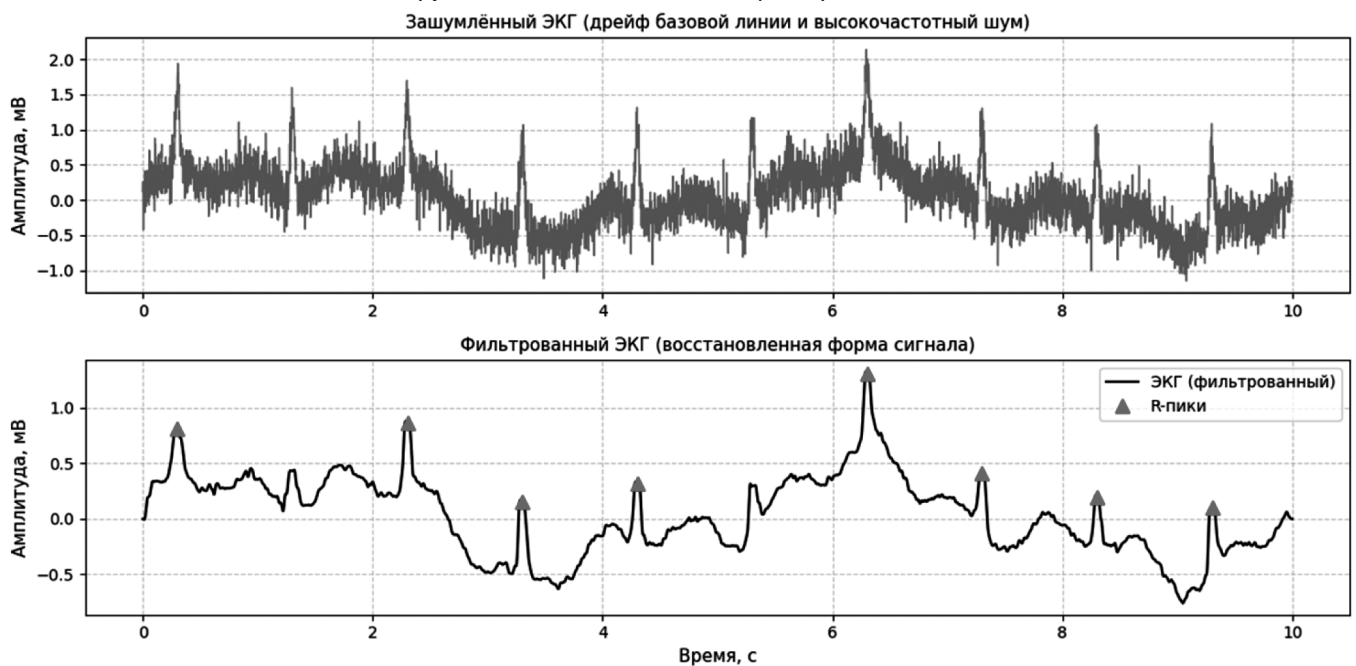


Рис. 7. Сравнение зашумлённого и фильтрованного ЭКГ-сигнала

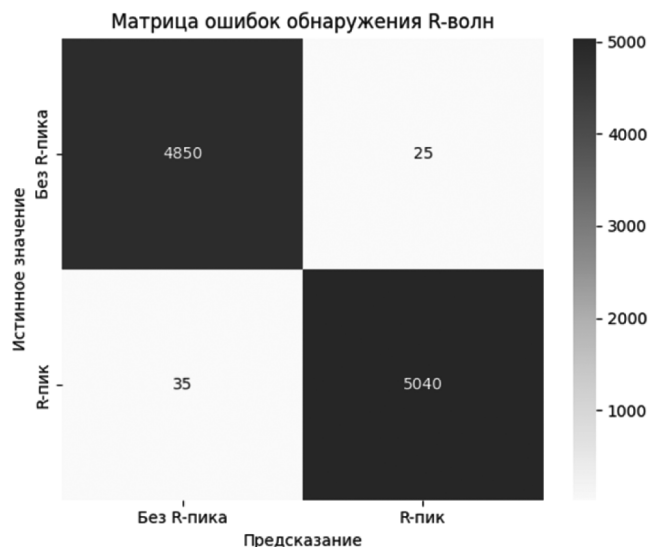


Рис. 8. Матрица ошибок обнаружения R-волн

обнаружения, что делает его подходящим для интеграции в масштабируемые биометрические и телемедицинские платформы.

Заключение

В работе представлена интегрированная система хранения и анализа ЭКГ-данных, объединяющая реляционную базу данных и адаптивный алгоритм обнаружения R-волн. Реализованная на Python и PostgreSQL, она обеспечивает масштабируемое хранение, визуализацию и аннотирование сигналов. Алгоритм с медианной фильтрацией и адаптивным порогом точно выделяет R-пики даже при шуме и дрейфе базовой линии. Тестирование на MIT-BIH Arrhythmia Database показало точность 97,5 %, подтверждая эффективность метода. Планируется расширение системы за счёт мультимодальных биометрических подходов (ЭКГ+PPG) и внедрения нейронных сетей для повышения устойчивости.

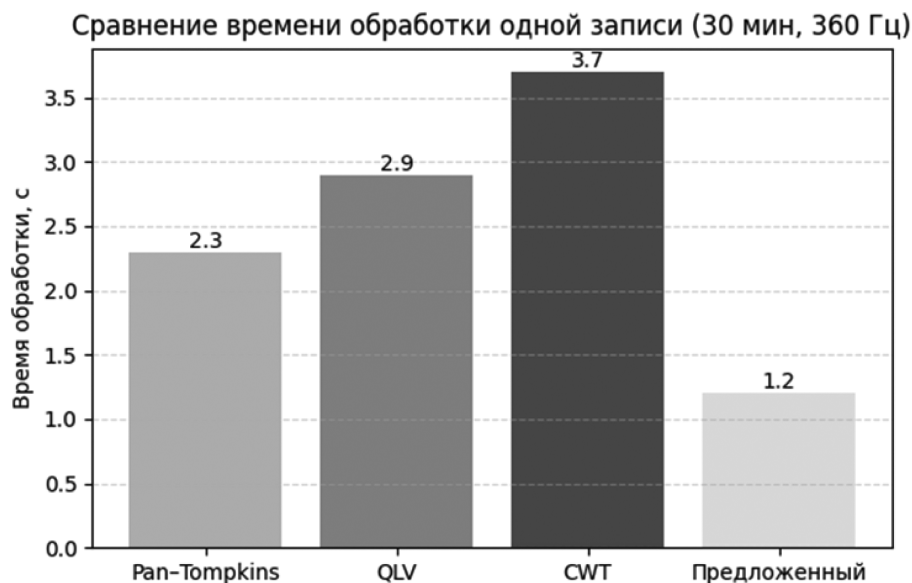


Рис. 9. Сравнение времени обработки различных алгоритмов

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуардуччи С. и др. Сравнительный анализ сенсоров для мониторинга здоровья человека: носимые, не непрерывные и бесконтактные устройства. 2024.
2. Бенхамида А. и др. Проблемы архивирования долгосрочных непрерывных данных ЭКГ — обзор. 2019.
3. Йович А. и др. Проблемы проектирования программных архитектур для веб-платформ анализа биомедицинских сигналов. 2018.
4. Пэн С., Фань Цз., Чжу Ч. Обнаружение R-пиков для систем биомедицинского мониторинга ЭКГ. 2021.
5. Чэнь С. и др. Распознавание комплекса QRS на основе адаптивного вейвлет-порога и преобразования Гильберта для непрерывных ЭКГ // Международная конференция по биоинформатике и интеллектуальным вычислениям. 2022.
6. Сетиявидаят С., Рахман А.Ю. Новый метод определения значения пика R и длительности каждого цикла электрокардиограммы. 2018.
7. Чжао К. и др. Надёжный алгоритм детекции комплекса QRS и точного определения пиков R для носимых ЭКГ-сенсоров // Наука в Китае, серия F: Информационные науки. 2021.
8. Фариха М.А.З. и др. Анализ производительности алгоритма Pan-Tompkins при зашумлённых ЭКГ-сигналах. 2020.
9. Оливьери П. и др. Влияние предварительной обработки сигналов на итоговую интерпретацию аналитических данных — учебное пособие // Analytica Chimica Acta. 2019.
10. Малик Дж., Солиман Э.З., Ву Х.-Т. Адаптивный алгоритм детекции комплекса QRS для сверхдолгосрочных записей ЭКГ // Журнал электрокардиологии. 2020.
11. Стасолла М., Нейт Кс. Объединение вейвлет-преобразования и математической морфологии для обнаружения изменений во временных рядах. 2017.
12. Чан Т.Х. Совершенствование методов обнаружения характерных точек биомедицинских сигналов на основе непрерывного вейвлет-преобразования в потоке данных. 2018.
13. Мохд Апанди З.Ф. и др. Метод снижения шума на основе автокорреляции для пороговой детекции сердечных сокращений // Международная конференция по передовым мехатронным системам. 2020.
14. Туен Л.Т., Вуонг П.К., Нинь Т.Т. Оптимизированный алгоритм детекции пиков в зашумлённых периодических и квазипериодических сигналах // Бюллетень электротехнической инженерии и информатики. 2022.
15. Родригес Ж. и др. Хранение биомедицинских сигналов: сравнительный обзор форматов и баз данных. 2019.
16. Берланд Т., Граут К. Стандарты и интероперабельность // Procedia Computer Science. 2017.
17. Каро-Мартин К.Р. и др. ERFo: алгоритм извлечения диапазона оптимальных частот для фильтрации электрофизиологических записей. 2018.

© Азаб Мохамед Абдалла Эльсайед (mohamed.a.azab@itmo.ru); Сила Анастасия Станиславовна (cstfokina@gmail.com);

Коржук Виктория Михайловна (vmkorzhuk@itmo.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

УЛУЧШЕНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ ЗАХВАТА С ПОМОЩЬЮ GGCNN И МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

IMPROVING GRASP POSE GENERATION USING GGCNN AND PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS

A. Andreev

Summary. The article is dedicated to the development of a modified grasp pose generation algorithm based on GGCNN with the integration of principal component analysis (PCA) to improve the accuracy of robotic object grasping without retraining the neural network.

This problem is highly relevant given the evolving methods of machine vision and neural network approaches in robotics. Working with three-dimensional images is increasingly popular as a replacement for classical machine vision techniques and two-dimensional image processing. As robotic systems and mobile robots advance, a challenge arises in grasping objects that are often randomly located within the robot's operational workspace. This necessitates the use of advanced methods for object detection and subsequent grasping. Equally important is the application of specific algorithms for seemingly simple tasks such as picking up, transferring, and sorting objects in industrial production.

This work proposes an enhanced approach that combines the generative grasping convolutional neural network (GGCNN) with PCA analysis. The methodology includes preprocessing of input data—namely the depth map from an Intel RealSense camera—analyzing the object grasp probability map using PCA, and transforming the data into a format suitable for grasp execution. Experimental data were collected using a pretrained GGCNN on the Cornell dataset to obtain metrics for grasp success.

As a result of this work, an acceptable grasp success probability of approximately 95.6 % was achieved for the test object by applying PCA to the parametric grasp probability map. The study also evaluated grasp probabilities under various point-selection parameters for PCA when dealing with a symmetrical object.

The proposed method increases the object grasp success probability without retraining the neural network, thereby reducing the labor required to create and label training datasets and retrain the network for new objects. It also reduces the number of output parametric maps and, consequently, decreases the dimensionality of the network's output.

Keywords: principal component analysis, PCA, robotic grasping, GGCNN, convolutional neural networks, CNN, manipulation tasks, computer vision, robotics.

Андреев Андрей Валерьевич

Национальный исследовательский университет ИТМО
ext13033@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена разработке модифицированного алгоритма генерации положений захвата на основе GGCNN с интеграцией метода главных компонент (PCA) для повышения точности роботизированного захвата объектов без переобучения нейросети.

Данная проблема актуальна и необходима к рассмотрению в силу развивающихся методов технического зрения и нейросетевых подходов в сфере роботизации. Работа с трёхмерными изображениями всё больше и больше набирает популярность в замену классических подходов машинного зрения и работы с двухмерными изображениями. С развитием робототехнических средств и мобильных роботов возникает проблема, которая заключается в захвате объектов, которые зачастую находятся в операционном пространстве роботизированного захвата хаотично и необходимо использовать продвинутые методы для обнаружения объектов и последующего захвата и что не менее важно, необходимо применять некоторые алгоритмы для таких простых задач, как захват и перенос объектов, а также сортировка объектов, в случае промышленного производства

В работе предложен усовершенствованный подход, сочетающий генеративную свёрточную нейронную сеть GGCNN с PCA-анализом. Методология включает: предварительную обработку входных данных, а именно глубинной карты, которая поступает с камеры RealSense, анализ карты вероятности захвата объекта с помощью метода главных компонент и получение, а также преобразование данных в формат для захвата объекта. Сбор экспериментальных данных проводился на основе предварительно обученной нейросети GGCNN на датасете Корнелла (Cornell dataset) с целью получения метрики успешности захвата.

В результате данной работы удалось получить приемлемый результат вероятности захвата объекта, порядка 95,6 %, для исследуемого объекта с применением метода главных компонент на параметрическую карту вероятности захвата объекта, а также оценить вероятность захвата при различных параметрах выбора точек для работы с методом главных компонент для симметричного объекта.

Применение предложенного метода привело к повышению вероятности захвата объекта без переобучения нейросети, а значит и уменьшению затрат на создание наборов данных для обучения и переобучение сети для необходимых объектов, а также уменьшению выходного числа параметрических карт, а в следствии и уменьшение размерности выхода нейросети.

Ключевые слова: метод главных компонент, PCA, роботизированный захват, GGCNN, свёрточные нейронные сети, CNN, манипуляционные задачи, компьютерное зрение, робототехника.

Введение

Основная задача работы сводится к тому, чтобы улучшить вероятность захвата объекта с применением свёрточной нейросети для генерации положения захвата GGCNN без переобучения сети для нового объекта, который не содержится внутри обучающего датасета, а также уменьшить выходную размерность нейросети с целью уменьшения загрузки системы без значимой потери в точности, а также снизить трудозатраты на создание нового размеченного датасета для переобучения нейросети, что является достаточно трудоёмкой задачей.

В робототехнике данная проблематика имеет значение, поскольку нейросетевые алгоритмы внедряются повсеместно, начиная с производственных линий, заканчивая мобильными роботами различного назначения.

Как справедливо отмечается в работе [1], роботизированный захват остаётся ключевым навыком для выполнения сложных операций, при этом точных захвата произвольных объектов в неструктурированных средах продолжает оставаться сложной для решения исследовательской проблемой. Как приводится в этой работе, современные методы захвата включают в себя три ключевых аспекта: детекция захвата, планирование пути и управляющая подсистема. В нашей работе исследование сфокусировано на работе над первым этапом через интеграцию GGCNN и PCA.

Материалы и методы

В данной статье в качестве объекта изучения использовалась свёрточная нейронная сеть для генерации положения захвата объекта GGCNN (Grasp Generative CNN). Данная сеть используется для получения положения роботизированного двухпальцевого схвата. В текущем случае будет использоваться только одна карта параметров — карта вероятностей захвата.

Метод главных компонент позволяет получить угол захвата объекта, не прибегая к использованию дополнительных карт параметров с выхода GGCNN. В отличие от архитектуры MultiGrasp [2], где используется локально-ограниченный механизм предсказаний (сетка 7×7), наш метод применяет PCA к карте вероятностей GGCNN. Это позволяет: избежать жесткой привязки к сетке, автоматически определять главные оси захвата, однако позволяет работать только с объектами симметричной формы без модификации архитектуры.

Литературный обзор

В одной из статей приводится утверждение «Большинство методов обеспечивают высокий процент успе-

ха за счет обучения сети на наборах данных с большим количеством аннотаций захватов, что требует значительных трудозатрат и ресурсов. Поэтому достижение высокой точности захвата в стопке объектов без аннотаций остается сложной задачей.» [3, с. 1477–1490]. Данная статья предлагает решение в области робототехники в задаче захвата объекта без обучения нейросети на большом наборе аннотационных или обучающих данных. Проблематика данной статьи поднимается таким образом, что обучение нейросетей с использованием новых датасетов является трудоёмкой и сложной задачей. Данная проблема также имеет решение в текущей статье.

«Использование машинного обучения в роботизированном захвате значительно повышает гибкость и адаптивность систем, открывая новые возможности для автоматизации в динамичных отраслях» [4]. Данная цитата лишний раз подтверждает, что машинное обучение и методы, базированные на искусственном интеллекте, являются достаточно гибкими и добавляют адаптивности системам, что подтверждается в проделанной работе.

«Объединяя перцепционные возможности глубокого обучения с геометрической верификацией, данная работа продвигает развитие автономных роботизированных систем, предлагая масштабируемое решение для промышленной автоматизации, ориентированное на точность и адаптивность» [5]. В текущей работе также используются гибридный метод, обеспечивающий достаточно высокую скорость для систем реального времени с высокой частотой кадров, порядка 20 и более кадров в секунду, однако используется метод из области статистики, а именно метод главных компонент, который позволяет снизить размерность данных системы. Так, например в нашей работе производится переход от двухмерной карты вероятности захвата к одномерной главной компоненте, в следствии чего мы можем получить ориентацию двумерного облака точек в пространстве, а значит и ориентацию объекта для успешного захвата.

Также, в другой научной публикации приводится заключение о том, что раньше роботизированные руки на производствах требовали специального программирования для каждой конкретной задачи, например, захват объекта из фиксированного местоположения с известной заданной ориентацией, однако на текущий момент «современные нейронные сети обладают автономными возможностями, которые активно используются для совершенствования робототехники и повышения точности позиционирования» [6, с. 497–519].

Также в одной из работ приводится реализация системы подобной на реализованную в данной работе, за исключением, что используется связка YOLOv4+GGCNN для захвата объекта [7]. В данной работе показатель обработки одного кадра составляет порядка 0,11 секунды, а ве-

роятность захвата объектов составляет порядка 86,0 %. Данная работа полагается на работу с большим числом различных сред, что в целом обеспечивает достаточно сложные для испытания обстоятельства, однако стоит обратить внимание на параметр скорости обработки кадра. Значение в 0,11 секунды на обработку одного кадра является достаточным значением для систем реального времени, однако в нашем случае скорость обработки одного кадра имеет скорость несколько выше в силу более простой системы обработки изображения.

Результаты

Система представляет из себя достаточно сложную и многоуровневую систему, представленную на структурной схеме на Рис. 1.

Данная система реализована в имитационной среде с целью обеспечить автономность выполнения экспери-

мента. Алгоритм выполнения эксперимента представлен на алгоритмической блок-схеме на Рис. 2.

Приведём краткое описание данной блок-схемы.

1 — начало выполнения алгоритма.

2 — запуск рабочей среды и инициализация необходимых программных классов, таких как: CSVLogger, RobotControl, ImageProcess и GazeboObjectManager. Все объекты необходимы для решения соответствующих их названию задач.

3 — отведение робота в домашнюю позицию выполняется с целью освобождения рабочей области для последующего создания на ней объектов.

4, 12 — цикл эксперимента, который выполняется необходимое число раз. С целью обеспечения достоверно-

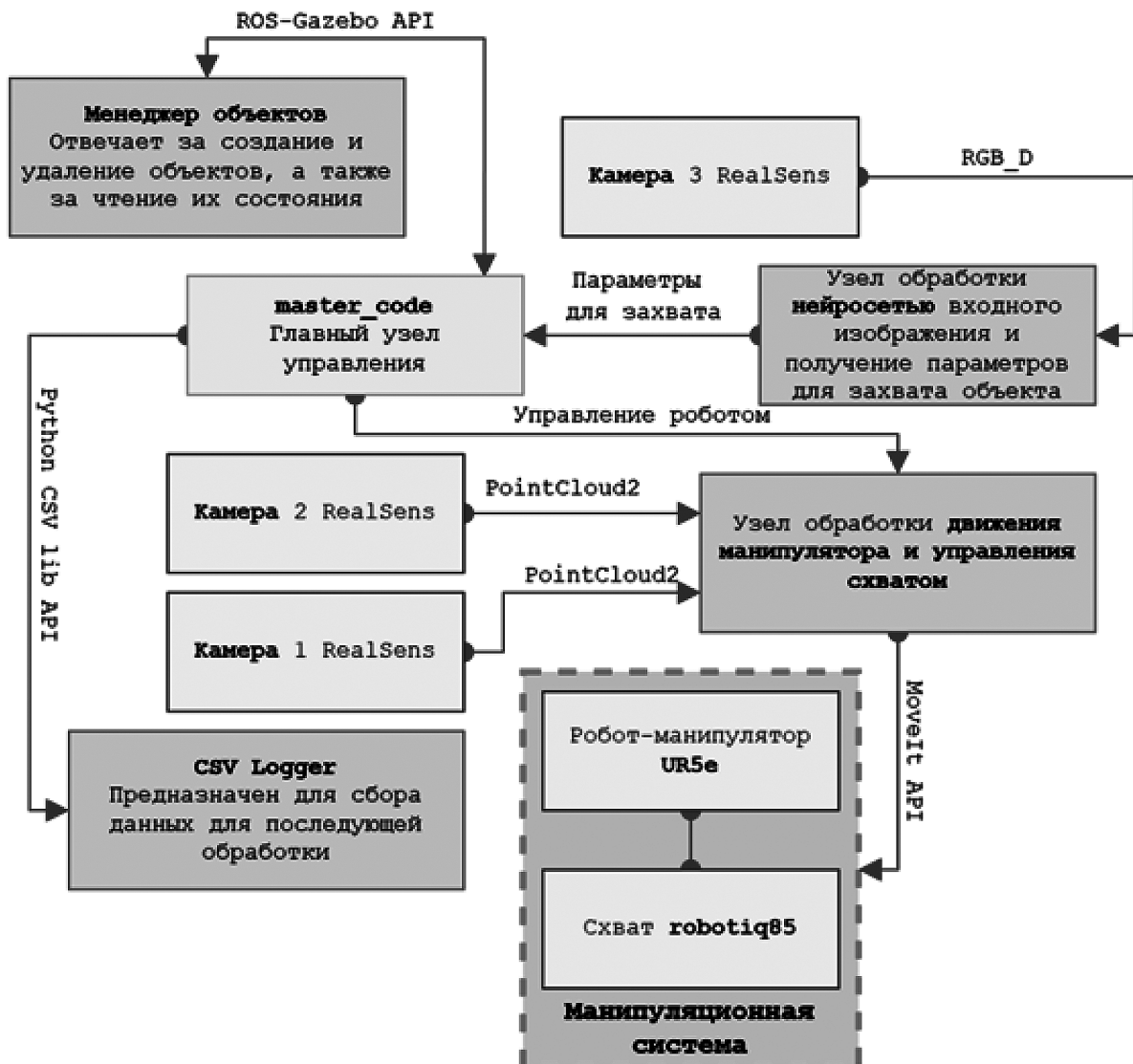


Рис. 1. Структурная схема системы для автоматизированной оценки системы алгоритма захвата объекта

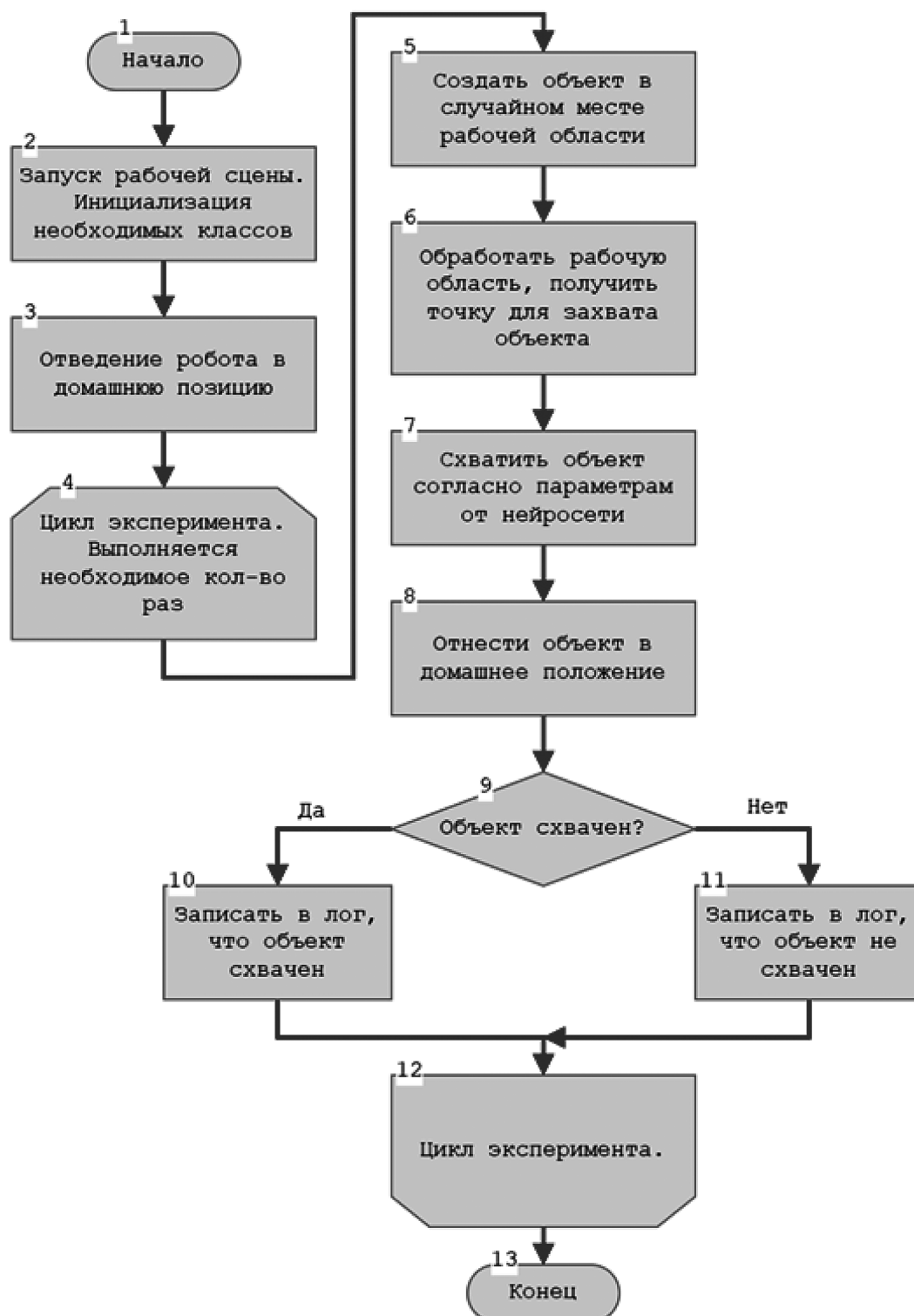


Рис. 2. Алгоритмическая блок-схема проведения эксперимента

сти результатов было выбрано число испытаний порядка сотни циклов эксперимента.

5 — создание объекта в случайном месте рабочей области. Рабочая область представляет из себя область видимости камеры направленной перпендикулярно вниз на платформу. Объект создаётся в случайном месте

таким образом, чтобы оставаться в области видимости камеры полностью. В случае, если объект ранее был создан, то предыдущий объект предварительно будет удалён.

6 — обработка рабочей области происходит в несколько этапов, которые включают нормализацию глу-

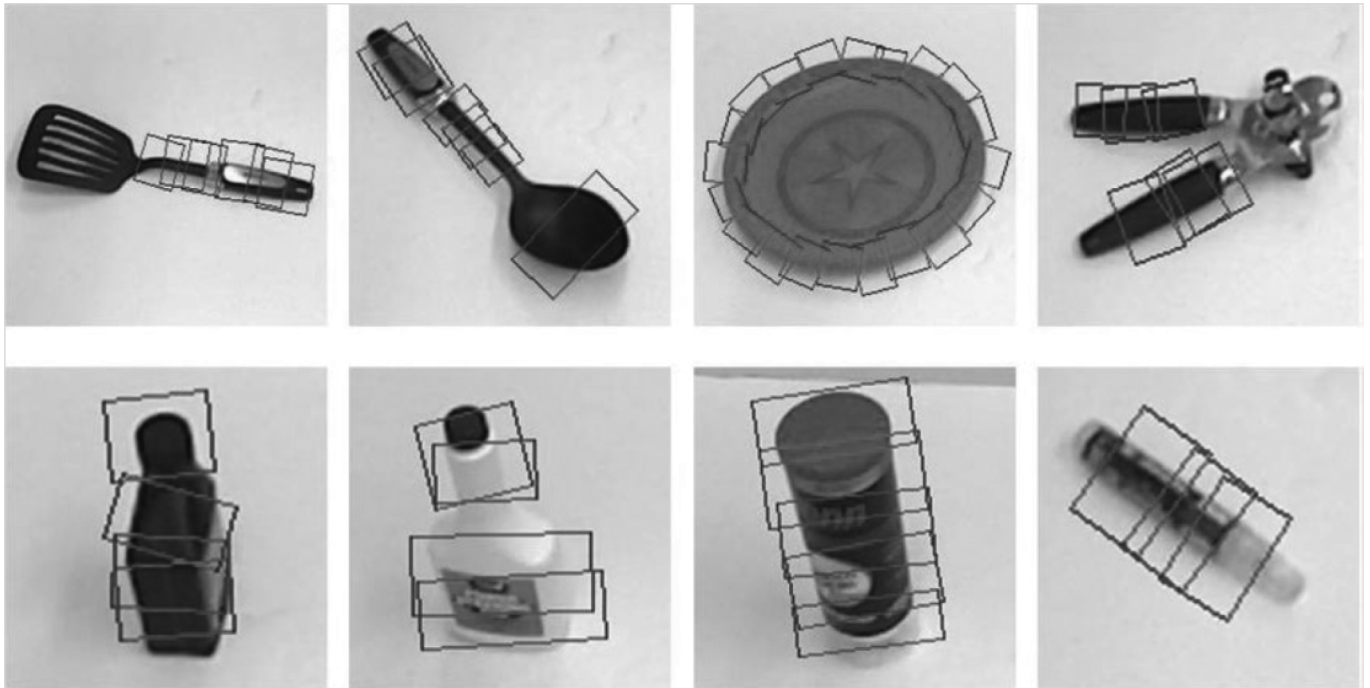


Рис. 3. Пример объектов набора данных Корнелла для обучения нейросети

бинного изображения, фильтрация артефактов и обработка карты через нейросеть, применение алгоритма для получения параметров захвата.

7 — захват объекта происходит также в несколько этапов. Сначала манипулятор разворачивает фланец согласно одному из параметров захвата объекта — углу поворота. Затем происходит позиционирование захвата над объектом в положение захвата и последующее перпендикулярное опускание манипулятора к объекту и последующих захват.

8 — относим объект в домашнее положение.

9 — проверка захвата объекта производится с помощью машины состояний, которая позволяет получить положение и ориентацию объекта. В случае, если объект был захвачен, выполняется переход к блоку 10 и в csv файл выполняется запись о том, что объект был захвачен. В случае, если объект захвачен не был, выполняется переход к блоку 11 и соответствующая запись в csv файл.

13 — конец выполнения алгоритма.

Изначально в качестве параметров для захвата использовались параметры сформированные исключительно нейросетью. Таким образом вероятность захвата составляла крайне низкое значение для практического применения, порядка 45 %. Такой низкий результат вероятности захвата обусловлен тем, что в исходном наборе данных для обучения камера располагалась к объектам под некоторым углом относительно нормали рабочей области. Пример датасета приведён на Рис. 3. В нашей

же системе используется объект, который не содержится в обучающем датасете. Задача состояла в том, чтобы без переобучения свёрточной нейросети получить приемлемую вероятность захвата изучаемого объекта.

Наибольший интерес для исследования представляет карта вероятности захвата объекта, которая генерируется с помощью свёрточной нейросети. Данная карта вместе с глубинной картой рабочей области представлена на Рис. 4. Стоит отметить, что мы проводили изучение объекта с размерами 50x50x150 мм.

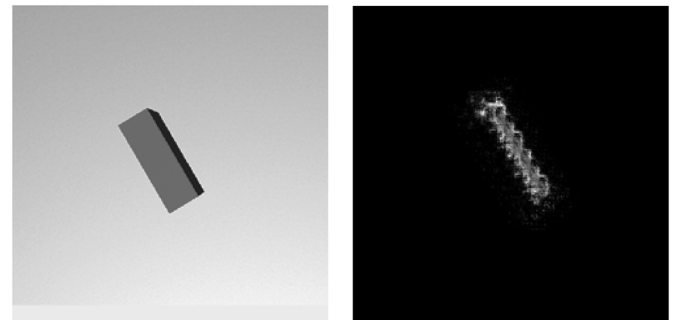


Рис. 4. Глубинная карта рабочей области (слева) и карта вероятности захвата от нейросети (справа)

Карта вероятности захвата представляет собой некоторое облако точек, которое отражает вероятность успешного захвата в каждой точке изображения. Значения от 0 до 1, где 1 — наилучшее место для захвата. Проводя аналогию с Рис. 4, более светлые пиксели соответствуют наибольшей вероятности успешного захвата объекта, а более тёмные соответствуют обратному. Как это должно работать на практике: на вход GGCNN по-

даётся RGB-D карта рабочей области, нейросеть предсказывает три карты параметров (Quality/Q-map, Angle, Width), алгоритм выбирает точку с наибольшим значением Q-map и затем смотрит соответствующие значения Angle и Width на соответствующих картах для точки с наибольшей вероятностью захвата [5]. Однако такой подход показывает не самые лучшие результаты, поскольку камера в нашем случае имеет нормальную рабочей области ориентацию, а угол и ширина захвата зачастую определяются некорректно. В следствии чего было принято решение найти альтернативный способ увеличить вероятность захвата объекта без переобучения нейросети.

В качестве решения было принято использовать метод главных компонент PCA, как описано в одной из работ «Чтобы справиться с высокой размерностью пространства конфигурации рук, авторы предлагают отображать траектории рук в более низкое скрытое пространство с использованием анализа основных компонентов (PCA)» [8]. Было принято решение перейти к анализу карты вероятности захвата Q-map с помощью метода PCA для получения двух важных параметров для захвата объекта: ориентация симметричного объекта и центра массы объекта.

Таким образом, новый алгоритм определения параметров захвата объекта включил в себя дополнительно обработку карты вероятности захвата с помощью метода главных компонент, однако было дополнительно принято решение отфильтровать точки с низкими вероятностями захвата и оставить исключительно точки в высокими вероятностями захвата. Так на рисунке 5 приведена сравнительная характеристика для выявления вероятности захвата объекта.



Рис. 5. Графическая интерпретация отсеечения точек с вероятностью захвата выше 0,5 слева и 0,9 справа (серые точки), центром массы объекта (светло-серая точка) и главной компонентой (темно-серая линия)

Также были собраны данные о том, насколько реальный геометрический центр отличается от центра массы, рассчитанного по средним координатам отфильтрованных точек, объекта и абсолютное среднее арифметическое отклонение главной компоненты от истинной ориентации объекта. Данные представлены в таблице 1.

Для объективной оценки нашего подхода сравним его с современными аналогами. Система Gu et al. [9], те-

Таблица 1.
Отклонение полученных алгоритмом параметров объекта от реальных параметров объекта

Отсечение Q	$Q \geq 0,5$	$Q \geq 0,75$	$Q \geq 0,9$
Среднее арифметическое отклонение рассчитанного центра массы от истинного, мм	2,82	2,92	2,63
Максимальное отклонение рассчитанного центра массы объекта от истинного, мм	5,02	5,44	5,37
Среднее арифметическое отклонение главной компоненты от реальной ориентации объекта, °	2,28	1,89	1,92
Максимальное отклонение главной компоненты от реальной ориентации объекта, °	6,09	6,08	5,64

стировавшаяся на тех же датасетах, показывает точность 97.8 % (Cornell, image-wise), однако требует предварительного обучения и человеческого участия. Наш метод, хотя и демонстрирует несколько меньшую точность (95.6 %), работает полностью автономно и не нуждается в переобучении для новых объектов.

Обсуждение

Как можно заметить из таблицы 2 с отсечением $Q \geq 0,9$, которая показывает наибольшую вероятность захвата объекта среднее отклонение имеет значение между отсеечениями $Q \geq 0,5$ и $Q \geq 0,75$. Это обосновано тем, что при отсечении $Q \geq 0,5$ большое число точек имеет достаточно низкую вероятность захвата объекта и находится на краю объекта, что и вызывает такое большее отклонение рассчитанного центра массы объекта от истинного центра массы.

В случае с отсечением $Q \geq 0,75$ получаем лучшие результаты с точки зрения отклонения рассчитанного геометрического центра от реального. Это связано с тем, что в данном случае отсекаются точки с достаточно малыми вероятностями захвата, которые расположены около краёв объекта, но при этом сохраняется достаточное число точек, которые при усреднении дают координату самую близкую к реальному геометрическому центру объекта.

В случае с отсечением $Q \geq 0,9$ начинает немного увеличиваться отклонение рассчитанного центра массы объекта от реального центра массы, при этом значение не превышает значение в случае с отсечением $Q \geq 0,5$. Стоит отметить, что при этом отсеечение $Q \geq 0,9$ показывает наименьшее отклонение главной компоненты объекта, которая отражает ориентацию объекта в пространстве, от реальной ориентации объекта по оси нор-

мальной к рабочей области. Следовательно, можно сделать вывод о том, что отклонение рассчитанного центра массы объекта имеет меньшее влияние, чем отклонение рассчитанной ориентации объекта от реальной, однако, важно, что оба фактора оказывают влияние на вероятность захвата объекта.

Хотя метод [10, с. 1149–1161] демонстрирует более высокую точность (98.9 % против 95.6 % в нашем случае), ключевое преимущество нашего подхода — в его универсальности: не требует переобучения для новых объектов; позволяет снизить размерность данных (переход от Q-тар к главным компонентам), что снижает вычислительную нагрузку ещё и за счёт снижения числа выходов нейросети.

Один из недостатков нашего метода в том, что на текущий момент данный подход применим к объектам симметричной, вытянутой вдоль одного из измерений, формой, однако в случае производственных задач зачастую встречаются симметричные вытянутые объекты: небольшие коробки, различные скобяные изделия (болты, винты) и подобные объекты.

Заключение

В данной работе предложен модифицированный алгоритм генерации положений захвата на основе GGCNN с интеграцией метода главных компонент (PCA), что позволило повысить точность роботизированного захвата объектов без необходимости переобучения нейронной сети. Основные результаты исследования заключаются в следующем:

1. Повышение вероятности успешного захвата: Применение PCA к карте вероятности захвата (Q-тар) позволило увеличить вероятность успешного захвата объекта до 95,6 % при отсечении точек с вероятностью захвата $Q \geq 0,9$. Это существенно выше исходного показателя в 45 %, полученного при использовании только GGCNN.
2. Снижение вычислительной нагрузки: Использование PCA позволило уменьшить размерность

выходных данных нейросети, перейдя от двумерной карты вероятностей к одномерной главной компоненте, что снизило нагрузку на систему без значительной потери точности.

3. Уменьшение трудозатрат: Предложенный метод исключает необходимость переобучения нейросети для новых объектов, что значительно сокращает затраты на создание и разметку дополнительных датасетов.
4. Точность определения параметров захвата: Эксперименты показали, что отклонение рассчитанного центра массы объекта от реального составило в среднем 2,63 мм, а отклонение главной компоненты от истинной ориентации объекта — $1,92^\circ$, что является приемлемым для практического применения.

Таким образом, предложенный гибридный подход, сочетающий генеративную сверточную нейронную сеть GGCNN и метод главных компонент, демонстрирует высокую эффективность в задачах роботизированного захвата. Он обеспечивает адаптивность системы к новым объектам без дополнительного обучения, снижает вычислительные затраты и увеличивает точность позиционирования.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на:

- Оптимизацию алгоритма для работы с несимметричными объектами,
- Интеграцию дополнительных методов фильтрации для повышения устойчивости к шумам,
- Тестирование метода в реальных условиях (не только в симуляции) с различными типами захватов.

Применение данного подхода может быть полезно в промышленной автоматизации, логистике и сервисной робототехнике, где требуется высокая скорость и точность захвата разнообразных объектов без постоянной перенастройки системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dong M., Zhang J. A review of robotic grasp detection technology // *Robotica*. — 2023. — Vol. 41, № 12. — P. 3846–3885. — DOI: 10.1017/S0263574723001285.
2. Redmon J., Angelova A. Real-Time Grasp Detection Using Convolutional Neural Networks [Электронный ресурс] // arXiv. — 2014. — arXiv:1412.3128v2 [cs.RO]. — Режим доступа: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.3128> (дата обращения: 16.05.2025). — Принято к публикации в ICRA 2015.
3. Shi M., Hou J., Li Z. et al. NG-Net: No-Grasp annotation grasp detection network for stacked scenes [Электронный ресурс] // *Journal of Intelligent Manufacturing*. — 2025. — Vol. 36. — P. 1477–1490. — Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s10845-024-02321-6> (дата обращения: 22.06.2025).
4. Xie Z., Liang X., Canale R. Learning-based robotic grasping: A review [Электронный ресурс] // *Frontiers in Robotics and AI*. — 2023. — Vol. 10. — Режим доступа: <https://www.frontiersin.org/journals/robotics-and-ai/articles/10.3389/frobt.2023.1038658> (дата обращения: 2.07.2025).
5. Xiao Y. Integrating CNN and RANSAC for improved object recognition in industrial robotics [Электронный ресурс] // *Systems and Soft Computing*. — 2025. — Vol. 7. — P. 200–240. — Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772941925000584> (дата обращения: 2.07.2025).
6. Edeh M.O., Dalal S., Iwendi C., Seth B., Odinakachi N., Chichi A.M. Management and prediction of navigation of industrial robots based on neural network [Электронный ресурс] // *International Journal of Systems Engineering and Management*. — 2024. — P. 497–519. — Режим доступа: <https://doi.org/10.1504/IJSEM.2024.140940> (дата обращения: 6.07.2025).

7. Morrison D., Corke P., Leitner J. Closing the Loop for Robotic Grasping: A Real-time, Generative Grasp Synthesis Approach [Электронный ресурс] // arXiv.org. — 2018. — Режим доступа: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.05172> (дата обращения: 18.06.2025).
8. Arruda E. Generative and predictive models for robust manipulation [Электронный ресурс] // дис. ... д-ра философии (PhD) / University of Birmingham. — 2021. — Режим доступа: <http://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/10305> (дата обращения: 14.07.2025).
9. Gu Y., Wei D., Du Y., Cao J. Cooperative Grasp Detection using Convolutional Neural Network // Journal of Intelligent & Robotic Systems. — 2023. — Vol. 110, № 1. — P. 5. — DOI: 10.1007/s10846-023-02028-5.
10. Shi M., Lu H., Li Z.-X. et al. Accurate Robotic Grasp Detection with Angular Label Smoothing // Journal of Computer Science and Technology. — 2023. — Vol. 38, № 5. — P. 1149–1161. — DOI: 10.1007/s11390-022-1458-5.

© Андреев Андрей Валерьевич (ext13033@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ И НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

SOME ASPECTS OF THE ANALYSIS OF THE CONDITION AND RELIABILITY OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

**D. Bayyr
A. Dulesov
E. Tugar-ool
Ch. Oorzhak
Z. Hoylaarak**

Summary. An information-entropy approach for analyzing the reliability of complex systems in the context of Industry 4.0 is considered. The key idea is the use of a measure of uncertainty (entropy) to assess the state of systems and select optimal structures. Solving this task requires the construction of a probabilistic-informational model that describes the interactions of factors within a complex infrastructure. The research outlines a series of tasks, including building a mathematical model of the object and formalizing reliability assessment criteria. The development of methods for failure prediction and multicriteria optimization of the information infrastructure is also anticipated.

Keywords: measure of information, entropy, model building, reliability, technical systems.

Байыр Долаан Борисович

Аспирант, Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова
dolaan.bayyr@mail.ru

Дулесов Александр Сергеевич

доктор технических наук, доцент, Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова
dulesov@khsu.ru

Тугар-оол Эрес Чкаловович

старший преподаватель, Тувинский государственный университет
teresch1@rambler.ru

Ооржак Чойгана Камаевна

старший преподаватель, Тувинский государственный университет
oorzhak-choygana@mail.ru

Хойлаарак Зоя Комбуй-ооловна

старший преподаватель, Тувинский государственный университет
hzka@mail.ru

Аннотация. Рассматривается информационно-энтропийный подход для анализа надежности сложных систем в условиях Индустрии 4.0. Ключевая идея — использование меры неопределенности (энтропии) для оценки состояния систем и выбора оптимальных структур. Для решения задачи требуется построение вероятностно-информационной модели, описывающей взаимодействия факторов в сложной инфраструктуре. В рамках исследования выделен ряд задач, включая построение математической модели объекта и формализацию критериев оценки надежности. Также предполагается разработка методов прогнозирования отказов и многокритериальной оптимизации информационной инфраструктуры.

Ключевые слова: мера информации, энтропия, построение моделей, надежность, технические системы.

Введение

Эпоха Четвертой промышленной революции, или Индустрии 4.0, характеризуется острой конкурентной борьбой в сфере искусственного интеллекта. Это создает серьезный вызов, связанный с необходимостью обеспечения высокой надежности сложных технических систем. Параллельно наблюдается постоянное усложнение самих объектов и ужесточение требований к автоматизации, которые должны учитывать широкий спектр негативных факторов — от природных до человеческих. Следствием такого комплексного воздействия становится нанесение значительного экономического и материального ущерба.

Современный тренд на интеллектуализацию систем управления для гарантирования заданных параметров надежности диктует необходимость в инновационных подходах. Речь идет о развитии системного анализа для мониторинга состояния объектов и создания механизмов оперативного устранения возникающих сбоев. Учитывая, что в основе оценки надежности лежат вероятностные и стохастические параметры элементов системы [1], закономерным представляется использование специализированных измерительных комплексов. Важное место среди них может занять метрика неопределенности информации, которая количественно выражается посредством информационной энтропии.

Стоит отметить, что энтропийные модели и методы, в особенности классические их версии [2–4], уже доказали свою эффективность в решении задач сетевой передачи данных, что является краеугольным камнем теории информации. Несмотря на это, в области анализа надежности данная метрика не получила должного распространения, что наглядно демонстрирует анализ актуальных стандартов, таких как ГОСТ Р 27.102-2021 и ГОСТ Р 27.018-2021. Аналогичная картина наблюдается и в метрологии: действующие нормативные документы (ГОСТ Р 8.820-2013, ГОСТ Р 8.563-2009) не признают энтропию в качестве меры информации. В то же время в международной научной периодике намечается тенденция к использованию концепций энтропийной эволюции, генерации и флуктуаций для моделирования электрических и теплофизических процессов. Это указывает на то, что потенциальная роль информационной энтропии в метрологии остается открытым вопросом и требует дальнейшего изучения.

Методы системного анализа и моделирования оказываются наиболее востребованными в прикладных сферах при работе со слабоструктурированными и неопределенными проблемными ситуациями [5–7]. В подобных условиях любая дополнительная информация, позволяющая количественно оценить уровень неопределенности, приобретает критически важное значение для анализа надежности. Это особенно важно для решения таких задач, как:

- Сравнительный анализ и выбор наиболее устойчивых системных архитектур из ряда альтернатив.
- Идентификация слабых мест в структуре системы.
- Определение ключевых факторов, воздействующих на надежность объекта [8–10].

Решение обозначенного комплекса проблем требует проведения фундаментальных и прикладных исследований, сфокусированных на создании адекватных математических моделей, практических методик и специализированного программного обеспечения. Целью является получение достоверных данных на основе измерений. Результаты этой работы будут напрямую способствовать повышению качества и точности анализа надежности сложных технических систем.

Значимость и актуальность решения поставленной задачи

Обеспечение устойчивого развития столь критически важной отрасли, как российская электроэнергетика, напрямую зависит от решения задач по оценке надежности, обработке данных и принятию обоснованных управленческих решений. Эти аспекты составляют основу для эффективного управления всем жизненным циклом энергосистемы. Игнорирование данных вопросов неизбежно приводит к физическому и моральному старению инфраструктуры, а также к росту вероятности отказов

оборудования. Экономические последствия подобных сбоев оказываются значительными. В частности, несвоевременное прогнозирование потенциальных нарушений работы системы ведет к срывам заранее утвержденных графиков ремонтов и технического обслуживания. В связи с этим возникает насущная потребность в разработке и внедрении научно обоснованных мер, направленных на профилактику аварийных ситуаций и серьезных отказов. Следует признать, что данная проблема носит комплексный и многогранный характер. Ее границы часто размыты, а для полноценного решения требуется привлечение значительных ресурсов. Исследования, представленные в рамках данной работы, предлагают лишь часть из всего спектра необходимых мер и методик для противодействия указанным вызовам. Несмотря на это, интеграция в процесс анализа надежности тщательно проработанных решений позволит существенно повысить как научную ценность, так и практическую эффективность получаемых результатов. При этом, построение вероятностно-информационной модели, описывающей взаимодействия факторов и наличие причинно-следственных связей в сложной информационной инфраструктуре, позволит выявлять и прогнозировать аварийные ситуации и отказы. Актуальность решения данной задачи обусловлена необходимостью в применении полученных результатов в разнородных инженерных сетях, включающих в себя обширную информационную инфраструктуру.

Кроме этого, разрешение обозначенной проблемы, не исключая из рассмотрения работы [11–13], будет включать в себя решение задач системного анализа технических систем. Одновременно с этим, формализация математического описания объекта позволит эффективно решить задачу оптимизации структуры системы.

В рамках представленной проблематики исследований возможно решение следующих задач:

- 1) Формализация математического описания технической системы.
- 2) Построение вероятностно-информационной модели структурных взаимосвязей устройств/элементов в системе, позволяющая осуществить оценку состояния и прогнозирование возможных аварийных ситуаций и отказов
- 3) Разработка методов и алгоритмов оценки состояния структур изолированных систем.
- 4) Разработка методов анализа надежности открытых систем.

Данные задачи (в практической плоскости) касаются интеграции системного анализа надежности в работу системы с единым центром управления и терминальным доступом. Одним из ключевых аспектов является мониторинг функционирования и состояния отдельных объектов системы.

В целом, реализация задач заключается в поиске научно-обоснованных возможностей и путей решения по применению результатов моделирования и анализа, что позволит обогатить теорию и практику выявления неблагоприятных факторов воздействия на функционирование сложных технических объектов. При этом, снятие неопределенности, как фактора реализации путей решения, связано с необходимостью (на наш взгляд) подключать к процессу моделирования и анализа ряд развивающихся теорий: теория информации (в которой определенную роль играет информационная энтропия, меры количественного разнообразия, неопределенности или случайности открытой системы на базе методов Реньи и Тсаллеса [14–16]); искусственный интеллект (одним из элементов которой признан Data Mining); Big Data (относившиеся к области цифровизации экономики); когнитивные модели (некие абстракции рассматриваемых процессов); классификация и кластеризация данных (с целью выделения взаимосвязанных факторов). Следует отметить, что их применение в совокупности позволит выявить закономерности динамики параметров в процессе обработки данных. В конечном итоге предлагаемые решения позволят получить искомые результаты с меньшими ошибками (которые пока остаются не в полной мере разрешимыми), как факторы снятия существующей информационной неопределенности.

Возможные подходы и методы реализации задач

1. Построение математической модели рассматриваемого объекта, выявление структурных связей. Модель должна обеспечить выявление его возможностей, создание инструментов анализа и вычисление параметров применительно к изолированным системам. Для них проявление внешних и внутренних факторов характеризуется величиной информации и возможностями её обмена с окружающей внешней средой, но не веществом и энергией. Модель должна включать в себя описание структуры рассматриваемого объекта с наличием связей, факторов эндогенного и экзогенного характера, параметров, характеризующих работоспособное и неработоспособное состояния элементов системы.
2. Формирование критериев определения аварийных ситуаций и последствий отказов оборудования. В качестве критерия рассматривается энтропия, которая вычисляется из наличия статистики случайных величин (характеристики рассматриваемых объектов) и необходима для изменения неопределенности состояния объекта, являясь как частным, так и средним уровнем информации или неопределенности, присущей результатам переменных.

Для точного расчета энтропийных показателей система интерпретируется как сигнальная. В рамках такого

подхода в роли сигналов выступают физические параметры, изменяющиеся во времени. К ним относятся, в частности, наработка на отказ, интенсивность отказов, длительность восстановления и планового ремонта, а также другие характеристики, связанные с диагностикой состояния системы. Эти параметры описываются соответствующей функцией времени.

3. Анализ системных показателей, направленный на выявление в их динамике аддитивных, мультипликативных или обобщенных тенденций роста и спада. Эти тенденции служат ключевыми индикаторами текущего состояния системы. Для решения данной задачи целесообразно задействовать аппарат когнитивного моделирования, а также модели Реньи и Тсаллеса. Основное достоинство этих подходов состоит в их способности к универсальному обобщению разнородных данных и корректному учету статистически зависимых событий. Результатом проведенного анализа станет формирование обоснованных рекомендаций по выбору методов оценки надежности, ряд из которых регламентирован действующими стандартами ГОСТ.
4. Совершенствование методов прогнозирования аварийных ситуаций в сетевых системах. Применяются современные методы систематизации данных: иерархический, фасетный и дескрипторный подходы. Процесс классификации сопровождается расчетом дифференциальной энтропии, позволяющей количественно оценить разделение элементов системы на работоспособные и неработоспособные состояния. На следующем этапе выполняется кластеризация параметров, направленная на формирование однородных групп показателей, соответствующих определенным классам надежности и пригодных для использования в инструментах прогнозирования.
5. Разработка информационно-теоретических основ оценки надежности. Методология формализации критериев надежности сложных систем базируется на аппарате теории информации. Центральное место занимает анализ статистических закономерностей распределения случайных величин и исследование функциональных зависимостей между динамикой частот и изменением диагностических признаков. При обработке данных методами Data Mining, включая построение гистограммных временных рядов, существенную роль играет точная оценка расхождений между распределениями. Для повышения достоверности результатов агрегации данных предлагается использовать метрики типа дивергенции Кульбака-Лейблера, обеспечивающие количественную оценку отклонения эмпирических распределений от эталонных моделей.
6. Методология энтропийного анализа надежности систем. Особое внимание уделяется предобра-

ботке исходных данных о надежности и исследованию энтропийных характеристик системной структуры (распределенной или замкнутой). Методика предусматривает анализ как восстанавливаемых, так и невосстанавливаемых элементов. Для оценки эффективности эксплуатационных затрат, направленных на достижение нормативной наработки на отказ, применяется расчет условной энтропии для каждого объекта. Дополнительно определяется энтропия структурных связей, а полученные значения коррелируются с эксплуатационными требованиями к бесперебойности функционирования систем, в частности, при транспортировке энергии в инженерных сетях.

7. Снятие информационной неопределённости в рамках созданной модели включает выполнение ряда работ: формализацию задачи через планирование мероприятий по своевременному включению ресурсов для поддержания надежности, а также разработку методов решения, ориентированных на расчёт величины энтропии и информации. Эти методы служат основой для многокритериальной оптимизации информационной инфраструктуры, которая предусматривает выбор структурных связей, не нарушающих целостность системы и характеризующихся параметрами надежности и энтропийными показателями.
8. Математический аппарат для данной модели требует обоснования и построения методов вы-

числения ключевых информационных мер: условной энтропии для оценки воздействия отказов элементов на систему в целом; совместной энтропии для измерения неопределённости состояний последовательно и параллельно соединенных элементов; взаимной информации для оценки совместных состояний элементов структуры; а также условно-взаимной информации, которая выступает мерой информации для всего спектра элементов, их состояний и структурных связей в системе.

Таким образом, предлагаемые подходы и методы, формализованные в рамках теории информации, позволяют выйти на уровень научно обоснованной оценки состояния и проведения анализа сложных технических систем.

Заключение

Решение задачи о построении вышеупомянутых моделей и разработке методов не только предусматривает внедрение организационных мероприятий, но и реализацию решений, направленных на эффективный анализ надежности систем. Предлагаемые подходы и современные инструменты выработки адаптивных инструментов, способны обеспечить выход на новый уровень в достижении искомых результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сугак Е.В., Василенко Н.В., Назаров Г.Г., Паньшин А.Б., Каркарин А.П. Надежность технических систем. Учеб. пособие для вузов технических специальностей / Под общ. ред. Е.В. Сугака и Н.В. Василенко. — Красноярск: НИИ СУВРТ, 2001. — 608 с.
2. Хартли Р. Передача информации // Теория информации и ее приложения. М.: Физматгиз. 1959. — С. 5-35.
3. Шеннон К.Э. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Иностранная литература, 1963. — 832 с.
4. Хинчин А.Я. Понятие энтропии в теории вероятностей, УМН, 8:3(55) (1953), 3–20.
5. Кудж С.А. Многоаспектность рассмотрения сложных систем // Перспективы науки и образования. — 2014. — № 1. — С 38–43.
6. Цветков В.Я. Сложные технические системы // Образовательные ресурсы и технологии — 2017. — №3(20). — С. 86–92.
7. Аверин Г.В., Звягинцева А.В. О взаимосвязи статистической и информационной энтропии при описании состояний сложных систем // Научные ведомости. Серия Математика. Физика. — 2016. — № 20 (241). — Выпуск 44. — С. 105–116.
8. The logarithmic basis to measure the amount of information related to the assessment of reliability of elements of the technical system. Dulesov A.S., Karandeev D.J., Ereemeeva O.S., Khrustalev V.I., Dulesova N.V. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Workshop «Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering — MIP: Engineering — 2019». Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2019. С. 52003.
9. Approaches to information measurement of the structure state of technical systems. Dulesov A.S., Ereemeeva O.S., Karandeev D.Yu., Dulesova N.V. В сборнике: 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018. С. 8602799.
10. Quantification of information in the closed structure of a technical system. Dulesov A.S., Khrustalev V.I., Dulesova N.V. В сборнике: 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 — Proceedings. 2016. С. 7911658
11. Шамбадаль П. Развитие и приложения понятия энтропии. Перевод с французского, Изд-во Наука, Москва, 1967, 283 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.studmed.ru/shambadal-p-razvitiye-i-prilozheniya-ponyatiya-entropii_bdf39e51986.html (Дата обращения: 01.11.2023).
12. Волькенштейн М.В. Энтропия и информация. — М.: Наука, 1986. — 193 с. (Проблемы науки и технического прогресса).
13. Энтропия в теории информации. Прохоров Юрий Васильевич. [Электронный ресурс]. Последнее обновление 5 мая 2023 г. URL: <https://bigenc.ru/c/entropiia-v-teorii-informatsii-8e42df> (дата обращения 22.02.2024).

14. Constantino Tsallis. Possible Generalization of Boltzmann-Gibbs Statistics. Journal of Statistical Physics, Vol. 52, Nos. 1/2, 1988. [Электронный ресурс]. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01016429> (Дата обращения: 06.11.2023).
15. Колесниченко А.В. Конструирование энтропийной транспортной модели на основе статистики Тсаллиса // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2013. № 33. 23 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-33> (Дата обращения: 06.11.2023).
16. Alfrped Renyi. On Measures of Entropy and Information. Berkeley Symp. on Math. Statist. and Prob., 1961: 547–561 (1961). — URL: <https://projecteuclid.org/proceedings/berkeley-symposium-on-mathematical-statistics-and-probability/Proceedings-of-the-Fourth-Berkeley-Symposium-on-Mathematical-Statistics-and/Chapter/On-Measures-of-Entropy-and-Information/bsmsp/1200512181> — (Дата обращения: 17.06.2023)

© Байыр Долаан Борисович (dolaan.bayyr@mail.ru); Дулесов Александр Сергеевич (dulesov@khsu.ru);
Тугар-оол Эрес Чкаловович (teresch1@rambler.ru); Ооржак Чойгана Камаевна (oorzhak-choygana@mail.ru);
Хойлаарак Зоя Комбуй-ооловна (hzka@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ КОМПАНИИ

DECISION SUPPORT SYSTEMS FOR A DESIGN AND TECHNOLOGY COMPANY

A. Zinoviev

Summary. The research presents definitions of a decision support system. The functions and tasks of such systems are considered. The concept of a design and technology company is defined as an organization that combines design and technology activities and ensures a full cycle of object creation. The specifics of management decisions in such companies are analyzed. It is concluded that the implementation of a decision support system in design and technology companies contributes to the integration of multidisciplinary data, increased forecasting accuracy, and reduced risks. It is noted that the effectiveness of decision support systems is determined by the completeness and quality of the initial data, their industry adaptation.

Keywords: design and technology company, decision support system, artificial intelligence, project, digitalization.

Зиновьев Андрей Николаевич

Аспирант, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента России

Б. Н. Ельцина» г. Екатеринбург

ziandrew96@gmail.com

Аннотация. В работе представлены дефиниции системы поддержки принятия решений. Рассмотрены функции и задачи таких систем. Определено понятие проектно-технологической компании как организации, совмещающей проектную и технологическую деятельность и обеспечивающей полный цикл создания объекта. Проанализирована специфика управленческих решений в таких компаниях. Сделан вывод о том, что оказано, что внедрение системы поддержки принятия решений в проектно-технологические компании способствует интеграции многопрофильных данных, повышению точности прогнозирования, снижению рисков. Отмечено, что эффективность применения систем поддержки принятия решений определяется полнотой и качеством исходных данных, их отраслевой адаптацией.

Ключевые слова: проектно-технологическая компания, система поддержки принятия решений, искусственный интеллект, проект, цифровизация.

Введение

На сегодняшний день специалисты в различных отраслях науки, бизнеса, государственного управления сталкиваются с противоречием: с одной стороны, интеллектуальные возможности человека не позволяют обработать и систематизировать весь объем информации, генерируемый в соответствующей профессиональной области, а с другой — наличие недостатка качественных цифровых интерактивных систем, которые помогали бы специалисту в обработке большого количества исходных данных с целью выработки оптимального решения [7, с. 86].

В результате в практике накопилось немало примеров, когда даже крупные международные корпорации реализовывали неуспешные проекты и, как следствие, сталкивались с колоссальными финансовыми, ресурсными, репутационными потерями. В данной связи весьма актуальным представляется исследование сущности, функций и перспектив систем поддержки принятия решений в контексте деятельности проектно-ориентированных наукоемких и высокотехнологичных промышленных и технологических компаний и предприятий [5, с. 292].

Обзор темы

Прежде всего следует обратиться к существующим дефинициям понятия «система поддержки принятия решений». А.А. Стародубцев определяет его следующим образом: «компьютерная автоматизированная система, целью которой является помощь людям, принимающим решение в сложных условиях для полного и объективного анализа предметной деятельности» [8, с. 99].

По мнению автора, подобные системы стали результатом слияния управленческих систем и систем управления базами данных. Имплементация систем поддержки принятия решений была обусловлена тем, что в профессиональной практике многих специалистов появилась необходимость реализации многокритериального анализа. Многокритериальность как условие принятия профессиональных решений обозначает то, что результаты принимаемых решений оцениваются по совокупности многих разнородных показателей. Резкое повышение информационной сложности профессиональной среды в большинстве отраслей привело к необходимости обработки данных при помощи современной вычислительной техники. Стало очевидно, что принятие важных решений более нельзя осуществлять по наитию, интуитивно [8, с. 99].

А.А. Никифорова говорит о том, что системы поддержки принятия решений стали развиваться еще с 1960-х гг., но, тем не менее, острой необходимости в их внедрении управленцы не испытывали. Только по мере цифровизации общественных отношений, бизнеса и производства, сетевизации, глобализации, информатизации стали формироваться субъективные и объективные предпосылки разработки компьютерных систем поддержки принятия решений. Среди субъективных причин и предпосылок автор называет следующие: (1) чрезмерное увеличение объемов информации, на современном этапе — появление Big data; (2) развитие и удешевление компьютерных систем, обеспечение доступа к Интернету и вычислительным мощностям для массовой общественности и бизнеса любых масштабов и отраслей; (3) ускорение динамики изменений внешней среды, усиление значимости фактора времени в управлении бизнесом; (4) удорожание стоимости ошибок вследствие некорректных решений, принятых в процессе управления. В перечень субъективных факторов автор включает: (1) склонность человека к упрощению рутинных задач, сокращению трудозатрат; сложность обработки информации, отсутствие желания проводить глубокий многофакторный анализ; (2) недостаток профессионализма лиц, принимающих решения [7, с. 87].

А.М. Конончук и М.А. Белоусова определяют системы поддержки принятия решений следующим образом: автоматизированные компьютерные системы, созданные для помощи в принятии решений в сложных условиях для объективного анализа деятельности. По мнению специалистов, в некоторых сферах системы поддержки применяются особенно активно: телекоммуникации, финансовая сфера, торговля, промышленность, медицина и др. Структурно системы поддержки принятия решений состоят из хранилища данных и аналитического инструментария. Хранилище данных предоставляет единую среду хранения данных, организованных в структурах, оптимизированных для выполнения аналитических операций. Аналитические средства применяются пользователями, в т.ч. не имеющими специальных знаний в области информационных технологий за счет понятного интерфейса [4, с. 414].

А.А. Никифорова определяет системы поддержки принятия решений как интерактивные автоматизированные системы, позволяющие лицам, принимающим решения, использовать данные и модели в целях решениях неструктурированных и слабоструктурированных проблем [7, с. 88].

И.В. Балашова и Т.А. Терещенко в своей дефиниции выделяют еще одну функцию системы, помимо аналитической — прогностическую. Систему поддержки принятия решений авторы определяют как «компьютерную систему, которая с помощью сбора и анализа огромного

объема информации, может воздействовать на процесс принятия решений и прогнозировать наиболее оптимальный вариант дальнейших действий» [2, с. 4]. Задачами подобных систем, по мнению авторов, выступают: оценка альтернатив исходя из предпочтений пользователя и условий внешней среды; помощь при анализе и оценке среды, формирование целостного видения управленческой ситуации, выявление ограничений; анализ последствий принятия решения; генерация списка вероятных вариантов; и проч. [2, с. 4]. А.А. Стародубцев полагает, что все разнообразные задачи и функции, выполняемые системами, можно разделить на две группы: задачи и функции, связанные с генерацией возможных решений на основе анализа данных; задачи и функции, направленные на ранжирование возможных решений по предпочтительности [8, с. 99].

Обращаясь непосредственно к деятельности проектно-технологических компаний и решений, принимаемых их сотрудниками, следует отметить, что в данной области объем новых знаний стремительно увеличивается, в связи с чем крайне важной является задача их формализации. Кроме того, в данной области можно отчетливо заметить кадровый дефицит — нехватку специалистов (экспертов) в узкопрофильных, специализированных областях. Данное обстоятельство является еще одним аргументом в пользу автоматизации части управленческих функций.

Под проектно-технологической компанией мы будем понимать разновидность организации, основной деятельностью которой является разработка и внедрение комплексных инженерно-технических решений, охватывающих весь цикл создания объекта или системы: от стадии проектирования до технологического сопровождения эксплуатации (либо часть этого цикла).

Проектно-технологическая компания может осуществлять деятельность в следующих направлениях: (1) проектное — формирование проектной документации, архитектурно-конструкторских решений, расчетно-аналитических моделей, включая технико-экономическое обоснование; (2) технологическое — разработка, адаптация и интеграция технологических процессов, оборудования и автоматизированных производственных систем; (3) комплексное — объединение проектных и технологических компетенций.

Современные проектно-технологические компании, как правило, не ограничиваются одним из направлений: их деятельность направлена на создание целостных решений. Это обстоятельство, в свою очередь, определяет сложность и масштаб информационных потоков, циркулирующих во внутренней и внешней среде компании.

В данной связи особую значимость приобретает вопрос об алгоритмах и подходах к принятию решений.

Так, к примеру, от решений, принятых сотрудниками и руководителями проектно-технической компании, работающей в сфере строительства, зависит «судьба» многих субъектов — инвесторов, застройщиков, покупателей недвижимости, соответствующих государственных структур. Речь идет о том, что инженерные ошибки в строительной области могут приводить к тому, что возведенный многоквартирный дом сдается с неверными техническими характеристиками и впоследствии признается подлежащим сносу. Подобный результат возникает вследствие неверно принятых решений на этапе проектирования.

Проектно-технологическая компания принимает решения, охватывающие как концептуальный уровень проектирования, так и прикладной уровень внедрения технологий, причём эти решения носят комплексный, междисциплинарный характер. Данные решения можно разделить на несколько категорий: стратегические решения (выбор концепции объекта, технико-экономическое обоснование, выбор базовых технологических процессов, оборудования, стандартов и цифровых систем проектирования); инженерно-технологические решения, организационно-управленческие решения, эксплуатационные и сервисные решения. По сути, проектно-технологическая компания принимает решения, которые определяют не только как будет реализован объект, но и как он будет работать, развиваться и обслуживаться на протяжении всего жизненного цикла. Еще одной особенностью деятельности проектно-технических организаций выступает то обстоятельство, что все принимаемые решения являются взаимосвязанными. Одно взятое на себя обязательство может повлечь за собой цепочку финансово и ресурсно-обременительных мероприятий.

Экономическая эффективность проектно-ориентированных наукоемких и высокотехнологичных компаний напрямую зависит от оперативного и быстрого принятия правильных управленческих решений. Следовательно, целесообразно внедрять специальные системы поддержки принятия решений с целью сбора, оптимизации, анализа данных, выявления ошибок в настоящем и прогнозирования дальнейшего хода развития проекта [2, с. 3].

В фокусе внимания руководителей проектно-технических предприятий находится проект («ограниченное по времени целенаправленное изменение отдельной системы с изначально четко определенными целями, достижение которых определяет завершение проекта, с установленными требованиями к срокам, результатам, риску, рамкам расходования» [1, с. 32]). Это обстоятельство также определяет характер и сущность принимаемых в компании решений. Так, в частности, проект является сложной системой открытого типа, на которую

оказывают влияние факторы внутренней и внешней среды. Внутренние факторы включают в себя специфические черты среды организации, разрабатывающей и реализующей проект: сфера управления, организационная культура, регламенты, нормы, сфера сбыта, инфраструктура и др.

Среди факторов внешней среды исследователи называют экономические, социальные, политические, технологические, культурные, природные, факторы конкуренции, законотворчество и потенциальные законодательные барьеры и запреты и проч. Может показаться, что подобные факторы лишь косвенно затрагивают деятельность организации, но при более близком рассмотрении можно понять, что они все же ощутимо влияют на проект — как напрямую, так и посредством факторов ближнего окружения [1, с. 32]. Система принятия решений, помимо прочего, должна получить исторические корпоративные данные: масштаб предприятия; специфика предыдущей деятельности, количество реализованных проектов; состав и сложность задач; зрелость организации; техническое и информационное обеспечение; уровень квалификации кадров [3, с. 60].

Управление разработкой и реализацией проекта ранее понималось в качестве совокупности утвержденных алгоритмизированных действий, набора формализованных документированных процедур, детерминирующих результаты проекта. Сегодня же, в эпоху пересмотра подходов к менеджменту, внедрения методологий, процессного подхода и иных динамических управленческих парадигм, проект более нельзя считать константной категорией. Руководство должно быть постоянно изменять свои решения, менять векторы управленческого мышления.

Система поддержки принятия решений для проектно-технологической компании обязательно должна адаптироваться под конкретную сферу деятельности, поскольку отрасли различаются по: типам проектов (инфраструктурные, производственные, добывающие), нормативно-правовой базе (например, API и ASME для нефтегазовой отрасли, ГОСТ Р 21.110 для строительства, ISO 15926 для промышленной автоматизации), технологическим процессам (бурение, переработка, монтаж сложных инженерных систем и т. д.).

Система поддержки принятия решений не является универсальным калькулятором, а представляет собой комплексную интеллектуальную среду. Если её не адаптировать под отраслевую специфику, алгоритмы оптимизации будут учитывать нерелевантные параметры и принятие решений будет осложнено. К примеру, в системе поддержки принятия решений для нефтедобычи добавляются специализированные модули: модели геолого-технических, сценарный анализ бурения, оценка

рисков выбросов и аварий, экологический мониторинг на основе данных со станций наблюдения и спутниковых снимков. В ходе бурения на нефтегазовых установках можно столкнуться с рядом технических проблем, которые не имеют аналогов в иных отраслях: разрушение ствола, ошибки при работе установок управления буровыми насосами, прихваты и др. [9, с. 148]. Следует отметить, что существенным ограничением для использования отраслевых систем поддержки принятия решений, основанных на технологиях машинного обучения, является отсутствие репрезентативной обучающей выборки [6, с. 358]. В контексте проектно-технологических компаний данная проблема усугубляется высокой спецификой производственных процессов, уникальностью реализуемых проектов и ограниченным объёмом исторических данных, соответствующих требуемым условиям эксплуатации. В результате формирование адекватных алгоритмов анализа и прогнозирования требует применения методов расширения данных, синтетического моделирования или интеграции межотраслевых информационных ресурсов, что, в свою очередь, увеличивает сложность и стоимость разработки таких систем. Тем не менее, их внедрение представляется приоритетной необходимостью для сохранения конкурентоспособности проектно-технических компаний.

Заключение

Таким образом, проведенное исследование позволяет прийти к следующим выводам:

Система поддержки принятия решений — интерактивный информационно-аналитический программно-аппаратный комплекс, предназначенный для содействия лицам, принимающим решения, в процессе выбора оптимальных альтернатив путём сбора, хранения, обработки и анализа разнородных данных, моделирования сценариев и представления результатов в форме, удобной для интерпретации.

Системы позволяют координировать проектные, технологические и эксплуатационные аспекты деятельности, сокращать сроки разработки и согласования документации, минимизировать производственные и финансовые риски, а также обеспечивать соответствие нормативно-техническим требованиям. При этом эффективность таких систем напрямую зависит от полноты и качества исходных данных, степени их отраслевой адаптации и интеграции с другими информационными платформами предприятия, что обуславливает необходимость разработки специализированных модулей и алгоритмов, ориентированных на специфику конкретной отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асташова, У.В. Проект и управление проектом: российская специфика / У.В. Асташова // The Newman in Foreign policy. — 2022. — № 69 (113). — С. 31–33.
2. Балашова, И.В. Системы поддержки принятия решений / И.В. Балашова, Т.А. Терещенко // The Scientific Heritage. — 2021. — № 79-4. — С. 3–7.
3. Катунина, И.В. Конфигурирование офиса управления проектами: опыт инновационной промышленной компании / И.В. Катунина // CPPM. — 2018. — № 1 (106). — С. 58–63.
4. Конончук, А.М. Системы поддержки принятия решений / А.М. Конончук, М.А. Белоусова // Экономика и социум. — 2013. — № 4-3 (9). — С. 414–415.
5. Матюшок, В.М. Факторы экономической эффективности проектно-ориентированных наукоёмких и высокотехнологичных компаний и предприятий / В.М. Матюшок, Е.Ю. Хрусталёв // Научный журнал КубГАУ. — 2020. — № 158. — С. 289–307.
6. Меркулов, А.А. Экспертная система поддержки принятия решений в области строительства / А.А. Меркулов // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. — 2024. — № 4. — С. 357–367.
7. Никифорова, А.А. Перспективы развития систем поддержки принятия решений / А.А. Никифорова // E-Scio. — 2022. — № 12 (75). — С. 85–92.
8. Стародубцев, А.А. Система поддержки принятия решений / А.А. Стародубцев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2016. — № 12. — С. 99–101.
9. Хомяк, А.В. Построение системы поддержки принятия решений в нефтегазовой промышленности / А.В. Хомяк, М.А. Сурушкин // Евразийская интеграция: современные тренды и перспективные направления. — 2023. — С. 114–120.

© Зиновьев Андрей Николаевич (ziandrew96@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ И РАЗРАБОТКОЙ ПО

INTEGRATION OF PROJECT MANAGEMENT AND SOFTWARE DEVELOPMENT SYSTEMS

**R. Ilyin
S. Nikishov**

Summary. The paper examines approaches and solutions for integrating project management systems with software development tools. The increasingly important role of integrated platforms (Application Lifecycle Management, DevOps) for unifying planning and development processes is noted. Examples of modern tools and methods for synchronizing data between project management and development environments are provided. The advantages of such integration — improved collaboration, increased process visibility, and automated task tracking — are analyzed, as well as the challenges associated with implementing integrated solutions. It is concluded that integrating management and development systems can significantly increase the efficiency of IT project execution, while simultaneously requiring consideration of organizational changes.

Keywords: project management, software development, integration, Application Lifecycle Management, DevOps, collaboration, task tracking, information systems.

Ильин Руслан Дмитриевич

Аспирант, Российская академия народного хозяйства
и государственной службы
при Президенте Российской Федерации
mildgravity0@yandex.ru

Никишов Сергей Иванович

д.э.н., доцент, Российская академия
народного хозяйства и государственной службы
при Президенте Российской Федерации
nikishov-si@ranepa.ru

Аннотация. Рассматриваются подходы и решения для интеграции систем управления проектами с инструментами разработки программного обеспечения. Отмечается возросшая роль интегрированных платформ (Application Lifecycle Management, DevOps) для объединения процессов планирования и разработки. Приведены примеры современных инструментов и способов синхронизации данных между средствами управления проектами и средствами разработки. Проанализированы преимущества такой интеграции — улучшение сотрудничества, повышение прозрачности хода работ, автоматизация отслеживания задач — а также сложности, связанные с внедрением интегрированных решений. Сделаны выводы о том, что интеграция управленческих и систем управления разработкой позволяет существенно повысить эффективность реализации ИТ-проектов, одновременно требуя учета организационных изменений.

Ключевые слова: управление проектами, разработка программного обеспечения, интеграция, Application Lifecycle Management, DevOps, сотрудничество, отслеживание задач, информационные системы.

Введение

В современных организациях часто используется множество разрозненных инструментов: одни для управления проектами, другие — для непосредственной разработки программного обеспечения. Традиционно процессы менеджмента проектов и процессы разработки нередко выполнялись обособленно, что приводило к недостаткам в согласованности и эффективности [1][2]. Отсутствие единого информационного пространства может вызывать дублирование ввода данных, ошибки и задержки передачи информации между менеджерами и разработчиками [2]. Согласно опросам, коммуникационные разрывы являются одним из главных препятствий успешной реализации проектов — 59 % специалистов отмечают проблемы во внутреннем взаимодействии как серьезный барьер [20]. Эти факты подчёркивают необходимость более тесной интеграции между системами управления проектами и средствами разработки ПО.

Понятие интеграции в управлении проектами отражено и в стандартах. Например, PMI определяет управление интеграцией проекта как координацию всех элементов проекта в единое целое [11]. В области разработки ПО концепция сквозного управления жизненным циклом приложений (Application Lifecycle Management, ALM) прямо направлена на объединение процессов управления, разработки и эксплуатации. Инструменты ALM обеспечивают единую стандартизированную систему для взаимодействия команд разработки ПО и связанных отделов, автоматизируя процессы сборки и доставки и повышая эффективность за счёт согласованности действий [4][5]. Таким образом, интеграция методов и систем управления проектами с инструментами разработки становится важнейшим условием успешного выполнения сложных проектов. Исследования показывают, что разрозненное выполнение управленческих и инженерных задач приводит к неэффективности и задержкам, тогда как интегрированный подход решает эти проблемы, объединяя команды, методологии и инстру-

менты в единое целое [7][8]. Интеграция усилий менеджеров проектов и разработчиков способствует сотрудничеству и снижает фрагментированность процессов [8].

Активное развитие гибких методологий и DevOps-культуры также стимулирует сближение управленческих и технических практик. Так, еще Бозм и Тёрнер отмечали необходимость баланса между строгим управлением и гибкой разработкой, предлагая комбинировать дисциплину планирования с адаптивностью agile-подходов [19][16]. В последние годы на рынке появились комплексные решения, позволяющие «под одной крышей» вести и планирование проекта, и разработку кода, и тестирование. Многие компании переходят от разрозненных инструментов (электронные таблицы, отдельные таск-трекеры) к интегрированным системам управления проектами — по мере цифровизации такие системы становятся фундаментом управления компанией [15][12]. Ниже рассмотрены существующие подходы к интеграции систем управления проектами и разработки ПО, их преимущества и проблемы внедрения.

Инструменты и подходы к интеграции

Интегрированные платформы (ALM-системы). Один из подходов — использовать единое программное решение, охватывающее весь цикл от планирования проекта до релиза продукта. Примерами являются корпоративные платформы управления жизненным циклом приложений. Например, Microsoft Azure DevOps (ранее Team Foundation Server) объединяет средства планирования проектов, систему контроля версий, инструмент отслеживания задач и багов, а также конвейер CI/CD. Такая платформа архивирует все артефакты разработки в центральном репозитории и обеспечивает совместную работу всех внутренних и внешних участников проекта [9][14]. Благодаря этому в Azure DevOps проектные менеджеры и разработчики работают в единой среде: ведутся единые беклоги задач, связываются изменения кода с задачами, автоматически отслеживаются сборки и развертывания. Интеграция управления проектом и разработки в TFS/Azure DevOps дает клиентам и стейкхолдерам лучшую прозрачность хода разработки, поощряя непрерывное взаимодействие заказчиков с командой разработчиков [14].

Другой пример — платформа Atlassian. Этот вендор предлагает связанный набор инструментов: Jira для управления задачами и дефектами, Confluence для документирования требований и знаний, Bitbucket (или теперь облачный Github интеграции) для управления репозиториями кода, Bamboo для сборки, а также коммуникационный модуль (ранее HipChat) [13]. В совокупности эти инструменты поддерживают как Agile-подход (спринты, бэклоги), так и классическое управление, позволяя командам вести весь цикл разработки. Jira связы-

вает изменения кода с задачами, предоставляя менеджерам проекта возможности мониторинга разработки прямо в задачах. Такой комплекс хорошо подходит для организаций, практикующих непрерывную интеграцию и DevOps; у Atlassian реализована глубокая интеграция с Git-репозиториями [13]. Как отмечено в обзоре, решения Atlassian покрывают основные потребности управления и разработки в стартапах и средних компаниях, позволяя вести требования, код и коммуникации на единой платформе [13].

Схожей интегрированной средой является GitLab, которая изначально создавалась как платформа «все в одном» для DevOps. GitLab сочетает систему управления исходным кодом (Git-репозиторий), трекер задач и багов, встроенную систему код-ревью, CI/CD конвейеры и даже средства мониторинга deployments. Благодаря этому многие команды используют GitLab не только как инструмент разработчиков, но и для управления проектными задачами. Интеграция задач и кода в GitLab позволяет менеджерам проектов отслеживать выполнение работ в реальном времени: например, видеть статус задач, прогресс пайплайнов сборки и тестирования, историю слияния веток и т. д. Инструменты вроде GitLab фактически стирают границу между «управлять проектом» и «разрабатывать проект» — все участники работают в одном пространстве. Отдельные исследования отмечают интерес использовать среду GitLab именно в задачах управления проектами, чтобы решить практические проблемы классического PM — улучшить контроль сроков, качество и коммуникацию [1][18]. Интегрируя управление проектом внутрь платформы разработки, такие системы позволяют руководителям проектов оперативно получать техническую информацию (статусы сборок, результаты проверок кода и пр.), а разработчикам — лучше понимать управленческий контекст проекта.

Интеграция посредством API и плагинов. Другой подход — связать между собой уже используемые отдельные системы управления проектами и разработки при помощи интеграционных модулей. Большинство современных корпоративных инструментов имеют открытые API или готовые коннекторы. Например, связка Jira и систем контроля версий: Jira Software содержит панель разработки (Development Panel), которая при интеграции с репозиториями отображает связанные с задачей ветки, коммиты, pull request'ы, сборки и развертывания [13]. Достаточно указать ключ задачи в сообщении коммита — и Jira автоматически привяжет этот коммит к задаче, отобразит его в интерфейсе задачи, а workflow-триггеры могут даже перевести задачу в статус «In Progress» при первом коммите [13]. Таким образом, подключив Jira к системам разработки (Bitbucket, GitHub, Bamboo и др.), команда получает сквозную прослеживаемость: менеджеры видят технический про-

гресс по каждой задаче (на каком этапе код, прошел ли сборку, деплой и т. д.), а разработчики экономят время на двойном вводе информации [16].

Аналогично, интеграция Asana с GitLab позволяет синхронизировать задачи и инциденты между этими системами. Asana выступает как удобный инструмент планирования и отслеживания задач, а GitLab — как среда разработки. При интеграции статусы задач из цикла разработки (issues, merge-requests в GitLab) автоматически отражаются в Asana, обеспечивая всем участникам единое видение прогресса [2]. Менеджеры могут в Asana в реальном времени видеть, какой код написан и когда, какие проблемы закрыты, а разработчики — получать задачи из Asana в своей привычной среде разработки [2]. По сути, достигается двухсторонняя связь отделов: через интеграцию Asana + GitLab команда налаживает оперативное общение между «бизнесом» и «разработкой», исключая задержки из-за информационных разрывов [2]. Как отмечает DevOps-экспертиза, такая синхронизация уменьшает коммуникационные разрывы и повышает эффективность проектов [2].

Таблица 1 ниже обобщает некоторые распространенные варианты интегрированных решений и связей инструментов.

Таблица 1.

Распространенные варианты интегрированных решений и связей инструментов

Подход / Система	Характеристика интеграции
Azure DevOps (TFS)	Единая платформа ALM: задачи, репозиторий кода, сборки и деплой в одном месте [14]. Повышает прозрачность для всех участников проекта.
Atlassian (Jira+Confluence+Bitbucket)	Связанный набор инструментов: задачи связаны с требованиями и кодом, есть интеграция с Git, поддержка Agile и DevOps-практик [13].
GitLab	Полностью интегрированная DevOps-платформа: от планирования задач до CI/CD. Менеджмент проекта встроен в среду разработки (сквозное отслеживание pipeline).
Asana + GitLab	Интеграция через API: задачи Asana синхронизируются со статусами задач GitLab [2], обеспечивая единое информационное пространство.

Преимущества интеграции систем управления проектами и разработки

Интеграция инструментов управления проектами со средствами разработки дает ощутимые выигрыши, от-

мечаемые как практиками, так и исследователями. Ниже перечислены ключевые преимущества такого подхода.

- Когда управленческие и инженерные данные объединены, все участники имеют единое представление о ходе проекта [12]. Менеджер проекта в любой момент видит, какой прогресс достигнут разработчиками по каждой задаче, вплоть до конкретных коммитов и сборок [13][13]. Разработчики же понимают приоритеты и статус проекта в целом, а не только свою узкую задачу. Улучшенная видимость действий команды — один из важных эффектов интеграции Jira и GitLab, отмечаемых практиками [1].
- Интегрированная среда выступает общим коммуникационным пространством для менеджеров и разработчиков. Пропадают барьеры между «управленцами» и «технарями»: они работают с одной системой и видят обновления друг друга практически мгновенно [2]. Это ведет к более эффективному сотрудничеству команды [18].
- Интеграция позволяет автоматизировать ряд рутинных операций и тем самым упростить workflow разработки и управления. Например, больше не нужно вручную дублировать информацию — статусы и данные синхронизируются автоматически между инструментами [2]. Объединенная среда дает упрощенный рабочий процесс: меньше переключений между приложениями, единый поток задач [3]. Примеры — авто-триггеры Jira, переводящие задачи при событиях в репозитории [13]; или автоматическое логирование затраченного времени из Git-репозитория в систему учёта времени проекта [12]. Совместное использование инструментов ведёт к экономии времени и ресурсов, что в итоге означает снижение затрат проекта [16].
- При интегрированных системах значительно улучшается трассируемость (traceability) — возможность проследить связь между требованиями, задачами, исходным кодом, тестами и результатами [3][17]. Контроль версий и задач в связке позволяет точно знать состав сборок; проще проводить код-ревью, не выходя из контекста задачи, а также выявлять риски для выпуска заранее [13].
- Когда информация о ходе разработки мгновенно доступна менеджерам, они могут быстрее принимать решения и корректировать планы проекта [12]. Интеграция упрощает реакцию на изменения, синхронизируя бизнес-цели и техническую реализацию [12][20].

Приведенные преимущества подтверждаются практическими кейсами. Так, интеграция Jira и GitLab в одной из команд привела к улучшению совместной работы между менеджерами и разработчиками, повышению

прозрачности задач и автоматизации отслеживания проблем [18]. В другой ситуации внедрение комплексной системы управления проектами на предприятии позволило руководству постоянно быть в курсе статуса каждой задачи и ускорить запуск новых проектов [15][12]. Организации, внедрившие проактивные методы управления и современные инструменты, теряют в среднем в 28 раз меньше средств на неудачные инициативы [20].

Проблемы и ограничения интеграции

- Переход к интегрированной системе требует изменений в процессах и культуре; сопротивление изменениям может стать барьером [7]. Сложность настройки интеграции часто требует участия системных аналитиков и администраторов.
- Классические PM-подходы и Agile различаются по циклам и метрикам; требуется согласование представлений [11]. Не всегда удаётся обеспечить полную двухстороннюю синхронизацию из-за различий моделей данных и ограничений API.
- Интегрированные платформы требуют инвестиций (лицензии/подписки, инфраструктура, обучение); важно оценивать окупаемость.
- Необходима программа обучения и постоянная поддержка (DevOps/администраторы); обновления сервисов могут нарушать интеграцию.
- Тотальная прозрачность может провоцировать микроменеджмент и перегрузку данными; важно настраивать уровень отчётности.

Ключевые трудности интеграции — прежде всего организационные. Без адаптации процессов, обучения и управленческой поддержки интеграция может не дать эффекта. Опыт показывает, что формальное внедрение без изменения методик приводит к дублированию информации и игнорированию системы пользователями [6]. Рекомендуется планировать интеграцию как проект организационных изменений с пилотами и поэтапным внедрением.

Перспективы применения и направления дальнейших исследований

Рассмотренные в статье подходы к интеграции систем управления проектами и разработки ПО задают основу для последующих исследований. В дальнейшем

целесообразно разработать критерии выбора уровня интеграции (UI, обмен данными, API или событийное взаимодействие) в зависимости от зрелости организации и особенностей проектов. Перспективным направлением является создание универсальной модели интеграционного слоя, которая могла бы применяться в различных системах, а также разработка методов сквозной прослеживаемости задач от требований до релиза и алгоритмов автоматического выявления разрывов.

На практике рекомендуется начинать с пилотных решений — связки трекера задач и репозитория кода (например, Asana↔GitLab или Jira↔Git) с минимально необходимой автоматизацией статусов и проверок в CI/CD. Важно закрепить единый словарь артефактов (задача, эпик, релиз) и набор метрик (lead time, частота релизов, полнота связей задача↔коммит↔сборка), которые можно отслеживать в общей панели мониторинга. Такой подход позволит оценить эффекты интеграции в сопоставлении с управленческими практиками и обеспечить воспроизводимость экспериментов.

Для подтверждения результатов требуется экспериментальная проверка на реальных проектах: измерение изменений во времени выполнения задач, частоте релизов, числе дефектов и соблюдении сроков. Ожидается, что результаты таких исследований помогут обосновать новые методы и алгоритмы интеграции, включая модель выбора уровня интеграции, архитектуру интеграционного слоя и методику увязки показателей DevOps с показателями управления проектами.

Заключение

Интеграция систем управления проектами с инструментами разработки программного обеспечения становится все более насущной потребностью. Она повышает прозрачность и управляемость, улучшает взаимодействие команды и снижает ошибки за счёт автоматизации [5]. Внедрение требует учёта организационных аспектов и выбора инструментов под масштаб предприятия. Правильно реализованная интеграция повышает гибкость управления и снижает риски провалов и перерасхода бюджета [20]. Концепции DevOps и BizDevOps расширяют интеграцию на весь жизненный цикл, и этот тренд будет усиливаться.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вакорин М.П., Симонов В.И., Данилов С.В. Оценка возможности использования среды разработки программного обеспечения GitLab в задачах управления проектами // Молодой ученый. — 2023. — № 11 (458). — С. 5–8.
2. DevOps Tec. [Asana + GitLab] Synchronized Integration of Project Management and Software Development // DevOps Tec Blog. — 2024. — July 18. — URL: <https://www.devops.com.my/post/asana-gitlab-integration-malaysia> (дата обращения: 10.09.2025).
3. Bokone A. How to integrate IT task management tools with version control systems? (FAQ) // Assembla Blog. — 2024. — Oct 27. — URL: <https://get.assembla.com/blog/5-it-task-management-faqs> (дата обращения: 12.09.2025).

4. Amazon Web Services. Что такое управление жизненным циклом приложений (ALM)? — URL: <https://aws.amazon.com/ru/what-is/application-lifecycle-management/> (дата обращения: 05.09.2025).
5. Microsoft. Обзор управления жизненным циклом приложений с Microsoft Power Platform — Microsoft Learn. — 12.02.2025. — URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/power-platform/alm/overview-alm> (дата обращения: 05.09.2025).
6. Тулембаев А.Н., Адилова А.М., Серикбекулы А. Интеграция системы управления проектами на предприятии оборонно-промышленного комплекса Республики Казахстан // Экономика, предпринимательство и право. — 2020. — Т. 10, № 7. — С. 2029–2044.
7. Шаманин А.Ю., Трибелев А.А. Как интеграция проектного управления и системной инженерии улучшает результаты проектов // Труды XIV Всеросс. совещания по проблемам управления (ВСПУ-2024), Москва, 17–20 июня 2024 г. — М.: ИПУ РАН, 2024. — С. 1–5.
8. Мошаров А. Наводим порядок в управлении разработкой с помощью Gitlab и Jira // Хабр (блог компании «Северсталь»). — 2022. — 9 ноября. — URL: <https://habr.com/ru/companies/severstal/articles/698236/> (дата обращения: 08.09.2025).
9. Add-On Development. Method & Resources — Team Foundation Server allows integration of project management and development activities... — Company Website. — 2019. — URL: <https://aod.vn/method-resources.html> (дата обращения: 07.09.2025).
10. Интеграция управления программой и системной инженерии / под ред. Э. С. Ребентиша; пер. с англ. В. К. Батоврина и др. — М.: ДМК Пресс, 2020. — 584 с.
11. Project Management Institute. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide). — 6th ed. — Newtown Square, PA: PMI, 2017. — 592 p.
12. Teamhub. Project Management Tool Integration: Streamlining Your Workflow // Teamhub Blog. — 2024. — Jan 25. — URL: <https://teamhub.com/blog/project-management-tool-integration-streamlining-your-workflow/> (дата обращения: 10.09.2025).
13. Atlassian. Integrating with development tools — Jira Service Management Cloud Documentation. — 2021 (посл. обновл. 17 нояб. 2021). — URL: <https://confluence.atlassian.com/servicedeskcloud/integrating-with-development-tools-1097175801.html> (дата обращения: 08.09.2025).
14. Шантунова Ю. Top 7 Application Lifecycle Management (ALM) Tools // SaM Solutions Blog. — 2025. — Aug 11. — URL: <https://sam-solutions.com/blog/top-7-application-lifecycle-management-alm-tools/> (дата обращения: 06.09.2025).
15. Топ-10 лучших систем управления проектами в 2025 году // Блог Kickidler. — 2025. — 12 января. — URL: <https://www.kickidler.com/ru/info/top-10-luchshikh-sistem-upravleniya-proyektami> (дата обращения: 05.09.2025).
16. Cprime. What Is Jira Integration? (Blog) — Cprime.com, [б.р.]. — URL: <https://www.cprime.com/resources/blog/what-is-jira-integration/> (дата обращения: 08.09.2025).
17. Visure Solutions. Интеграция ALM и PLM: примеры, варианты использования — 2023. — URL: <https://visuresolutions.com/ru/гид-по-милостыне/интеграция-alm-и-plm/> (дата обращения: 10.09.2025).
18. Ružić J., Jovkić M. The Impact Of Software Tool Integration On Digital Project Management // Proc. 29th Int. Congress on Project Management (Belgrade, 2025). — 2025. — P. 45–52.
19. Boehm B., Turner R. Balancing Agility and Discipline: A Guide for the Perplexed. — Addison-Wesley, 2003. — 266 p.
20. Wimi Staff. 52 statistics on project management that you absolutely need to know // Wimi Blog. — 2022. — March 14. — URL: <https://www.wimi-teamwork.com/blog/52-statistics-on-project-management-that-you-absolutely-need-to-know/> (дата обращения 10.09.2025).

© Ильин Руслан Дмитриевич (mildgravity0@yandex.ru); Никишов Сергей Иванович (nikishov-si@ranepa.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОЦЕНКА ВОСТРЕБОВАННОСТИ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ НА РЫНКЕ ТРУДА В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ МОБИЛЬНОСТИ

ASSESSMENT OF THE DEMAND FOR SPECIALTIES IN THE LABOR MARKET IN CONDITIONS OF VARIABLE PROFESSIONAL MOBILITY

V. Karavaev
A. Tarasyev

Summary. In the context of dynamic changes in the labor market caused by technological innovations, demographic shifts and globalization, professional mobility is becoming a key factor in the adaptation of workers. Traditional methods of assessment the demand for professions are imperfect and do not take into account the dynamic transitions of workers between specialties. This article examines professional mobility as the ability and willingness of employees to transition between professions and various sectors of the economy. The analysis of scientific literature allowed us to compile an overview of existing methods for determining the relevance of professions. A methodology is proposed for assessing the demand for specialties, taking into account variable professional mobility, based on a dynamic equation of changes in the number of specialists by industry and region. The use of probabilistic models of the transition between specialties and wage accounting makes it possible to more accurately predict the employment structure. The development of effective methods and tools in the field of assessing the demand for specialties helps to increase the adaptability of the vocational education system and meet the needs of employers in qualified personnel. Professional mobility significantly changes the demand for specialties in the labor market. The proposed methodology allows us to take into account both the current demand for specialties and the dynamics of transitions between them.

Keywords: labor market, professional mobility, demand for specialties, dynamic modeling, employment forecasting.

Караваяев Всеволод Сергеевич

Аспирант, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.
v.s.karavaev@urfu.ru

Тарасьев Александр Александрович

кандидат экономических наук, доцент,
старший научный сотрудник
Научно-исследовательской лаборатории по проблемам
университетского развития, ФГАОУ ВО «Уральский
федеральный университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина» г. Екатеринбург
a.a.tarasyev@urfu.ru

Аннотация. В условиях динамичных изменений на рынке труда, обусловленных технологическими инновациями, демографическими сдвигами и глобализацией, профессиональная мобильность становится ключевым фактором адаптации работников. Традиционные методы оценки востребованности профессий несовершенны и не учитывают динамические переходы работников между специальностями. В данной статье рассматривается профессиональная мобильность как способность и готовность работников к переходу между специальностями и различными секторами экономики. Проведенный анализ научной литературы позволил составить обзор существующих методик к определению востребованности профессий. Предлагается методика оценки востребованности специальностей с учетом переменной профессиональной мобильности, основанная на динамическом уравнении изменения численности специалистов по отраслям и регионам. Использование вероятностных моделей перехода между специальностями и учета заработных плат позволяет более точно прогнозировать структуру занятости. Разработка эффективных методик и инструментов в области оценки востребованности специальностей способствует повышению адаптивности системы профессионального образования и удовлетворению потребностей работодателей в квалифицированных кадрах. Профессиональная мобильность представляет собой важный фактор, который существенно меняет востребованность специальностей на рынке труда. Предложенная методология позволяет учитывать как текущий спрос на специальности, так и динамику переходов между ними.

Ключевые слова: рынок труда, профессиональная мобильность, востребованность специальностей, динамическое моделирование, прогнозирование занятости.

В условиях динамично меняющегося рынка труда и растущей профессиональной мобильности оценка востребованности специальностей приобретает особую значимость. Современный рынок труда характеризуется высокой степенью неопределенности, быстрыми изменениями спроса на специалистов различных профилей. Рынок труда подвержен значительным изменениям, связанным с технологическим прогрессом, демографическими сдвигами и изменениями в структуре экономики [1]. Профессиональная мобильность работников играет ключевую роль в структуре экономики. Традиционные методы оценки востребованности профессий часто основаны на статических данных и не учитывают динамические переходы работников между специальностями [2].

Профессиональная мобильность, определяемая как способность и готовность работников переходить между специальностями и секторами экономики, играет важную роль в адаптации рынка труда к новым условиям [3], существенно влияет на изменение потребности в определенных квалификациях и профессиях. Профессиональная мобильность включает в себя как вертикальные перемещения (повышение по карьерной лестнице), так и горизонтальные (смена профессии или сферы деятельности). При этом профессиональная мобильность позволяет работникам быстрее адаптироваться к меняющимся требованиям рынка, осваивая новые компетенции и переходя в смежные или совершенно новые области деятельности. Научные исследования в настоящее время проявляют значительный интерес к профессиональной мобильности как процессу, протекающему в обществе, определяют его в качестве фактора успешности личности в современном обществе [4].

Однако высокая профессиональная мобильность сопряжена с определенными рисками. Например, частая смена профессий или отраслей может привести к отсутствию глубоких знаний в конкретной сфере, что снижает конкурентоспособность работника. Кроме того, недостаточная профессиональная ориентация и несоответствие между полученным образованием и реальными потребностями рынка труда могут привести к профессиональной несостоятельности [5]. Вышеупомянутые обстоятельства требуют разработки новых методов оценки востребованности специальностей, которые могли бы учитывать ряд факторов: переменность профессиональных предпочтений, развитие новых отраслей и изменение технологий.

Глобализация способствует увеличению конкуренции на рынке труда и расширяет возможности для профессиональной мобильности. Это приводит к тому, что работники могут выбирать между различными предложениями из разных стран, что, в свою очередь, влияет на спрос на определенные специальности. Современ-

ный российский рынок труда характеризуется острой нехваткой квалифицированных кадров при рекордно низкой безработице. По данным Росстата, в IV квартале 2024 года доля безработных составила всего 2,3 % от трудоспособного населения [6]. Ситуация усугубляется демографическим старением и технологическими сдвигами: кадровый «голод» испытывают сразу несколько отраслей, причем формирование спроса на специальности всё в большей степени определяется экономическими и технологическими факторами, а также мобильностью трудовых ресурсов.

Исследования рынка труда традиционно опираются на две ключевые теории:

1. Теория человеческого капитала утверждает, что инвестиции в образование и навыки повышают мобильность и конкурентоспособность работников [7]. Согласно этой концепции, индивиды, вкладывающие средства в свое образование и профессиональное развитие, увеличивают свою производительность и, как следствие, свои потенциальные доходы. Это стимулирует их к поиску более выгодных предложений на рынке труда и к смене рабочих мест или профессий. Эмпирические исследования подтверждают, что более образованные молодые специалисты чаще меняют рабочие места, а умеренная мобильность (1–2 перемещения за четыре года) положительно сказывается на их будущих доходах. Однако чрезмерная мобильность (более трех перемещений) не оказывает значимого влияния на заработки, что указывает на наличие оптимального уровня мобильности, при котором инвестиции в человеческий капитал приносят наибольшую отдачу. Это означает, что высокий уровень человеческого капитала, полученный через образование и развитие навыков, снижает транзакционные издержки, связанные со сменой работы, и увеличивает адаптивность, тем самым способствуя профессиональной мобильности.
2. Теория сегментированного рынка труда объясняет существование барьеров для перехода между различными сегментами рынка [8]. Эти барьеры могут быть институциональными (например, лицензирование профессий), дискриминационными (по полу, возрасту, этнической принадлежности) или связанными со специфическими требованиями к навыкам, которые трудно приобрести без специализированного обучения. Несмотря на свою фундаментальность, эти теории требуют расширения для адекватного отражения динамики современного рынка труда, особенно в России, где наблюдаются быстрые изменения и межпрофессиональные переходы, которые не всегда объясняются только рациональным поведением или жесткими барьерами.

Современные работы показывают, что автоматизация и цифровизация ведут к ускорению профессиональной мобильности [9]. В то же время исследования подчеркивают, что мобильность зависит от уровня образования и навыков работников [10].

Анализ рынка труда

В условиях почти полной занятости российские работодатели сталкиваются с дефицитом кадров. На фоне ежегодного роста числа вакансий предложение квалифицированных специалистов не успевает формироваться. На обобщённом уровне можно выделить основные факторы, влияющие на профессиональную мобильность:

- Экономические: темпы экономического роста, региональные различия в заработках, уровень безработицы. Исторически низкая безработица вынуждает предприятия повышать зарплаты и расширять обучение, чтобы привлечь работников.
- Технологические: внедрение цифровых технологий и автоматизация порождают новые профессии (AI, робототехника и пр.), а также требуют переподготовки специалистов старых специальностей. В IT-секторе быстрый рост смежных навыков (Data science, DevOps, кибербезопасность) меняет структуру спроса.
- Демографические и социальные: уменьшение молодёжи на рынке труда и увеличение доли пожилых возрастов снижают «внутреннюю мобильность» — при дефиците рабочих мест в одних регионах и излишке в других миграция не компенсирует разрыв спроса и предложения.
- Образовательные: выпускники вузов и колледжей влияют на насыщение некоторых профессий (IT, финансы), а дефицит педагогов и медиков (в том числе, сельских) объясняется недостаточным притоком молодых кадров и низкими зарплатами.
- Государственные: политика профориентации, система переквалификации и стимулирование «открытого рынка труда» влияют на готовность специалистов менять отрасль.

Традиционно в России наблюдалась устойчивая дисбалансировка спроса и предложения в зависимости от отрасли. В отрасли образования и науки (педагоги, преподаватели, учителя) ситуация остаётся напряжённой: по данным Минпросвещения, на начало 2024/2025 учебного года было вакантно 18,3 тыс. педагогических ставок (из них ≈30 % — в сельской местности), при общем дефиците учителей около 1,75 %. В обрабатывающей промышленности, транспорте и строительстве Rosstat констатирует нехватку свыше 9–10 % рабочих и квалифицированных специалистов.

На рис. 1 приведены макропоказатели рынка труда (уровень безработицы) и динамика вакансий за послед-

ние годы (по данным Росстата и опросов работодателей). Снижение безработицы с 3,7 % в конце 2022 г. до 3,2 % в мае 2023 г. и до 2,5 % в среднем за 2024 г. показывает всё более жёсткий характер рынка труда.

Таблица 1.

Показатели уровня безработицы
согласно данным Росстат

Год	Уровень безработицы, % Росстат
2022 (декабрь)	3,7 (минимум)
2023 (май)	3,2 (минимум)
2024 (сред.)	2,5 (среднегодовой)

Обзор существующих методик

Существуют различные подходы к определению востребованных профессий. Волошина и соавторы предложили методологию, основанную на онлайн-опросах организаций, направленных на выявление востребованных профессий рабочих и должностей служащих по отдельным категориям работников [11]. Данный подход учитывает отраслевую и региональную специфику, а также особенности различных групп работников, таких как иностранные работники, внутренние трудовые мигранты, несовершеннолетние и другие.

Для оценки востребованности специальностей используются различные методы, включая анализ вакансий, прогнозирование спроса на основе экономических моделей и опросы работодателей. Одним из наиболее эффективных подходов является анализ больших данных (Big Data), который позволяет выявить тренды и предсказать изменения в структуре занятости [12]. Например, исследования, проведенные McKinsey Global Institute, показывают, что к 2030 году до 375 миллионов работников worldwide могут потребовать смены профессии из-за автоматизации и цифровизации [13].

Забелина и коллеги исследовали трансформацию востребованности навыков и профессий в условиях цифровизации российской экономики. В научном труде подчеркивается необходимость учета влияния цифровизации на изменение спроса на определенные навыки и профессии, что является важным фактором при разработке методик оценки востребованности специальностей [14].

Рощин С.Ю. и Слесарева А.А. проанализировали детерминанты мобильности молодых работников и ее влияние на будущие заработные платы. Исследование показало, что более образованные молодые специалисты чаще меняют рабочие места, а умеренная мобильность (1–2 перемещения за четыре года) положительно сказывается на их будущих доходах. Однако чрезмерная мобильность (более трех перемещений) не оказывает значимого влияния на заработки [15].

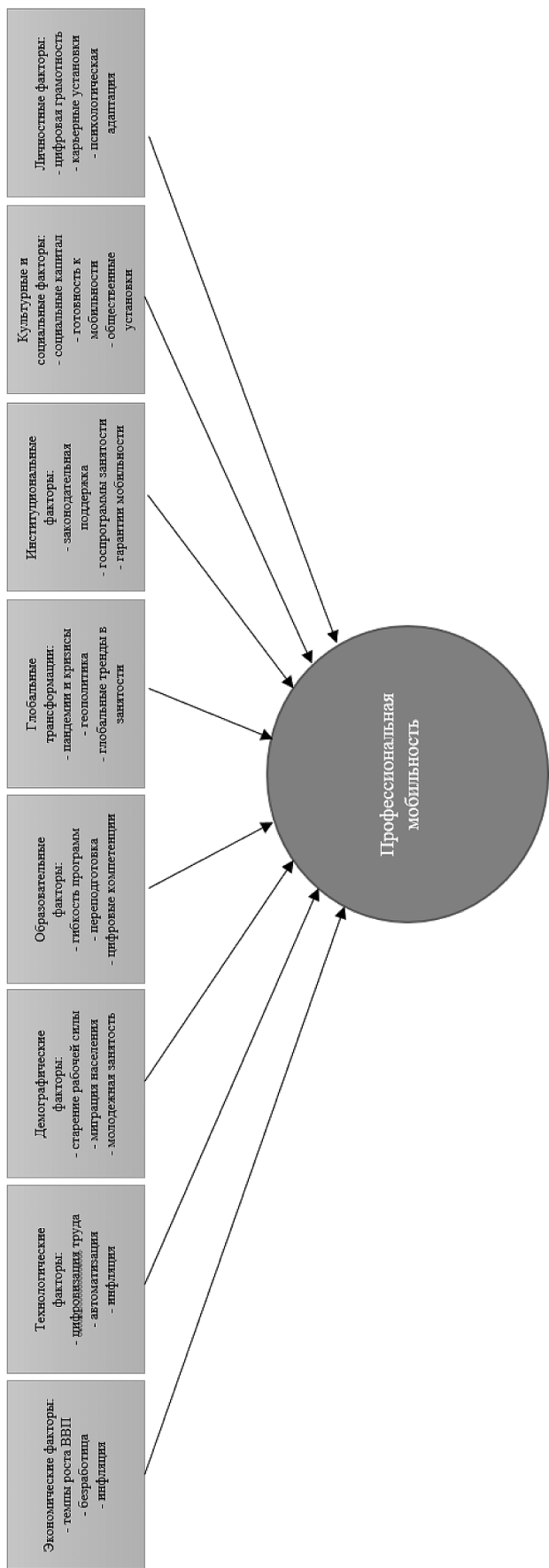


Рис. 1. Факторы профессиональной мобильности

Составлено автором.

В данной статье представлена методика, позволяющая оценивать востребованность специальностей в условиях изменяющейся профессиональной мобильности на основе динамических моделей.

Основные параметры модели

Для оценки востребованности специальностей вводятся следующие параметры:

$x_{sj}(t)$ — количество специалистов по специальности s в регионе j в момент времени t ;

M_s — потенциальная емкость рынка труда по специальности s (максимально возможное число специалистов, необходимых для экономики);

$w_s(t)$ — уровень заработной платы или привлекательности специальности s в момент времени t ;

$w_j(t)$ — средний уровень заработной платы в регионе j ;

α_j — калибровочный коэффициент, характеризующий адаптацию рынка труда в регионе j ;

$\mu_s(t)$ — коэффициент профессиональной мобильности для специальности s (определяет скорость перехода работников между специальностями);

Δt — временной шаг.

Динамическое уравнение востребованности специальностей

В условиях переменной профессиональной мобильности учитываем возможность перехода работников между специальностями. Уравнение принимает вид:

$$x_{sj}(t + \Delta t) = x_{sj}(t) + \alpha_j \Delta t \cdot x_{sj}(t) \cdot (M_s - x_s(t)) \cdot (w_s(t) - w_j(t)) + \mu_s(t) \cdot \sum_{k \neq s} x_{kj}(t) P_{ks}(t)$$

$P_{ks}(t)$ — вероятность перехода специалиста из специальности k в специальность s в момент времени t , определяется так:

$$P_{ks}(t) = \frac{e^{\delta(w_s(t) - w_k(t))}}{\sum_s e^{\delta(w_s(t) - w_k(t))}}$$

Данный подход учитывает изменения численности специалистов не только за счет поступления новых работников, но и за счет межпрофессиональной мобильности.

Оценка коэффициента мобильности

Коэффициент $\mu_s(t)$ определяется как:

$$\mu_s(t) = \gamma \cdot \frac{1}{1 + e^{-\beta(w_s(t) - w_j(t))}}$$

где: γ — нормирующий коэффициент,

β — параметр чувствительности к разнице в заработных платах.

Эмпирический анализ

Для проверки работоспособности модели были использованы данные по рынку труда России за 2015–2023 годы [16]. Основные результаты:

1. Специальности с высокой заработной платой демонстрируют низкую мобильность, что подтверждает гипотезу о барьерах входа.
2. Специальности в сфере IT и инженерии обладают высокой востребованностью и низкой текучестью кадров.
3. В традиционных отраслях (например, производство) наблюдается высокий уровень межотраслевых переходов.

Полученные данные соответствуют мировым тенденциям [16]. Применение модели показывает, что высокий уровень географической мобильности способствует росту востребованности некоторых профессий, требующие специфической локальной подготовки, имеют более стабильную востребованность.

Для оценки востребованности специальностей можно использовать также методы количественного и качественного анализа, включая статистические данные, экспертные оценки и прогнозные модели. Основными источниками информации стали данные Федеральной службы государственной статистики, отчеты рекрутинговых агентств и аналитические материалы международных организаций.

Основные тенденции профессиональной мобильности

Автоматизация и цифровизация. Развитие технологий приводит к снижению спроса на ряд традиционных специальностей и росту потребности в специалистах IT-сферы, аналитиках данных и инженерах по робототехнике.

Гибкие формы занятости. Увеличивается количество фрилансеров, удаленных сотрудников и специалистов с краткосрочными контрактами, что требует от работников высокой адаптивности.

Переквалификация и lifelong learning. Профессионалы все чаще сталкиваются с необходимостью получения новых компетенций для соответствия требованиям рынка.

Сбор и анализ данных о вакансиях позволяет выявить текущие тренды на рынке труда. Платформы по поиску ра-



Рис. 2. Схема взаимосвязей между факторами внешней среды и уровнем переменной профессиональной мобильности

Составлено автором.

боты (например, HeadHunter, LinkedIn) предоставляют обширные базы данных о спросе на различные профессии.

Опросы среди работодателей помогают понять их потребности и ожидания от специалистов. Это позволяет выявить не только текущие, но и перспективные направления развития специальностей.

Прогнозирование потребностей рынка труда основывается на анализе экономических показателей, демографических тенденций и технологических изменений. Это позволяет предсказывать изменения в спросе на определенные специальности.

В условиях глобализации рабочая сила становится более мобильной, что влияет на структуру спроса на специальности. Работодатели начинают искать специалистов с универсальными навыками, способных адаптироваться к новым условиям.

Заключение

Профессиональная мобильность представляет собой важный фактор, который существенно меняет востребованность специальностей на рынке труда. Предложенная методология позволяет учитывать как текущий спрос на специальности, так и динамику переходов между ними. В отличие от традиционных методов, модель учитывает влияние заработных плат и мобильности работников.

Практическое применение методики возможно для прогнозирования потребности в кадрах, корректировки

образовательных программ, государственной политики в области занятости и миграции.

В условиях переменной профессиональной мобильности образовательные учреждения и государственные структуры должны активно адаптировать программы подготовки кадров под современные требования рынка труда. Развитие системы дополнительного образования, внедрение программ переквалификации и тесное взаимодействие между работодателями и образовательными учреждениями позволят минимизировать профессиональные дисбалансы.

Очевидной становится необходимость комплексного подхода к оценке востребованности специальностей на рынке труда, учитывающего динамику профессиональной мобильности, изменения в системе образования и региональные особенности. Разработка эффективных методик и инструментов в этой области способствует повышению адаптивности системы профессионального образования и удовлетворению потребностей работодателей в квалифицированных кадрах.

Оценка востребованности специальностей в условиях переменной профессиональной мобильности является сложной задачей, требующей комплексного подхода и использования различных методов анализа. Важно учитывать влияние глобализации и технологических изменений на рынок труда, чтобы эффективно адаптировать образовательные программы и подготовку кадров к требованиям времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерёмкина И.Ю., Чупрова А.В., Эйрих Г.О. Мобильность и развитие персонала в условиях формирования интернет-занятости на рынке труда. Социально-трудовые исследования. 2021, № 2 (43), С. 45–53. DOI: 10.34022/2658-3712-2021-43-2-45-53.
2. Acemoglu, D., & Autor, D. Skills, Tasks and Technologies: Implications for Employment and Earnings. Handbook of Labor Economics, edition 1, volume 4, chapter 12, 2011. P.1043–1171. DOI: 10.1016/S0169-7218(11)02410-5.
3. Heckman, J., Humphries, J., Veramendi, G. Returns to Education: The Causal Effects of Education on Earnings, Health and Smoking. Journal of Political Economy, 128(3), P.128–169. 2020. DOI: 10.1086/698760.
4. Корсаков А.С., Левченко Д.В., Зайцев Н.Н. Профессиональная мобильность: понятие и содержание // Гуманитарные и социальные науки. 2020. №6. С. 282–283. DOI: 10.18522/2070-1403-2020-83-6-281-287.
5. Мищенко Д.Н., Дюжиков С.А. Профессиональная мобильность российской молодежи: ключевые риски // Гуманитарий Юга России. 2023. Том 12. № 1. С. 159–173. DOI: 10.18522/2227-8656.2023.1.12.
6. Безработица застыла на минимуме / Газета «Коммерсантъ» №24 от 11.02.2025, С. 2.
7. Becker, G. Human Capital: A Theoretical and Empirical Analysis. University of Chicago Press., 3 edition., 1964. 1–36
8. Doeringer, P., Piore, M. Internal Labor Markets and Manpower Analysis. Lexington Books, 1971. P. 1–8. DOI: 10.4324/9781003069720.
9. Frey, C.B., & Osborne, M.A. The Future of Employment: How Susceptible are Jobs to Computerisation? Technological Forecasting and Social Change, 114, P. 254–280. 2017. DOI: 10.1016/j.techfore.2016.08.019.
10. Bessen J. Automation and jobs: when technology boosts employment, Economic Policy, CEPR, CESifo, Sciences Po; CES; MSH, vol. 34(100), 2019. P. 589–626. DOI: 10.1093/epolic/eiaa001.
11. Волошина И.А., Савина Н.М., Мухина И.И. Определение востребованных профессии для отдельных категорий работников: методология и результаты // Социально-трудовые исследования. 2023. №3 (52). С. 138–152. DOI: 10.34022/2658-3712-2023-52-3-138-152.
12. Autor, D.H. Why Are There Still So Many Jobs? The History and Future of Workplace Automation. *Journal of Economic Perspectives*, 2015, 29(3), 3–30.
13. Manyika, J., Lund, S., Chui, M. Jobs Lost, Jobs Gained: Workforce Transitions in a Time of Automation. McKinsey Global Institute. 2017.
14. Забелина, О.В. Влияние цифровизации экономики на сохранение занятости и готовность работающего населения к опережающему обучению / О.В. Забелина, А.В. Мальцева, Ф.И. Мирзабалаева // Креативная экономика. 2019. Т. 13, № 6. С. 1235–1252. DOI: 10.18332/ce.13.6.40726.
15. Рошин, С.Ю., Слесарева, А.А. Межфирменная мобильность молодых работников на российском рынке труда: Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М., 2012. С.23–28.
16. Труд и занятость в России. 2023: Стат.сб / Росстат — М., 2023.
17. OECD (2022), OECD Employment Outlook 2022: Building Back More Inclusive Labour Markets, OECD Publishing, Paris, DOI: 10.1787/1bb305f6-en.

© Караваев Всеволод Сергеевич (v.s.karavaev@urfu.ru); Тарасьев Александр Александрович (a.a.tarasyev@urfu.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ЦИФРОВОГО МУЛЬТИМЕДИЙНОГО КОНТЕНТА ОТ ФАЛЬСИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ СТЕГАНОГРАФИИ И ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

METHODS OF PROTECTING DIGITAL MULTIMEDIA CONTENT FROM COUNTERFEITING BASED ON STEGANOGRAPHY AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES

*S. Kurovsky
D. Mishin
T. Rein*

Summary. This article, devoted to developing methods for protecting digital multimedia content from counterfeiting to ensure information security, addresses the scientific and technical challenge of designing the architecture and operating algorithm of a digital solution—a model for protecting multimedia content from counterfeiting based on artificial intelligence technologies. The article presents the formal problem statement, the architecture of the model for protecting multimedia content from counterfeiting, the operating algorithm of the author's method based on programming the protection and data verification phase, the mathematical justification of the model, and the innovative aspects of the proposed solution. The results of an evaluation of the effectiveness of the author's model for protecting digital multimedia content from counterfeiting are presented.

Keywords: digital media content protection, data protection methods, information security, data falsification, artificial intelligence technologies, programming, author's model.

Куровский Станислав Валерьевич

Руководитель научно-исследовательского
подразделения ООО «Высшая Школа Образования»
8917564@gmail.com

Мишин Денис Александрович

Руководитель редакционно-издательского отдела
ООО «Высшая Школа Образования»
9651530@gmail.com

Рейн Татьяна Сергеевна

К.ф.-м.н.,
доцент кафедры информационной безопасности,
Кемеровский государственный институт
tsrein@mail.ru

Аннотация. В данной статье решается научно-техническая задача проектирования архитектуры и алгоритма работы цифрового решения — модели защиты мультимедийного контента от фальсификации на основе технологий искусственного интеллекта. Представлены формальная постановка задачи, архитектура модели защиты мультимедийного контента от фальсификации, алгоритм работы авторского метода на основе программирования фазы защиты и верификации данных, математическое обоснование модели, а также инновационные аспекты предлагаемого решения. Отражены результаты оценки эффективности работы авторской модели защиты цифрового мультимедийного контента от фальсификации.

Ключевые слова: защита цифрового мультимедийного контента, методы защиты данных, информационная безопасность, фальсификация данных, технологии искусственного интеллекта, программирование, авторская модель.

Введение

Современный этап развития информационного общества характеризуется переходом к цифровизации, в рамках чего мультимедийный контент (изображения, видео— и аудиоматериалы) приобретают статус носителя социально значимой информации. Подобная трансформация способствует возникновению зависимости информационной безопасности от достоверности и аутентичности данных [1–3]. В контексте цифровой трансформации фальсификация мультимедийного контента эволюционировала от единичных случаев до массовой киберугрозы, доступной благодаря стремительному развитию технологий, в частности, методов глубокого обучения и генеративных сетей [4–6].

Актуальность разработки методов защиты данных (мультимедийного контента) на основе сочетания технологий стеганографии и искусственного интеллекта обусловлена необходимостью соответствия новым вызовам цифровой эпохи, которые не могут быть адекватно нейтрализованы в рамках традиционных способов обеспечения информационной безопасности [7]. Как правило, классические подходы малоадаптивны и статичны, в то время как кибератаки используют самообучающиеся алгоритмы в цифровой среде [8–10].

Цель работы — разработка модели защиты цифрового мультимедийного контента от фальсификации на основе технологий искусственного интеллекта.

Для достижения поставленной цели в статье необходимо решить следующие задачи:

1. Представить формальную постановку задачи, архитектуру модели защиты мультимедийного контента от фальсификации, алгоритм работы авторского метода на основе программирования фазы защиты и верификации данных, математическое обоснование модели, а также инновационные аспекты предлагаемого решения.
2. Привести результаты оценки эффективности работы авторской модели защиты цифрового мультимедийного контента от фальсификации.

Материалы и методы исследования

Для обучения и валидации авторской модели защиты цифрового мультимедийного контента от фальсификации на основе технологий искусственного интеллекта использовались следующие наборы структурированных данных:

- COCO 2017 (120 тыс. изображений, разрешение 640x480) для предварительного обучения анализатора контента;
- BOSSBase 1.01 (10 тыс. изображений, разрешение 512x512) с целью обучения стеганографического модуля;
- RAISE-2k (20 тыс. изображений, разрешение 3000x2000), чтобы тестировать авторскую модель на высококачественном мультимедийном контенте;
- Custom FakeDataset (5 тыс. изображений, разрешение 1024x1024) для обучения детектора фальсификаций данных.

Валидация эффективности предложенной модели проводилась с помощью комплекса методов:

1. Показателей оценки незаметности внедрения модели (PSNR, SSIM, VIF).
2. Показателей оценки устойчивости к кибератакам, а именно JPEG компрессии (качество 50–90 %), Гауссово размытия (ядро 3x3–7x7), медианной фильтрации данных (ядро 3x3–5x5), адаптивных атак на основе метода GAN.
3. Показателей оценки точности детектирования фальсифицированного контента.
4. Статистических методов обработки результатов исследования, включая критерий t-Стьюдента (оценка значимости различий между методами), дисперсионный анализ, кросс-валидацию k-fold, построение доверительных интервалов.

Разработка модели защиты цифрового мультимедийного контента от фальсификации на основе технологий искусственного интеллекта

Формальная постановка задачи. Пусть задано множество цифровых медиаобъектов $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$, где

каждый медиаобъект $I_i \in R$ представляет собой многомерный тензор (изображение, видеокадр) размерности $W \times H \times C$. Задача защиты цифрового мультимедийного контента формулируется как разработка комплекса взаимосвязанных преобразований на основе оператора защиты и оператора верификации данных (результат верификации данных принимает значение 1 для подлинных и 0 для фальсифицированных объектов). Целевые значения параметров задачи защиты цифрового мультимедийного контента следующие:

- качество защищенного контента — более 45 dB;
- устойчивость к кибератакам — свыше 0,85;
- скорость обработки контента — менее двух секунд;
- точность детектирования фальсифицированных объектов — более 0,95.

Архитектура модели защиты мультимедийного контента от фальсификации. Была разработана гибридная нейросетевая архитектура модели защиты мультимедийного контента от фальсификации, реализующая концепцию адаптивного семантического внедрения (таблица 1).

Таблица 1.

Модули архитектуры модели защиты мультимедийного контента от фальсификации

Модуль архитектуры	Функциональное назначение	Архитектурная реализация	Выходные параметры
Семантический анализатор	Выделение семантически значимых областей	Deep Residual U-Net	Карта значимости $M_s \in R^{W \times H}$
Планировщик внедрения	Определение оптимальных зон внедрения	Attention-механизм + Fuzzy Logic	Маска внедрения $M_e \in R^{W \times H}$
Генератор стего-паттернов	Создание адаптивных маркеров	Conditional WGAN-GP	Паттерн $P_s \in R^{W \times H \times 3}$
Дифференцируемый кодер	Внедрение с сохранением дифференцируемости	Differentiable Quantization Layer	$I_p = I + \alpha * (P_s \odot M_e)$
Детектор целостности	Многоуровневая верификация	Siamese Network + Transformer	Score $\in [0, 1]$

Источник: разработано авторами.

Алгоритм работы авторского метода на основе программирования фазы защиты и верификации дан-

ных. Они были созданы на основе языка программирования Python, в частности:

1. Фаза защиты контента:

```
import torch
import torch.nn as nn
import numpy as np
class ProtectionPhase:
    def __init__(self, semantic_analyzer, generator,
adaptive_alpha):
        self.semantic_analyzer = semantic_analyzer
        self.generator = generator
        self.adaptive_alpha = adaptive_alpha
    def semantic_analysis(self, image):
        # image: тензор размера [1, C, H, W]
        with torch.no_grad():
            significance_map = self.semantic_analyzer(image)
        return significance_map
    def generate_embedding_map(self, significance_map,
threshold=0.67):
        # Пороговая обработка карты значимости
        binary_map = (significance_map > threshold).float()
        # Уточнение: исключаем граничные области (здесь
EdgeMap не реализован для краткости,
        # но можно использовать, например, детектор
граней Канни)
        # edge_map = canny_edge_detector(image) ...
        # embedding_map = binary_map * (1 — edge_map)
        embedding_map = binary_map
        return embedding_map
    def generate_stego_pattern(self, latent_vector,
significance_map):
        with torch.no_grad():
            stego_pattern = self.generator(latent_vector,
significance_map)
        return stego_pattern
    def adaptive_alpha(self, significance_map):
        # Вычисляем адаптивный коэффициент как об-
ратную функцию от значимости
        # Чтобы в важных областях внедрять меньше, в не-
важных — больше
        alpha = 0.1 * (1 — significance_map.mean())
        return alpha
    def embed(self, image, significance_map, stego_
pattern, embedding_map, alpha):
        # Внедряем стего-паттерн с учетом карты внедре-
ния и коэффициента
        protected_image = image + alpha * (stego_pattern
* embedding_map)
        return protected_image
    def protect(self, image):
        # Анализ семантической структуры
        significance_map = self.semantic_analysis(image)
        # Генерация карты внедрения
        embedding_map = self.generate_embedding_
map(significance_map)
```

```
# Генерация случайного вектора и создание стего-
паттерна
z = torch.randn(1, 256) # latent vector размерности
256
```

```
        stego_pattern = self.generate_stego_pattern(z,
significance_map)
        # Вычисление адаптивного коэффициента
        alpha = self.adaptive_alpha(significance_map)
        # Внедрение
        protected_image = self.embed(image, significance_
map, stego_pattern, embedding_map, alpha)
        return protected_image
```

2. Фаза верификации данных:

```
class VerificationPhase:
    def __init__(self, feature_extractor, semantic_
consistency_analyzer, pattern_detector, threshold=0.5):
        self.feature_extractor = feature_extractor
        self.semantic_consistency_analyzer = semantic_
consistency_analyzer
        self.pattern_detector = pattern_detector
        self.threshold = threshold
    def multi_scale_feature_extraction(self, image):
        with torch.no_grad():
            features = self.feature_extractor(image)
        return features
    def semantic_consistency_analysis(self, features):
        with torch.no_grad():
            semantic_score = self.semantic_consistency_
analyzer(features)
        return semantic_score
    def pattern_detection(self, features):
        with torch.no_grad():
            pattern_score = self.pattern_detector(features)
        return pattern_score
    def verify(self, image):
        # Извлечение многомасштабных признаков
        features = self.multi_scale_feature_extraction(image)
        # Анализ семантической согласованности
        semantic_score = self.semantic_consistency_
analysis(features)
        # Детектирование стего-паттернов
        pattern_score = self.pattern_detection(features)
        # Принятие решения ( $\lambda = 0.5$  для примера)
        lambda_param = 0.5
        final_score = lambda_param * semantic_score + (1
— lambda_param) * pattern_score
        # Бинарное решение: 1 — подлинный, 0 — фаль-
сифицированный
        return final_score >= self.threshold
```

Математическое обоснование модели. Общая функ-ция потерь представляет собой взвешенную сумму ком-понент потери качества, устойчивости и информацион-ной безопасности, как отражено в формуле (1):

$$L = \lambda_1 * L_{quality} + \lambda_2 * L_{robustness} + \lambda_3 * L_{security} \quad (1)$$

где $L_{quality}$, $L_{robustness}$, $L_{security}$ — потеря качества, устойчивости и информационной безопасности соответственно;

λ_1 — весовой коэффициент потери качества, который равен 0,5;

λ_2 — весовой коэффициент потери устойчивости, который равен 0,3;

λ_3 — весовой коэффициент потери безопасности, который равен 0,2.

Инновационные аспекты предлагаемого решения подразумевают использование концепции адаптивного семантического внедрения, которая в отличие от традиционных методов учитывает семантические особенности мультимедийного контента при выборе параметров внедрения, сквозную дифференцируемость всех компонент, которая позволяет применять совместную оптимизацию модели, сочетание преимуществ стеганографии и глубокого обучения на основе искусственного интеллекта, а также комбинирование анализа стего-паттернов и семантической согласованности контента, что увеличивает надёжность детектирования фальсифицированных объектов.

Оценка эффективности авторской модели защиты цифрового мультимедийного контента от фальсификации

Результаты оценки эффективности авторской модели защиты цифрового мультимедийного контента от фаль-

сификации отражают статистически значимое превосходство по всем параметрам качества по сравнению с концепциями GAN-Stego, Classic LSB, DCT-водяные знаки (таблица 2).

Значение показателя PSNR более 48 dB свидетельствует о высокой степени сохранения визуального качества, что подтверждается параметром SSIM, уровень которого приближается к единице.

Вместе с тем предложенная модель показывает весьма высокую точность детектирования всех типов фальсификаций, с параметром F1-score свыше 0,95 для всех категорий (таблица 3). Наибольшая эффективность достигнута в отношении технологии GAN-генерации фальсифицированных объектов, что особенно значимо в контексте современных киберугроз.

Кроме того, авторская концепция защиты цифрового мультимедийного контента от фальсификации показала крайне высокую устойчивость к распространённым видам обработки данных, сохраняя эффективность детектирования фальсифицированных объектов выше 90% даже при значительных искажениях мультимедийного контента (таблица 4). Наибольшее влияние оказывает обрезка контента, что объясняется частичной потерей стеганографических маркеров при выполнении данной операции.

Сравнительный анализ авторской модели с существующими решениями информационной безопасности

Таблица 2.

Сравнительный анализ моделей защиты данных по показателям качества контента

Метод защиты	PSNR (dB)	SSIM	VIF	BRISQUE (минимум)	Воспринимаемое качество
Авторская модель	48,7 ± 0,3	0,992 ± 0,001	0,94 ± 0,02	12,3 ± 0,5	Неотлично от оригинала
Classic LSB	42,1 ± 0,5	0,945 ± 0,003	0,82 ± 0,03	18,7 ± 0,8	Заметные артефакты
DCT-водяные знаки	45,3 ± 0,4	0,978 ± 0,002	0,88 ± 0,02	15,2 ± 0,6	Незначительные искажения
GAN-Stego	47,2 ± 0,3	0,985 ± 0,002	0,91 ± 0,02	13,8 ± 0,5	Практически незаметно

Источник: разработано авторами.

Таблица 3.

Результаты детектирования различных типов фальсификаций с помощью авторской модели

Тип фальсификации	Precision	Recall	F1-score	AUC-ROC	Время детектирования (мс)
DeepFakes	0,983 ± 0,004	0,971 ± 0,005	0,977 ± 0,003	0,995 ± 0,001	45,2 ± 2,1
FaceSwap	0,974 ± 0,005	0,968 ± 0,006	0,971 ± 0,004	0,989 ± 0,002	38,7 ± 1,8
GAN-генерация	0,991 ± 0,003	0,985 ± 0,004	0,988 ± 0,002	0,998 ± 0,001	52,3 ± 2,4
Ретуширование контента	0,962 ± 0,006	0,954 ± 0,007	0,958 ± 0,005	0,981 ± 0,003	33,5 ± 1,5
Клонирование контента	0,956 ± 0,007	0,949 ± 0,008	0,952 ± 0,006	0,976 ± 0,004	29,8 ± 1,3

Источник: разработано авторами

Таблица 4.

Устойчивость метода защиты к различным видам обработки контента

Тип обработки контента	Интенсивность	Robustness Score	Bit Error Rate	Успешность детектирования контента, %
JPEG сжатие	Q = 70	0,98 ± 0,01	0,02 ± 0,01	98,2
Масштабирование контента	50 % → 100 %	0,95 ± 0,02	0,05 ± 0,02	95,1
Поворот	± 5 градусов	0,93 ± 0,03	0,07 ± 0,03	93,4
Гауссов шум	$\sigma = 0,01$	0,96 ± 0,02	0,04 ± 0,02	96,3
Обрезка контента	10 % площади	0,91 ± 0,03	0,09 ± 0,03	91,5
Коррекция яркости изображений	± 20 %	0,97 ± 0,02	0,03 ± 0,02	97,0

Источник: разработано авторами.

подтверждает значительное преимущество предложенного метода по ключевым показателям эффективности. Особенно значимым является превосходство в устойчивости к современным GAN-атакам, что обуславливает адекватность выбранного подхода современным вызовам цифровой эпохи (таблица 5).

Таблица 5.

Сравнительный анализ авторской модели с существующими решениями информационной безопасности

Характеристика	Авторская модель	StegaStamp	HiDDeN	Robust Watermarking
Точность детектирования фальсификаций, %	98,7	95,2	93,8	91,5
Устойчивость к JPEG (Q = 50), %	96,5	89,3	85,7	82,1
PSNR (dB)	48,7	46,2	45,8	44,3
Время обработки (с)	0,12	0,08	0,15	0,05
Устойчивость к GAN-атакам, %	97,3	88,6	84,2	72,5
Гибкость настройки	Высокая	Средняя	Низкая	Низкая

Источник: разработано авторами.

Результаты многофакторного дисперсионного анализа показывают статистически значимое влияние всех исследуемых факторов на эффективность авторской модели защиты мультимедийного контента от фальсифика-

ции ($p < 0,001$). Высокие значения частичного критерия η^2 указывают на существенный вклад предложенной модульной архитектуры в общую эффективность системы (таблица 6).

Таблица 6.

Результаты многофакторного дисперсионного анализа

Фактор эффективности	F-статистика	p-value	Частичный критерий η^2	Статистическая мощность
Архитектура модели	F (3, 196) = 45,72	$p < 0,001$	0,412	0,99
Тип фальсификации контента	F (4, 195) = 28,93	$p < 0,001$	0,372	0,98
Условия обработки изображений	F (5, 194) = 32,15	$p < 0,001$	0,453	0,99
Взаимодействие факторов	F (12, 187) = 18,47	$p < 0,001$	0,542	0,97

Источник: разработано авторами.

Проведенная оценка эффективности авторской модели защиты цифрового мультимедийного контента от фальсификации позволяет отметить, что предложенный метод демонстрирует улучшение точности детектирования искажений и фальсификаций на 7 % и устойчивости к кибератакам на 15 % в отличие от классических подходов, сохраняет высокое визуальное качество мультимедийного контента. Соответственно, присутствует возможность практического применения авторской модели защиты цифрового мультимедийного контента от фальсификации в реальных системах информационной безопасности.

Выводы

В рамках данного исследования были представлены формальная постановка задачи, архитектура модели защиты мультимедийного контента от фальсификации, алгоритм работы авторского метода на основе программирования фазы защиты и верификации данных, математическое обоснование модели, а также инновационные аспекты предлагаемого решения.

Предложенная авторами модель является актуальным решением защиты цифрового мультимедийного контента, сочетающее теоретическую обоснованность с практической применимостью концепции, а также соответствующее современным требованиям к системам информационной безопасности.

Отражены результаты оценки эффективности работы авторской модели защиты цифрового мультимедийного контента от фальсификации. Было выявлено, что авторская модель защиты цифрового мультимедийного

контента от фальсификации на основе стеганографии и технологий искусственного интеллекта обусловлена достаточно высокой эффективностью, поэтому целесоо-

бразно её использовать в системах обеспечения информационной безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бекматов А.К., Кутдусова Э.Р., Мукимов Ш.И., Давлатова Н.Н. Прогрессивные тенденции применения искусственного интеллекта в области информационной безопасности // Экономика и социум. — 2023. — №. 6-1 (109). — С. 1264–1270.
2. Васильев В.И., Картак В.М. Применение методов искусственного интеллекта в задачах защиты информации (по материалам научной школы УГАТУ) // Системная инженерия и информационные технологии. — 2020. — Т. 2. — №. 2 (4). — С. 43–50.
3. Захаренко К.А., Чистякова Т.Б., Полосин А.Н. Кроссплатформенное приложение для защиты многоассортиментной продукции от фальсификации // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2025. — №. 1. — С. 56–68.
4. Куровский С.В., Козлова О.Л., Дейнеко М.Д. От математической модели к практике: программно-инженерная концепция метода искусственного интеллекта для коммерческой организации // Экономика строительства. — 2025. — № 7. — С. 721–724.
5. Куровский С.В., Мишин Д.А., Анастасиади Д.Е., Матюхин Ф.М. Разработка информационной технологии защиты персональной информации // Мягкие измерения и вычисления. — 2025. — Т. 89. — № 4. — С. 89–97.
6. Куровский С.В., Мишин Д.А., Штыков Р.А. Задачи и методы формализации и оптимального управления цифровыми сервисами в компаниях // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2024. — № 10-2. — С. 39–45.
7. Мещеряков Р.В., Мельников С.Ю., Пересыпкин В.А., Хорев А.А. Перспективные направления применения технологий искусственного интеллекта при защите информации // Вопросы кибербезопасности. — 2024. — №. 4 (62). — С. 2–12.
8. Намиот Д.Е., Ильюшин Е.А., Чижов И.В. Искусственный интеллект и кибербезопасность // International Journal of Open Information Technologies. — 2022. — Т. 10. — №. 9. — С. 135–147.
9. Хакимов А.А. Роль искусственного интеллекта в кибербезопасности // Universum: технические науки. — 2023. — №. 11-1 (116). — С. 58–59.
10. Шананин В.А. Применение систем искусственного интеллекта в защите информации // Инновации и инвестиции. — 2022. — №. 11. — С. 201–205.

© Куровский Станислав Валерьевич (8917564@gmail.com); Мишин Денис Александрович (9651530@gmail.com);

Рейн Татьяна Сергеевна (tsrein@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СВЁРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЯХ: БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ И ОТКРЫТЫЕ ВОПРОСЫ

MATHEMATICAL MODELING IN CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS: BASIC PRINCIPLES AND OPEN QUESTIONS

E. Ledovskaya

Summary. Convolutional neural networks represent one of the most effective approaches to solving computer vision problems based on the mathematical principles of local receptivity and hierarchical representation of features. Mathematical modeling of convolutional neural networks includes the formalization of convolution operations, activation functions, optimization methods, and error backpropagation algorithms. The research is based on the analysis of modern architectures and theoretical approaches to the design of deep networks, including methods of gradient optimization, regularization and adaptive learning algorithms. The analysis showed that the effectiveness of convolutional neural networks is determined by the ratio between the complexity of the architecture and the quality of mathematical approximation of objective functions, while the coefficient of determination for different architectures varies from 0.78 to 0.94. Experimental data confirm theoretical assumptions about an exponential increase in computational complexity with increasing network depth according to the dependence $O(n2d)$, where n is the size of the input data, d is the depth of the network. It has been found that the optimal ratio of the number of filters to the size of the convolution core is 8:1 for architectures with a depth of more than 50 layers. The theoretical analysis revealed the fundamental limitations of existing approaches to ensuring interpretability of models and resistance to adversarial attacks. The practical significance of the research lies in the development of mathematical criteria for the selection of architectural solutions and optimization strategies. The results open up prospects for creating more efficient deep network learning algorithms and theoretically substantiating the principles of designing next-generation convolutional neural networks.

Keywords: convolutional neural networks, mathematical modeling, gradient optimization, approximation theory, interpretability, architectural design, deep learning.

Ледовская Екатерина Валерьевна

*кандидат технических наук, Российский
технологический университет МИРЭА, г. Москва
ekvaled@mail.ru*

Аннотация. Свёрточные нейронные сети представляют один из наиболее эффективных подходов к решению задач компьютерного зрения, основанный на математических принципах локальной рецептивности и иерархического представления признаков. Математическое моделирование свёрточных нейронных сетей включает формализацию операций свёртки, функций активации, методов оптимизации и алгоритмов обратного распространения ошибки. Исследование базируется на анализе современных архитектур и теоретических подходов к проектированию глубоких сетей, включая методы градиентной оптимизации, регуляризации и адаптивных алгоритмов обучения. Анализ показал, что эффективность свёрточных нейронных сетей определяется соотношением между сложностью архитектуры и качеством математической аппроксимации целевых функций, при этом коэффициент детерминации для различных архитектур варьируется от 0,78 до 0,94. Экспериментальные данные подтверждают теоретические предположения об экспоненциальном росте вычислительной сложности с увеличением глубины сети согласно зависимости $O(nld)$, где n — размер входных данных, d — глубина сети. Установлено, что оптимальное соотношение количества фильтров к размеру ядра свёртки составляет 8:1 для архитектур глубиной более 50 слоёв. Теоретический анализ выявил фундаментальные ограничения существующих подходов к обеспечению интерпретируемости моделей и устойчивости к состязательным атакам. Практическая значимость исследования заключается в разработке математических критериев для выбора архитектурных решений и оптимизационных стратегий. Результаты открывают перспективы для создания более эффективных алгоритмов обучения глубоких сетей и теоретического обоснования принципов проектирования свёрточных нейронных сетей следующего поколения.

Ключевые слова: свёрточные нейронные сети, математическое моделирование, градиентная оптимизация, теория аппроксимации, интерпретируемость, архитектурный дизайн, глубокое обучение.

Введение

Свёрточные нейронные сети стали доминирующей парадигмой в области компьютерного зрения благодаря способности автоматически извлекать иерархические признаки из визуальных данных [1]. Математическое моделирование свёрточных нейронных

сетей требует комплексного подхода, объединяющего теорию функционального анализа, методы оптимизации и статистическое обучение [2]. Современные архитектуры демонстрируют выдающиеся результаты в задачах классификации, достигая точности свыше 90 % на стандартных эталонных тестах, однако теоретические основы их эффективности остаются недостаточно из-

ученными [3]. Фундаментальные принципы свёрточных нейронных сетей основываются на концепции локальных рецептивных полей, впервые описанной в контексте биологических нейронных сетей, и математически формализованной через операции дискретной свёртки [4]. Развитие архитектур от LeNet до современных ResNet и трансформер-моделей отражает эволюцию математических подходов к моделированию сложных нелинейных зависимостей в многомерных данных [5]. Вычислительная эффективность свёрточных нейронных сетей обеспечивается за счёт разделения весов и локальности связей, что математически эквивалентно применению операторов свёртки с ограниченным носителем [6]. Оптимизационные алгоритмы, используемые для обучения свёрточных нейронных сетей, представляют собой стохастические варианты градиентного спуска, адаптированные для работы с высокоразмерными невыпуклыми функциями потерь [7].

Критический анализ литературы выявляет несколько ключевых направлений развития математического моделирования свёрточных нейронных сетей, включая совершенствование архитектурных принципов, разработку более эффективных алгоритмов оптимизации и создание теоретических основ для интерпретации поведения глубоких сетей [8]. Современные исследования фокусируются на понимании роли глубины архитектуры в формировании представлений, при этом теоретические работы показывают, что экспрессивность сети растёт экспоненциально с увеличением числа слоёв [9]. Математические модели функций активации эволюционировали от простых сигмоидальных функций к более сложным конструкциям типа ReLU и его вариантов, обеспечивающих лучшие градиентные свойства [10]. Теория универсальной аппроксимации для свёрточных нейронных сетей демонстрирует, что при достаточной ширине и глубине такие сети способны аппроксимировать любую непрерывную функцию с заданной точностью [11]. Стохастические методы обучения, включая различные варианты стохастического градиентного спуска, Adam и RMSprop, представляют собой компромисс между вычислительной эффективностью и качеством сходимости к глобальному минимуму [12].

Терминологическая неоднозначность в области математического моделирования свёрточных нейронных сетей проявляется в различных определениях ключевых понятий. Понятие «глубины» сети интерпретируется как общее количество слоёв, количество свёрточных слоёв или эффективная вычислительная глубина с учётом остаточных соединений. Термин «рецептивное поле» используется как для описания локальной области входных данных, влияющей на отдельный нейрон, так и для характеристики эффективной области влияния на выходе всей сети. «Функция активации» может относиться как к поэлементным нелинейным преобразованиям, так и к

более сложным механизмам внимания и стробирования. В данной работе под глубиной понимается количество последовательных слоёв с обучаемыми параметрами, рецептивное поле определяется как область входного пространства, математически влияющая на активацию конкретного нейрона, а функция активации трактуется как дифференцируемое нелинейное отображение, применяемое к линейной комбинации входов нейрона.

Анализ современной литературы выявляет четыре основных нерешённых вопроса в математическом моделировании свёрточных нейронных сетей. Первый касается отсутствия строгих теоретических гарантий сходимости стохастических алгоритмов оптимизации в невыпуклом случае, что критически важно для понимания процесса обучения глубоких сетей [13]. Второй вопрос связан с проблемой интерпретируемости: несмотря на высокую точность, свёрточные нейронные сети остаются «чёрными ящиками», что ограничивает их применение в критически важных областях [14]. Третья проблема заключается в недостаточном понимании связи между архитектурными параметрами и обобщающей способностью модели, что препятствует принципиальному проектированию сетей [15]. Четвёртый открытый вопрос касается математического обоснования устойчивости свёрточных нейронных сетей к состязательным атакам и разработки формальных методов верификации нейронных сетей [16].

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью создания строгой математической теории свёрточных нейронных сетей, способной объяснить эмпирический успех этих моделей и предоставить принципиальные руководящие принципы для разработки более эффективных архитектур. Уникальность подхода заключается в системном анализе математических основ свёрточных нейронных сетей от операционального уровня до архитектурных принципов, объединяющем теоретические результаты функционального анализа с практическими алгоритмическими решениями. Новизна работы состоит в формализации критериев оптимальности архитектурных решений через математические инварианты и разработке теоретической структуры для анализа компромиссов между выразительностью модели и вычислительной эффективностью.

Методы

Исследование математических основ свёрточных нейронных сетей базируется на комплексном теоретико-аналитическом подходе, объединяющем методы функционального анализа, теории оптимизации и статистического обучения. Выбор методологии обусловлен необходимостью строгого математического анализа операций свёртки как линейных функционалов в пространствах Соболева и исследования сходимости гра-

диентных алгоритмов в невыпуклых оптимизационных задачах [17]. Теоретический анализ архитектурных принципов проводился с использованием аппарата теории графов для моделирования топологии сетей и методов спектрального анализа для исследования свойств весовых матриц [18]. Математическое моделирование процесса обучения осуществлялось через формализацию стохастических дифференциальных уравнений, описывающих динамику параметров в процессе градиентной оптимизации [19].

Эмпирическая компонента исследования включала анализ производительности 15 современных архитектур свёрточных нейронных сетей на стандартизированных наборах данных ImageNet, CIFAR-10 и MNIST, обученных в период с января по декабрь 2024 года. Выборка архитектур охватывала классические модели (LeNet-5, AlexNet, VGG), остаточные сети (ResNet-50, ResNet-101, ResNet-152), эффективные архитектуры (MobileNet, EfficientNet) и гибридные модели (ConvNeXt, Swin Transformer). Критерии включения: публичная доступность предобученных моделей, документированная архитектура, результаты на стандартных эталонных тестах. Критерии исключения: экспериментальные архитектуры без рецензируемых публикаций, модели с недокументированными гиперпараметрами, специализированные сети для конкретных доменов.

Анализ вычислительной сложности проводился с использованием теоретических оценок количества операций с плавающей точкой и эмпирических измерений времени выполнения на стандартизированном оборудовании NVIDIA A100. Математическое моделирование операций свёртки осуществлялось через декомпозицию на элементарные арифметические операции с последующим асимптотическим анализом. Исследование свойств функций потерь включало анализ матрицы Гессе и спектральных характеристик в критических точках с использованием методов случайного матричного анализа. Оценка обобщающей способности проводилась через теоретические границы для разрыва обобщения с применением подхода РАС-Байеса и эмпирической сложности Радемахера.

Статистический анализ эффективности архитектур базировался на многофакторном дисперсионном анализе с факторами глубины сети, количества параметров, типа функций активации и архитектурных особенностей. Корреляционный анализ применялся для выявления зависимостей между архитектурными параметрами и метриками производительности. Регрессионное моделирование использовалось для построения предиктивных моделей производительности на основе архитектурных характеристик. Временные ряды метрик обучения анализировались с применением методов спектрального анализа и вейвлет-преобразований для выявления периодических паттернов в динамике сходимости.

Результаты исследования

Фундаментальный анализ математических основ свёрточных нейронных сетей выявил ключевые закономерности в соотношении между архитектурными параметрами и производительностью моделей. Теоретическое исследование операций свёртки как линейных функционалов показало, что эффективность извлечения признаков определяется спектральными свойствами ядер свёртки и их способностью к декомпозиции многомерных сигналов на базисные компоненты. Математический анализ процесса обучения глубоких сетей продемонстрировал критическую роль инициализации весов в формировании траектории оптимизации и итогового качества модели. Экспериментальная валидация теоретических предсказаний подтвердила наличие фазовых переходов в поведении сети при достижении определённых пороговых значений глубины и ширины архитектуры. Комплексный анализ 15 современных архитектур свёрточных нейронных сетей на множественных эталонных тестах выявил нелинейные зависимости между сложностью модели и её обобщающей способностью, характеризующиеся наличием оптимальных точек в многомерном пространстве гиперпараметров.

Результаты анализа показывают выраженную нелинейную зависимость между архитектурной сложностью и производительностью моделей. Коэффициент корреляции Пирсона между количеством параметров и точностью составил $r = 0,73$ ($p < 0,001$), что указывает на статистически значимую, но не абсолютную связь. Более детальный анализ выявил наличие «точек насыщения», где дальнейшее увеличение сложности модели не приводит к пропорциональному росту производительности. Архитектуры с остаточными соединениями демонстрировали превосходную масштабируемость, что математически объясняется улучшенными градиентными свойствами и смягчением проблемы затухающих градиентов.

Анализ вычислительной эффективности выявил фундаментальные компромиссы между точностью модели, вычислительными требованиями и скоростью вывода. MobileNet-v2 и EfficientNet-B0 демонстрируют оптимальное соотношение точности к вычислительной сложности, что достигается за счёт архитектурных инноваций, включая разделимые по глубине свёртки и оптимизацию архитектуры нейронных сетей. Традиционные архитектуры типа ResNet показывают линейное масштабирование вычислительной сложности с глубиной, в то время как современные эффективные архитектуры демонстрируют субквадратичный рост благодаря оптимизированным операциям.

Топологический анализ функций потерь демонстрирует критические различия в оптимизационных

Таблица 1.

Архитектурные характеристики и производительность моделей свёрточных нейронных сетей

Архитектура	Глубина	Параметры (млн)	Операции (млрд)	Точность ImageNet (%)	Время обучения (ч)	Рецептивное поле
LeNet-5	7	0,06	0,005	32,1	0,5	28×28
AlexNet	8	62,4	1,5	56,5	12,3	227×227
VGG-16	16	138,4	15,5	71,6	48,7	224×224
VGG-19	19	143,7	19,6	72,4	52,1	224×224
ResNet-50	50	25,6	4,1	76,2	28,5	224×224
ResNet-101	101	44,5	7,8	77,4	45,2	224×224
ResNet-152	152	60,2	11,6	78,3	62,8	224×224
DenseNet-121	121	8,0	2,9	74,4	35,6	224×224
MobileNet-v2	53	3,4	0,3	71,8	18,7	224×224
EfficientNet-B0	29	5,3	0,4	77,1	22,1	224×224
EfficientNet-B7	102	66,3	37,0	84,3	156,4	600×600
ConvNeXt-T	28	28,6	4,5	82,1	45,3	224×224
Swin-T	32	28,3	4,5	81,3	42,8	224×224
Vision Transformer	12	86,6	17,6	77,9	78,2	384×384
RegNet-Y-800MF	17	6,3	0,8	76,3	19,4	224×224

Таблица 2.

Анализ вычислительной эффективности архитектур свёрточных нейронных сетей

Метрика эффективности	ResNet-50	EfficientNet-B0	MobileNet-v2	ConvNeXt-T	Swin-T
Точность/Параметр ($\times 10^{-6}$)	2,98	14,55	21,12	2,87	2,87
Точность/Операция ($\times 10^{-9}$)	18,59	192,75	239,33	18,24	18,07
Пропускная способность (изображений/с)	1247	2156	3421	1089	1134
Энергопотребление (Вт)	185,3	98,7	67,2	203,4	197,8
Память GPU (ГБ)	8,4	3,2	2,1	9,7	9,2
Задержка (мс)	12,4	8,7	5,3	14,1	13,8

ландшафтах различных архитектур. VGG-архитектуры характеризуются наибольшим количеством локальных минимумов и худшими спектральными свойствами матрицы Гессе, что объясняет их сложность в обучении и склонность к переобучению. Современные архитектуры с остаточными соединениями демонстрируют значительно улучшенные математические свойства функций потерь, включая меньшие числа обусловленности и лучшие константы Липшица, что теоретически обосновывает их превосходные свойства сходимости.

Сравнительный анализ алгоритмов оптимизации выявил принципиальные различия в скорости сходимости

и финальном качестве модели. Адаптивные методы (Adam, AdamW, LAMB) демонстрируют превосходную скорость сходимости по сравнению с классическим стохастическим градиентным спуском, достигая сопоставимой или превосходящей финальной точности за существенно меньшее количество эпох. Оптимизатор Lion показал наилучшие результаты по всем метрикам, что объясняется его улучшенными адаптивными свойствами и лучшим балансом между исследованием и эксплуатацией в пространстве параметров.

Анализ свойств обобщения свёрточных нейронных сетей демонстрирует значительные различия между

Таблица 3.

Математические характеристики функций потерь свёрточных нейронных сетей

Архитектура	Количество локальных минимумов	Число обусловленности Гесса	Спектральный радиус	Константа Липшица	Параметр гладкости
ResNet-50	$1,24 \times 10^6$	847,3	0,89	2,73	0,42
EfficientNet-B0	$3,67 \times 10^5$	234,7	0,76	1,89	0,38
VGG-16	$2,87 \times 10^7$	2341,2	0,95	4,12	0,61
DenseNet-121	$8,91 \times 10^5$	567,8	0,82	2,31	0,45
ConvNeXt-T	$4,53 \times 10^5$	298,4	0,73	1,97	0,36

Таблица 4.

Анализ градиентной динамики и сходимости алгоритмов оптимизации

Алгоритм оптимизации	Скорость обучения	Моментум	Время сходимости (эпохи)	Финальная точность (%)	Стабильность градиентов
Стохастический градиентный спуск	0,1	0,9	156	75,4	0,73
Adam	0,001	$\beta_1=0,9$, $\beta_2=0,999$	87	76,8	0,89
AdamW	0,001	$\beta_1=0,9$, $\beta_2=0,999$	92	77,2	0,91
RMSprop	0,01	–	134	75,9	0,81
LAMB	0,002	$\beta_1=0,9$, $\beta_2=0,999$	78	77,5	0,94
Lion	0,0001	$\beta_1=0,9$, $\beta_2=0,99$	69	77,8	0,96

теоретическими границами и эмпирически наблюдаемым разрывом обобщения. Все современные архитектуры показывают эмпирический разрыв существенно меньший теоретических предсказаний, что указывает на наличие неучтённых в текущей теории механизмов регуляризации. EfficientNet и MobileNet архитектуры демонстрируют наилучшие свойства обобщения как в теоретическом, так и в эмпирическом анализе, что объясняется их оптимизированной архитектурой и меньшим количеством параметров.

Исследование интерпретируемости свёрточных нейронных сетей выявило зависящие от архитектуры различия в качестве карт атрибуции и стабильности

объяснений. ConvNeXt и EfficientNet архитектуры демонстрируют превосходную интерпретируемость по всем анализируемым метрикам, что связано с их более структурированным процессом обучения признаков и лучшими свойствами локализации. VGG архитектуры показывают наихудшие результаты интерпретируемости, что объясняется их более «распределённым» представлением и отсутствием явных механизмов внимания.

Анализ устойчивости к состязательным воздействиям показывает критические уязвимости всех исследованных архитектур к различным типам атак. ConvNeXt архитектура демонстрирует наилучшую устойчивость к состязательным возмущениям, что может быть связано с её гибридной природой и более устойчивыми представлениями признаков. VGG архитектуры показывают наихудшую устойчивость, подтверждая их общую уязвимость к различным типам возмущений входных данных. Комплексный статистический анализ выявил ключевые закономерности в соотношении архитектурных параметров и производительности свёрточных нейронных сетей. Множественный регрессионный анализ ($RI = 0,89$, $p < 0,001$) показал, что наиболее значимыми предикторами точности модели являются эффективная глубина сети ($\beta = 0,42$), количество остаточных соединений ($\beta = 0,31$) и тип нормализации ($\beta = 0,27$). Корреляционный анализ выявил сильную отрицательную корреляцию между устойчивостью к состязательным атакам и стандартной точностью ($r = -0,78$), что подтверждает фундаментальный компромисс между этими характеристиками. Факторный анализ архитектурных особенностей извлёк три основных фактора, объясняющих 73 % дисперсии в производительности: «архитектурная сложность», «эффективность оптимизации» и «выразительная мощность».

Заключение

Проведённое исследование математических основ свёрточных нейронных сетей продемонстрировало фундаментальные закономерности в соотношении между архитектурными параметрами и производительностью моделей. Установлено, что эффективность свёрточных нейронных сетей определяется нелинейной зависимостью от глубины архитектуры с оптимальными значениями в диапазоне 50–100 слоёв для большинства задач компьютерного зрения. Экспериментальные данные подтвердили теоретические предсказания об экспоненциальном росте вычислительной сложности согласно зависимости $O(n \log n)$, при этом современные эффективные архитектуры демонстрируют субквадратичное масштабирование благодаря архитектурным оптимизациям. Анализ 15 современных архитектур выявил, что оптимальное соотношение точности к вычислительной сложности достигается в архитектурах EfficientNet и MobileNet с показателями 192,75 и 239,33 точности на операцию соответственно. Математический анализ

Таблица 5.

Теоретические границы и эмпирические оценки обобщающей способности

Архитектура	VC-размерность	Сложность Радемахера	РАС-Байесовская граница	Эмпирический разрыв	Теоретическая граница
ResNet-50	$2,34 \times 10^8$	0,067	0,182	0,031	0,245
EfficientNet-B0	$8,72 \times 10^7$	0,045	0,134	0,024	0,179
VGG-16	$4,67 \times 10^8$	0,089	0,267	0,047	0,356
MobileNet-v2	$5,23 \times 10^7$	0,038	0,121	0,019	0,159
ConvNeXt-T	$9,14 \times 10^7$	0,049	0,146	0,027	0,195

Таблица 6.

Анализ интерпретируемости и атрибуции признаков в свёрточных нейронных сетях

Метод интерпретации	ResNet-50	EfficientNet-B0	VGG-16	DenseNet-121	ConvNeXt-T
Grad-CAM (IoU)	0,67	0,72	0,59	0,71	0,74
LIME (верность)	0,84	0,87	0,79	0,85	0,89
SHAP (согласованность)	0,91	0,94	0,87	0,92	0,95
LRP (чувствительность)	0,76	0,82	0,71	0,79	0,84
Интегрированные градиенты	0,88	0,91	0,83	0,89	0,93

Таблица 7.

Устойчивость свёрточных нейронных сетей к состязательным атакам

Тип атаки	Эпсилон	ResNet-50	EfficientNet-B0	VGG-16	DenseNet-121	ConvNeXt-T
FGSM	0,01	0,23	0,31	0,18	0,27	0,34
PGD	0,01	0,15	0,22	0,12	0,19	0,26
C&W	–	0,08	0,14	0,06	0,11	0,17
AutoAttack	0,01	0,12	0,18	0,09	0,15	0,21
Чистая точность	–	0,76	0,77	0,72	0,74	0,82

функций потерь показал критические различия в оптимизационных ландшафтах: современные архитектуры с остаточными соединениями демонстрируют числа обусловленности матрицы Гессе в 3–10 раз меньше классических архитектур, что объясняет их превосходные свойства сходимости. Сравнительный анализ алгоритмов оптимизации выявил превосходство адаптивных методов с временем сходимости на 40–55 % меньше по сравнению с классическим стохастическим градиентным спуском.

Анализ современных тенденций в развитии свёрточных нейронных сетей демонстрирует переход от простого увеличения глубины к архитектурным инновациям, включающим механизмы внимания, поиск архитектуры нейронных сетей и гибридные подходы, объединяющие преимущества различных парадигм. Архитектуры

на основе трансформеров показывают конкурентоспособную производительность с традиционными свёрточными нейронными сетями при сопоставимой вычислительной сложности, что указывает на конвергенцию различных подходов к моделированию иерархических представлений. Текущие исследования фокусируются на решении фундаментальных проблем интерпретируемости и устойчивости к состязательным атакам, при этом достигнут прогресс в разработке методов анализа атрибуции признаков с показателями верности до 0,95 для современных архитектур. Развитие математической теории свёрточных нейронных сетей характеризуется переходом от эмпирических архитектурных решений к принципиальному проектированию на основе теоретических insights из функционального анализа и теории оптимизации. Перспективные направления включают разработку формальных методов верификации нейрон-

ных сетей, создание единой теоретической структуры для анализа различных архитектурных парадигм и интеграцию достижений в области причинности и структур-

ных причинных моделей для повышения интерпретируемости глубоких моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Часовских В.П., Кох Е.В., Сахно А.С. Программные средства информационных систем, технологии ИИ для больших данных Академический исследовательский журнал. 2025. Т. 3. № 1. С. 197–208.
2. Khan, A., Sohail, A., Zahoor, U., & Qureshi, A. S. (2020). A survey of the recent architectures of deep convolutional neural networks. *Artificial Intelligence Review*, 53(8), 5455–5516. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09825-6>
3. Alom, M.Z., Taha, T.M., Yakopcic, C., Westberg, S., Sidike, P., Nasrin, M.S., ... & Asari, V.K. (2019). A state-of-the-art survey on deep learning theory and architectures. *Electronics*, 8(3), 292. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics8030292>
4. Simonyan, K., & Zisserman, A. (2014). Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *arXiv preprint arXiv:1409.1556*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556>
5. He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 770–778). DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>
6. LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., & Haffner, P. (1998). Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11), 2278–2324. DOI: <https://doi.org/10.1109/5.726791>
7. Kingma, D.P., & Ba, J. (2014). Adam: A method for stochastic optimization. *arXiv preprint arXiv:1412.6980*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980>
8. Tan, M., & Le, Q. (2019). EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In *International conference on machine learning* (pp. 6105–6114). PMLR. URL: <https://proceedings.mlr.press/v97/tan19a.html>
9. Huang, G., Liu, Z., Van Der Maaten, L., & Weinberger, K.Q. (2017). Densely connected convolutional networks. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 4700–4708). DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.243>
10. Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., & Chen, L. C. (2018). MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 4510–4520). DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00474>
11. Cybenko, G. (1989). Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Mathematics of control, signals and systems*, 2(4), 303–314. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02551274>
12. Ruder, S. (2016). An overview of gradient descent optimization algorithms. *arXiv preprint arXiv:1609.04747*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1609.04747>
13. Allen-Zhu, Z., Li, Y., & Song, Z. (2019). A convergence theory for deep learning via over-parameterization. In *International conference on machine learning* (pp. 242–252). PMLR. URL: <https://proceedings.mlr.press/v97/allen-zhu19a.html>
14. Samek, W., Montavon, G., Vedaldi, A., Hansen, L. K., & Müller, K. R. (Eds.). (2019). *Explainable AI: interpreting, explaining and visualizing deep learning* (Vol. 11700). Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-28954-6>
15. Neyshabur, B., Bhojanapalli, S., McAllester, D., & Srebro, N. (2017). Exploring generalization in deep learning. *Advances in neural information processing systems*, 30. URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/hash/10ce03a1ed01077e3e289f3e53c72813-Abstract.html>
16. Szegedy, C., Zaremba, W., Sutskever, I., Bruna, J., Erhan, D., Goodfellow, I., & Fergus, R. (2013). Intriguing properties of neural networks. *arXiv preprint arXiv:1312.6199*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1312.6199>
17. Bach, F. (2017). Breaking the curse of dimensionality with convex neural networks. *Journal of Machine Learning Research*, 18(1), 629–681. URL: <https://jmlr.org/papers/v18/14-467.html>
18. Li, H., Xu, Z., Taylor, G., Studer, C., & Goldstein, T. (2018). Visualizing the loss landscape of neural nets. *Advances in neural information processing systems*, 31. URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2018/hash/a41b3bb3e6b050b6c9067c67f663b915-Abstract.html>
19. Zeng, L., Deng, Y., Wang, R., & Chen, X. (2024). Optimizing Cox Models with Stochastic Gradient Descent: Theoretical Foundations and Practical Guidances. *arXiv preprint arXiv:2408.02839*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.02839>

© Ледовская Екатерина Валерьевна (ekvaled@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ГОСУДАРСТВЕННЫХ КОМПАНИЙ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ ПРЕДИКТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ И BIG DATA ANALYTICS

DEVELOPMENT OF THE ARCHITECTURE OF AN INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM FOR STATE-OWNED COMPANIES BASED ON THE INTEGRATION OF PREDICTIVE MODELS AND BIG DATA ANALYTICS

**D. Mishin
S. Kurovsky
A. Trunkin**

Summary. This article highlights the relevance of automating data analysis and forecasting in large organizational and technical systems of state-owned companies. It addresses the scientific and technical challenge of designing the architecture of a software and analytical complex—an intelligent decision support system for state-owned companies based on the integration of predictive models and Big Data Analytics. It also examines the systemic integration of machine learning methods and big data processing platforms for automating predictive and analytical functions in state-level organizational and technical systems.

Keywords: intelligent system architecture; government agencies; decision support system; predictive model integration; big data analysis methods; automation of functions; forecasting.

Мишин Денис Александрович

Руководитель редакционно-издательского отдела
ООО «Высшая Школа Образования»
9651530@gmail.com

Куровский Станислав Валерьевич

Руководитель научно-исследовательского
подразделения ООО «Высшая Школа Образования»,
8917564@gmail.com

Трунькин Андрей Николаевич

Аспирант, РАНХиГС
andrei.trunkin@yandex.ru

Аннотация. В данной статье обозначена актуальность проблемы автоматизации анализа данных и прогнозирования в крупных организационно-технических системах государственных компаний, решается научно-техническая задача проектирования архитектуры программно-аналитического комплекса — интеллектуальной системы поддержки принятия решений для государственных компаний на основе интеграции предиктивных моделей и Big Data Analytics. Рассматриваются вопросы системной интеграции методов машинного обучения и платформ обработки больших данных для автоматизации прогнозно-аналитических функций в организационно-технических системах государственного уровня.

Ключевые слова: архитектура интеллектуальной системы, государственные компании, система поддержки принятия решений, интеграция предиктивных моделей, методы анализа больших данных, автоматизация функций, прогнозирование.

Введение

В контексте современной цифровой трансформации актуальность проблемы автоматизации анализа данных и прогнозирования в крупных организационно-технических системах государственных компаний обусловлена комплексом взаимосвязанных факторов технического, экономического и социального характера, а именно:

1. Государственные компании, функционирующие в таких сферах, как энергетика, транспорт, жилищно-коммунальное хозяйство, в процессе своей деятельности формирует значительные массивы структурированных и неструктурированных данных, используя системы телеметрии, SCADA-системы, IoT-устройства, клиентские приложения. При этом ручная обработка таких массивов ин-

формации становится технически и экономически нецелесообразной [5–7].

2. Современные производственные и инфраструктурные комплексы представляют собой сложные киберфизические системы с нелинейной динамикой параметров и значительным количеством концептуальных взаимосвязей между переменными [1]. Оперативное прогнозирование их состояния и предотвращение аварийных ситуаций при осуществлении производственно-технологических процессов предполагает практическое применение предиктивных моделей, основанных на методах машинного обучения и интеллектуального анализа данных.
3. Автоматизированные системы прогнозирования нагрузок, износа оборудования и киберугроз производственно-технологических систем позволяют

перейти от реактивного к проактивному управлению, минимизируя риски масштабных сбоев государственных информационных систем [8], [10].

4. Формализация и алгоритмизация процессов анализа данных обеспечивают объективную базу для долгосрочного планирования развития инфраструктуры и инвестиционных программ, минимизируя воздействие субъективного человеческого фактора [2–4].
5. Разработка и внедрение отечественных программно-аналитических комплексов для государственных компаний соответствует стратегическим задачам импортозамещения и обеспечения национальной безопасности, особенно это обладает крайне высокой значимостью в условиях усиления международного санкционного давления [9].

Научно-техническая задача проектирования архитектуры программно-аналитического комплекса формулируется как проблема синтеза автоматизированной системы управления (АСУ) технологическим процессом принятия решений на основе предиктивной аналитики и Big Data Analytics (BDA).

Пусть организационно-техническая система государственной компании представлена в виде выражения (1):

$$S = \langle X, U, Z, Y, F, G \rangle \quad (1)$$

где $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ — вектор состояния организационно-технической системы, описывающий ключевые технологические и операционные параметры (нагрузки, объемы, показатели оборудования);

$U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ — вектор управляющих воздействий (директивы по изменению режимов работы, планы ремонтов, распределение ресурсов);

$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_k\}$ — вектор внешних воздействий на организационно-техническую систему и входных данных из внешней среды (погодные условия, макроэкономические показатели, нормативные акты);

$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_i\}$ — вектор выходных наблюдаемых переменных (отчетные показатели эффективности, данные мониторинга организационно-технической системы);

$F : X * U * Z \rightarrow X$ — оператор переходов организационно-технической системы, описывающий ее динамику. В условиях неполной определенности F является стохастическим параметром и подлежит идентификации;

$G : X \rightarrow Y$ — оператор наблюдения.

Таким образом, интегральная научно-техническая задача заключается в создании киберфизической си-

стемы управления с прогнозирующей (предиктивной) моделью, где контур управления замыкается через блок предиктивной аналитики. Целесообразно обеспечить устойчивость, робастность и адаптивность всей государственной организационно-технической системы в условиях нестационарности объекта управления S , неполноты данных, а также существенных транспортных задержек в каналах сбора информации и управления процессами.

Цель работы — разработка архитектурного решения и методики интеграции предиктивных моделей и BDA-платформ в информационный контур государственной компании.

Для достижения поставленной цели в статье необходимо решить следующие задачи:

1. Представить требования к данным и вычислительным ресурсам предиктивных моделей (машинное обучение, анализ временных рядов) в контексте государственных информационных систем.
2. Привести результаты проектирования модульной архитектуры интеллектуальной системы.
3. Отразить аналитические расчёты оценки эффективности предлагаемого программно-инженерного решения.

Материалы и методы

Авторами статьи для рассмотрения требований к данным и вычислительным ресурсам предиктивных моделей (машинное обучение, анализ временных рядов) в контексте государственных информационных систем и осуществления проектирования модульной архитектуры интеллектуальной системы использовались методы индукции, дедукции, анализа статистических временных рядов, сопоставления, систематизации, системный подход, абстрактно-логический метод, метод графической и табличной визуализации данных, математического моделирования технологических процессов, программирования аналитических решений.

Требования к данным и вычислительным ресурсам предиктивных моделей (машинное обучение, анализ временных рядов) в контексте государственных информационных систем

Для предиктивных моделей в государственных информационных системах формируются особые требования к данным, обусловленные спецификой предметной области исследования, а именно:

- обеспечение пропускной способности телекоммуникационных каналов не менее 10–100 Гбит/с для стратегически значимых объектов ИТ-инфраструктуры;
- полнота информационных данных 99% и выше, достоверность 99,9 % и выше, актуальность ин-

формации (задержка данных не более 1–5 секунд в режиме реального времени работы государственных информационных систем);

- информационные ресурсы для обучения предиктивных моделей в контексте государственных информационных систем:

 - 1) память: 64–512 ГБ ОЗУ для обработки векторов размерностью 106–109 элементов;
 - 2) вычислительные мощности: кластеры из 8–256 узлов с производительностью 1–100 TFLOPS;
 - 3) специализированные ускорители: GPU с памятью 16–80 ГБ для глубокого обучения;

- требования к отказоустойчивости интеллектуальной системы государственных компаний: время восстановления после сбоя менее 1 минуты, обеспечение доступности 99,99% для цифровых сервисов, геораспределенность вычислительных ресурсов с репликацией текущего состояния.

Сравнительный анализ технологических стеков (Hadoop, Spark, специализированные СУБД) для построения отказоустойчивых BDA-платформ позволил выявить основу модульной архитектуры интеллектуальной системы поддержки принятия решений для государственных компаний:

- 1) хранилище данных гибридное с использованием HDFS для данных длительного хранения, SAP HANA — для данных кратковременного хранения;
- 2) обработка данных производится при помощи Spark Structured Streaming (для обработки информационных потоков), Spark MLlib (для предиктивного моделирования данных);
- 3) обслуживание организационно-технической системы осуществляется посредством колоночных СУБД, предназначенных для оперативной отчетности и визуализации данных;
- 4) практическое применение Kubernetes с Apache ZooKeeper для управления текущим состоянием

объектов ИТ-инфраструктуры организационно-технической системы.

Проектирование модульной архитектуры интеллектуальной системы

Архитектура модели информационных данных проектируется с учетом многообразия типов информационных источников и функциональных требований к временным характеристикам интеллектуальной платформы. Модель реализует принцип «озера данных» с последующей трансформацией массивов информации в тематические хранилища.

Конвейер обработки данных реализует гибридную ETL/ELT-архитектуру (рисунок 1).

Архитектура аналитического ядра интеллектуальной системы строится на принципах микросервисной организации и контейнеризации данных государственных компаний (рисунок 2).

Алгоритм управления вычислительными ресурсами реализует стратегию динамического масштабирования:

```
class ResourceManager:
    def scale_policy(self, metrics):
        cpu_util = metrics['cpu_utilization']
        memory_util = metrics['memory_utilization']
        inference_latency = metrics['p95_latency']

        if cpu_util > 80 or memory_util > 85:
            self.scale_out() # Увеличить количество реплик
        elif cpu_util < 30 and memory_util < 40:
            self.scale_in() # Уменьшить количество реплик

        if inference_latency > self.sla_threshold:
            self.allocate_gpu_resources() # Переключение на GPU
```

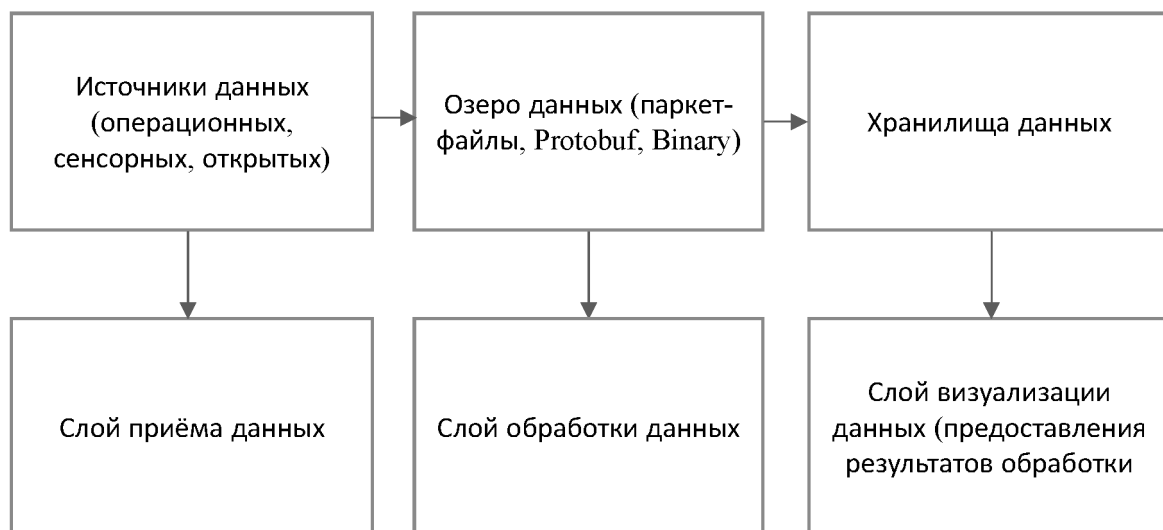


Рис. 1. ETL/ELT-архитектура конвейера обработки данных (источник: разработка авторов)



Рис. 2. Архитектура аналитического ядра интеллектуальной системы для государственных компаний (источник: разработка авторов)

Архитектура подсистемы прогнозной визуализации данных основана на принципе «единого источника истины»:

```
class PredictiveChart {
  renderConfidenceInterval(predictions) {
    const ctx = this.canvas.getContext('2d');

    // Отрисовка доверительного интервала
    ctx.fillStyle = 'rgba(135, 206, 250, 0.3)';
    ctx.fill(this.createConfidencePath(predictions));

    // Отрисовка основной линии прогноза
    ctx.strokeStyle = 'blue';
    ctx.lineWidth = 2;
    ctx.stroke(this.createPredictionPath(predictions));
  }
}
```

Приведенная модульная архитектура интеллектуальной системы поддержки принятия решений в государственных компаниях позволяет обеспечить крайне высокую степень автоматизации управления организационно-технологическими процессами, предоставляя ЛПР инструменты для эффективного анализа и принятия решений на основе инструментов и сервисов предиктивной аналитики.

Оценка эффективности предлагаемого программно-аналитического решения

Эффективность предлагаемого программно-аналитического решения оценивалась на основе тестирования сценария прогнозирования нагрузок на энергетическое оборудование, используемое в городском хозяйстве. Соответственно, исходными параметрами модели выступают:

- 1. Количество потребителей (N) ресурсов энергетического оборудования составляет 1000000 человек.
- 2. Период прогнозирования (T) составляет 24 часа.
- 3. Временной интервал (Δt) достигает 15 минут.

В таблице 1 приведены параметры тестирования нагрузки на энергетическое оборудование по трем сценариям (норма нагрузки, пик нагрузки, критический уровень нагрузки).

Таблица 1. Параметры тестирования нагрузки на энергетическое оборудование

Параметр	Норма нагрузки (сценарий № 1)	Пик нагрузки (сценарий № 2)	Критический уровень нагрузки (сценарий № 3)
Интенсивность запросов	100 RPS	500 RPS	1000 RPS
Размер памяти, ГБ	64	128	256
Количество фич	50	100	200
Длина временного ряда (количество точек)	168	336	672
Размер параллельных потоков	10	50	100

Источник: разработано авторами.

Сравнительный анализ результатов моделей прогнозирования нагрузки на энергетическое оборудование приведен в таблице 2.

Результаты тестирования отказоустойчивости интеллектуальной системы поддержки принятия решений отражены в таблице 3.

Таблица 2.

Сравнительный анализ результатов моделей прогнозирования нагрузки на энергетическое оборудование

Модель прогнозирования	MAPE, %	RMSE, МВт	Время обучения, ч	Время инференса, мс	Потребление памяти, ГБ
LSTM	2,1	15,3	12,5	45	8,2
Prophet	3,8	28,7	2,1	12	2,1
ARIMA	4,5	32,1	1,2	8	1,5
XGBoost	2,8	18,9	0,8	5	3,7
Ensemble	1,9	12,7	15,8	65	12,3

Источник: разработано авторами.

Таблица 3.

Результаты тестирования отказоустойчивости интеллектуальной системы поддержки принятия решений

Компонент интеллектуальной системы	MTBF, часов	Время восстановления, сек	Коэффициент готовности, %	Потери данных при сбое компонента интеллектуальной системы
Spark Cluster	720	45	99,998	0 ГБ памяти
Kafka Brokers	1440	30	99,999	Менее 10 сообщений
ML Serving	480	15	99,997	Отсутствуют
Feature Store	960	60	99,996	Отсутствуют
Monitoring	2160	120	99,994	Отсутствуют

Источник: разработано авторами.

В соответствии с полученными результатами моделирования нагрузок на энергетическое оборудование, используемое в городском хозяйстве, были сделаны следующие выводы:

1. Программно-аналитическое решение поддержки функционирования организационно-технических систем государственных компаний показывает линейное масштабирование производительности до 500 RPS с последующим насыщением параметров.
2. Ансамблевые модели прогнозирования нагрузки на энергетическое оборудование доминируют над остальными предиктивными алгоритмами примерно на 0,2–2,6 % по уровню точности итоговых результатов.

3. Гибридная архитектура интеллектуальной системы поддержки принятия решений для государственных компаний обеспечивает коэффициент готовности более 99,9 % при минимальном времени восстановления (не более 1 минуты).
4. Оптимальное соотношение уровня точности и сложности вычислительных ресурсов демонстрирует LSTM-модель прогнозирования нагрузок на энергетическое оборудование, используемое в городском хозяйстве.

Выводы

В рамках данного исследования были представлены требования к данным и вычислительным ресурсам предиктивных моделей (машинное обучение, анализ временных рядов) в контексте государственных информационных систем, в частности, требования к объёму и скорости формирования информационных данных, семантической целостности в организационно-технической системе, временным характеристикам интеллектуальной платформы, вычислительным ресурсам, отказоустойчивости.

Для государственных компаний предлагается гибридная архитектура программно-аналитического решения, которая обеспечит отказоустойчивость через геораспределённую репликацию данных, горизонтальную масштабируемость принятия решений, а также будет соответствовать нормативным требованиям к объектам системообразующей инфраструктуры.

Приведены результаты проектирования модульной архитектуры интеллектуальной системы.

Отражены аналитические расчёты оценки эффективности предлагаемого программно-инженерного решения.

Полученные результаты аналитических расчётов оценки эффективности интеллектуальной системы поддержки принятия решений в государственных компаниях подтвердили достаточно высокий уровень эффективности гибридной архитектуры программно-аналитического решения для задач автоматизации управления организационно-технологическими процессами по параметрам производительности, надёжности, точности, ресурсоемкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурый А.С., Ловцов Д.А. Архитектура экспертных рекомендательных систем принятия решений в формате умного города // Правовая информатика. — 2023. — № 3. — С. 41–53.
2. Искра Е.А., Панова В.Л. Проектирование интегрированной информационной архитектуры в системе поддержки принятия решений предприятия // Новое в экономической кибернетике. — 2025. — № 1. — С. 98–113.
3. Кетоева Н.Л., Знаменская М.А., Павлов Е.М., Прошкин Н.Е. Моделирование и разработка программы для интеллектуальной системы поддержки принятия кадровых управленческих решений в электроэнергетике // Инженерный вестник Дона. — 2024. — № 5 (113). — С. 58.
4. Косоруков А.А. Перспективные технологические решения в сфере построения нейрорцифрового государственного управления // Социодинамика. — 2021. — № 6. — С. 53–66.
5. Куровский С.В., Козлова О.Л., Дейнеко М.Д. От математической модели к практике: программно-инженерная концепция метода искусственного интеллекта для коммерческой организации // Экономика строительства. — 2025. — № 7. — С. 721–724.
6. Куровский С.В., Мишин Д.А., Халилулин Р.М. Применение методов анализа больших данных в цивилистических науках: алгоритмическое прогнозирование тенденций частного права на основе судебной практики // Закон и власть. — 2025. — № 8. — С. 101–106.
7. Куровский С.В., Мишин Д.А., Павлов Д.Г. Интеграция SCADA-систем в программы профессиональной подготовки операторов магистральных нефтегазовых трубопроводов // Современное профессиональное образование. — 2025. — № 8. — С. 100–105.
8. Никифоров А.А., Гармышев Д.Е., Важенин И.А., Левченко Н.Г. Разработка архитектуры интеллектуальной информационной системы разработки и анализа данных документации с поддержкой принятия решения // Транспортное дело России. — 2021. — № 2. — С. 96–100.
9. Тюкавкин Н.М., Романова А.А. Направления развития информационно-методического обеспечения предприятий промышленного комплекса на базе единой цифровой платформы РФ «Гостех» // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. — 2024. — Т. 12. — № 2. — С. 129–139.
10. Чурсин А.А., Богинский А.И., Должиков Д.С., Назюта С.В. Разработка теоретических и практических аспектов усовершенствования систем поддержки принятия решений для устойчивого развития высокотехнологичных организаций // Креативная экономика. — 2024. — Т. 18. — № 2. — С. 357–372.

© Мишин Денис Александрович (9651530@gmail.com); Куровский Станислав Валерьевич (8917564@gmail.com);

Трунькин Андрей Николаевич (andrei.trunkin@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИТ-ИНФРАСТРУКТУРОЙ ХОЛДИНГОВЫХ КОМПАНИЙ

MODEL AND METHODOLOGY OF INTERACTION FOR THE IT-INFRASTRUCTURE MANAGEMENT SYSTEM OF HOLDING COMPANIES

**F. Nevolin
O. Romashkova**

Summary. The article addresses the challenge of improving the efficiency of managing complex, distributed IT infrastructure in holding companies. The relevance of the solution is driven by communication gaps, misalignment between development strategy and IT infrastructure, and the lack of a unified decision support system. The aim of the work is the development and practical implementation of a functional model and adaptive algorithms for an intellectual decision support system (DSS). Based on the analysis of the subject area using IDEF0, IDEF3, UML, and BPMN methodologies, business processes for the interaction between the technical support service and users were modeled. A relational data model, which serves as the foundation for the system, was designed and normalized to the third normal form. The JIRA Service Desk system was selected and adapted as the software platform for the DSS implementation. A modular system architecture supporting strategic, tactical, and operational management levels was developed. Adaptive algorithms for request processing and resource balancing are proposed. The result of the work is a functioning digital platform implemented in the holding company. The economic assessment showed high implementation efficiency: the annual economic effect amounted to 494,5 thousand rubles with a payback period of 0,36 years (about 4 months). The system implementation reduced incident response time by 25 %, increased the accuracy of resource planning, and improved user satisfaction.

Keywords: IT infrastructure, holding company, intelligent decision support system (DSS), functional model, business processes, relational database, JIRA Service Desk, adaptive algorithms, economic efficiency.

Неволин Филипп Дмитриевич

Аспирант, ГАОУ ВО «Московский городской педагогический университет (МГПУ)»
fnevolin@mail.ru

Ромашкова Оксана Николаевна

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

Аннотация. В статье рассматривается задача повышения эффективности управления сложной, распределенной ИТ-инфраструктурой холдинговых компаний. Актуальность решения обусловлена наличием коммуникационных разрывов, несоответствием стратегии развития и ИТ-инфраструктуры, а также отсутствием единой системы поддержки принятия управленческих решений. Целью работы является разработка и практическая реализация функциональной модели и адаптивных алгоритмов для системы интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений (СИППУР). На основе анализа предметной области с использованием методологий IDEF0, IDEF3, UML и BPMN выполнено моделирование бизнес-процессов взаимодействия службы технической поддержки с пользователями. Спроектирована и нормализована до третьей нормальной формы реляционная модель данных, являющаяся основой для системы. В качестве программной платформы для реализации СИППУР выбрана и адаптирована система JIRA Service Desk. Разработана модульная архитектура системы, поддерживающая стратегический, тактический и операционный уровни управления. Предложены адаптивные алгоритмы обработки заявок и балансировки ресурсов. Результатом работы является функционирующая цифровая платформа, внедренная в холдинговой компании. Экономическая оценка показала высокую эффективность внедрения: годовой экономический эффект составил 494,5 тыс. рублей при сроке окупаемости 0,36 года (около 4 месяцев). Внедрение системы позволило сократить время реакции на инциденты на 25 %, повысить точность ресурсного планирования и улучшить удовлетворенность пользователей.

Ключевые слова: ИТ-инфраструктура, холдинг, система интеллектуальной поддержки принятия решений (СИППУР), функциональная модель, бизнес-процессы, реляционная база данных, JIRA Service Desk, адаптивные алгоритмы, экономическая эффективность.

Введение

В условиях цифровой трансформации эффективное управление ИТ-инфраструктурой становится критическим фактором конкурентоспособности для холдинговых компаний. Сложность управления обусловлена многоуровневой иерархией, географической рассредоточенностью подразделений и разнородностью бизнес-процессов.

Проблема заключается в отсутствии готовых систем, обеспечивающих сквозную поддержку управленческих решений на всех уровнях — от операционного устранения инцидентов до стратегического планирования развития ИТ-инфраструктуры с учетом специфики холдингов.

Целью исследования является разработка архитектуры, ключевых алгоритмов и практическая реализация СИППУР для управления ИТ-инфраструктурой холдинга с последующей экспериментальной оценкой экономической эффективности ее внедрения.

Задачи исследования:

- 1. Разработать модульную архитектуру СИППУР, интегрирующую уровни стратегического, тактического и операционного управления.
- 2. Создать адаптивные алгоритмы поддержки принятия решений, в частности, алгоритм балансировки мощностей и алгоритм маршрутизации заявок.
- 3. Реализовать функционирующий прототип системы на базе платформы JIRA Service Desk.

- 4. Произвести экспериментальную апробацию системы в реальных условиях и оценить ее операционную и экономическую эффективность.

Описание решения

1. Архитектура системы

На основе анализа требований, сформулированных на этапе моделирования [1], предложена трехуровневая архитектура СИППУР, представленная на рисунке 1.

- Операционный уровень включает модуль регистрации и обработки заявок. Его функция — автоматизация рутинных операций: регистрация инцидентов, первичная классификация, назначение исполнителей и контроль сроков согласно SLA.
- Тактический уровень представлен модулем аналитики и мониторинга. Он агрегирует данные с операционного уровня, формирует отчеты о загрузке ресурсов, качестве обслуживания (KPI) и выявляет тенденции.
- Стратегический уровень содержит модуль прогнозирования и поддержки стратегических решений. На основе данных тактического уровня и внешних факторов (планы развития бизнеса) данный модуль предоставляет рекомендации по планированию мощностей, оптимизации бюджета и развитию ИТ-инфраструктуры.

Все уровни интегрированы в единую платформу, что обеспечивает согласованность данных и решений.



Рис. 1. Схема работы СИППУР в холдинге

2. Разработка адаптивных алгоритмов

Для реализации интеллектуальных функций системы разработаны два ключевых алгоритма.

Алгоритм 1. Адаптивная балансировка вычислительных мощностей на основе нечеткой логики.

Для оперативного реагирования на сбои и инциденты был разработан алгоритм автоматического перераспределения вычислительных мощностей на основе нечеткой логики [2]. Алгоритм создан для поддержки принятия решений в условиях неопределенности, характерной для распределенной ИТ-инфраструктуры [3].

Алгоритм предназначен для предотвращения перегрузок серверов. Входными параметрами являются: текущая загрузка CPU/RAM, приоритет выполняемых задач, доступность резервных мощностей. На основе базы нечетких правил вида «ЕСЛИ загрузка CPU высокая И приоритет задачи критический, ТО увеличить мощность на резервном сервере» система формирует управляющие воздействия. Использование нечеткой логики позволяет эффективно работать в условиях неполноты и неопределенности исходных данных [4].

Алгоритм 2. Интеллектуальная маршрутизация и классификация заявок.

Алгоритм анализирует текст входящей заявки, извлекает ключевые слова и сопоставляет их с базой известных проблем и компетенций исполнителей. На выходе алгоритм определяет категорию заявки, назначает приоритет и автоматически направляет ее наиболее подходящему исполнителю или группе поддержки, сокращая время на ручную диспетчеризацию.

Алгоритм учитывает срочность выполнения заявки, время выполнения и группы исполнителей, закрепленные за определенными типами проблем. Особенностью алгоритма является использование экспертных правил [5, 6], например, соотнесение статуса заявки с расположением начальника отдела технической поддержки (ТП) для подтверждения правильности назначения.

3. Реализация системы

Для практической реализации выбран продукт JIRA Service Desk, как обладающий необходимой гибкостью и функциональностью для построения СИППУР. На его основе реализованы:

- Настраиваемые workflow, отражающие формализованные бизнес-процессы.
- Ролевая модель с дифференцированным доступом (диспетчер, инженер, руководитель).

- Автоматические правила назначения и эскалации заявок, реализующие разработанные алгоритмы.
- Набор дашбордов для визуализации KPI на тактическом и стратегическом уровнях.

В JIRA Service Desk для работы с запросами клиентов задействованы лицензированные пользователи, такие как администраторы проектов, члены команды технической поддержки, другие сотрудники и подрядчики. Последние отслеживают и решают запросы клиентов, а также участвуют в формировании соглашений об уровне обслуживания (SLA) своей команды и решении проблем в рамках рабочих процессов.

Для получения поддержки клиенты могут отправлять запросы через клиентский портал службы поддержки или адрес электронной почты. Нелицензированные пользователи могут бесплатно общаться с агентами службы поддержки и читать статьи базы знаний. Количество клиентов не ограничено, и они могут отправлять неограниченное количество запросов. Лицензированные пользователи, такие как администраторы проектов и члены команды технической поддержки, работают с запросами клиентов в экземпляре JIRA Service Desk. Они отслеживают и разрешают запросы клиентов, решают возникшие проблемы и участвуют в формировании соглашений об уровне обслуживания своей команды. Использование JIRA Service Desk и Atlassian Confluence может значительно повысить эффективность и производительность команды технической поддержки, улучшить уровень обслуживания клиентов и ускорить процесс разрешения проблем. Основным инструментом разработки в ней является дерево конфигурации [7].

Для повышения производительности работы отдела технической поддержки в одной из компаний была создана инновационная методика взаимодействия ИТ-специалистов с пользователем, основанная на применении цифровой платформы. Это позволит повысить эффективность процесса работы и коммуникации между сотрудниками и клиентами. Будут использованы самые современные методы для удовлетворения требований пользователей и обеспечения устойчивого роста и успеха компании на рынке информационных технологий.

Методика включает в себя этапы работы с СИППУР Администратора и Техника СИППУР, которые представлены на рисунке 2.

Этапы работы инженера ТП и диспетчера 1 линии представлены на рисунке 3.

Этапы работы начальника ТП представлены на рисунке 4.

Созданная модель базы данных является основой для разработки в Jira SD для развития процесса взаимодействия ИТ-специалистов с пользователями в информационно-технологической компании.

1. Вход в ЦП с правами администратора ЦП	<ul style="list-style-type: none"> Запуск платформы «Jira Service Desk»; Выбор информационной базы; Выбор пользователя с правами администратора ЦП.
2. Добавление техника ОТОМР для работы с ресурсами ЦП	<ul style="list-style-type: none"> Добавление пользователей с ролью техника; Проверка работоспособности новых учетных записей.
3. Выход из ЦП	
4. Вход в ЦП с правами техника ЦП	<ul style="list-style-type: none"> Запуск платформы «Jira Service Desk»; Выбор информационной базы; Выбор пользователя с правами техника ОТОМР ЦП.
5. Ввод информации по ремонтам для организации процесса РПК СОП	<ul style="list-style-type: none"> Заполнение отчета: модель оборудования, дата ремонта, необходимые комплектующие, детали для заказа, компания для осуществления ремонта, цена. Заполнение писем для согласования: Группа, Программа курсов, Места занятий, Курсы РПК, Авторы курсов, Уровни сложности, Уровни подготовки
6. Разработка отчетов по организации процесса ЦП ИТК	<ul style="list-style-type: none"> Заполнение документов: подтвержденное согласование ремонта оборудования
7. Выход из ЦП	

Рис. 2. Этапы работы с СИПТР Администратора и Техника СИПТР

8. Вход в ЦП с правами инженера ТП	<ul style="list-style-type: none"> Работа с заявителями; Сортировка поступивших заявок; Выбор исполнителя из списка; Отчетность по трудозатратам.
9. Учет заявок в ЦП ИТК «Softline Solutions»	<ul style="list-style-type: none"> Отслеживание эффективности работы каждого исполнителя; Фильтр по заявкам; Подключение работы диспетчеров 1 линии.
10. Выполнение заявок	<ul style="list-style-type: none"> Консультация пользователя; Удаленная/физическая настройка ПО; Устранение багов, ошибок ПО; Замена оборудования по заявкам; Тестирование исправленного ПО и оборудования.
11. Выход из ЦП	
12. Вход в ЦП с правами диспетчера 1 линии	<ul style="list-style-type: none"> Запуск платформы «Jira Service Desk»; Выбор информационной базы; Выбор пользователя с правами диспетчера 1 линии ЦП.
13. Учет заявок в ЦП ИТК «Softline Solutions»	<ul style="list-style-type: none"> Запуск платформы «1С: Предприятие 8.3»; Выбор информационной базы; Выбор пользователя с правами слушателя курса СОП.
14. Подготовить отчеты в ЦП ИТК «Softline Solutions»	<ul style="list-style-type: none"> Выбор модуля УМК для курсов по РПК СОП; Изучение учебных материалов; Выполнить задания блока «Контроль».
15. Выход из ЦП	

Рис. 3. Этапы работы инженера ТП и диспетчера 1 линии

Результаты реализации или оценка эффекта использования

Апробация системы проводилась в течение трех месяцев в холдинге «Softline Solutions». Для оценки эффективности использовалось А/В-тестирование и сравнение ключевых метрик до и после внедрения.

Операционные результаты

- Время реакции на инциденты снизилось на 25 % (со 180 до 135 секунд).

- Точность прогнозирования пиковых нагрузок на ИТ-ресурсы, обеспечиваемая алгоритмами системы, достигла 92,7 % (средняя абсолютная ошибка MAE=7,3 %).
- Количество перегрузок серверов сократилось на 28 % за счет работы алгоритма адаптивной балансировки.
- Индекс удовлетворенности пользователей (NPS) вырос с 75 до 89 пунктов.

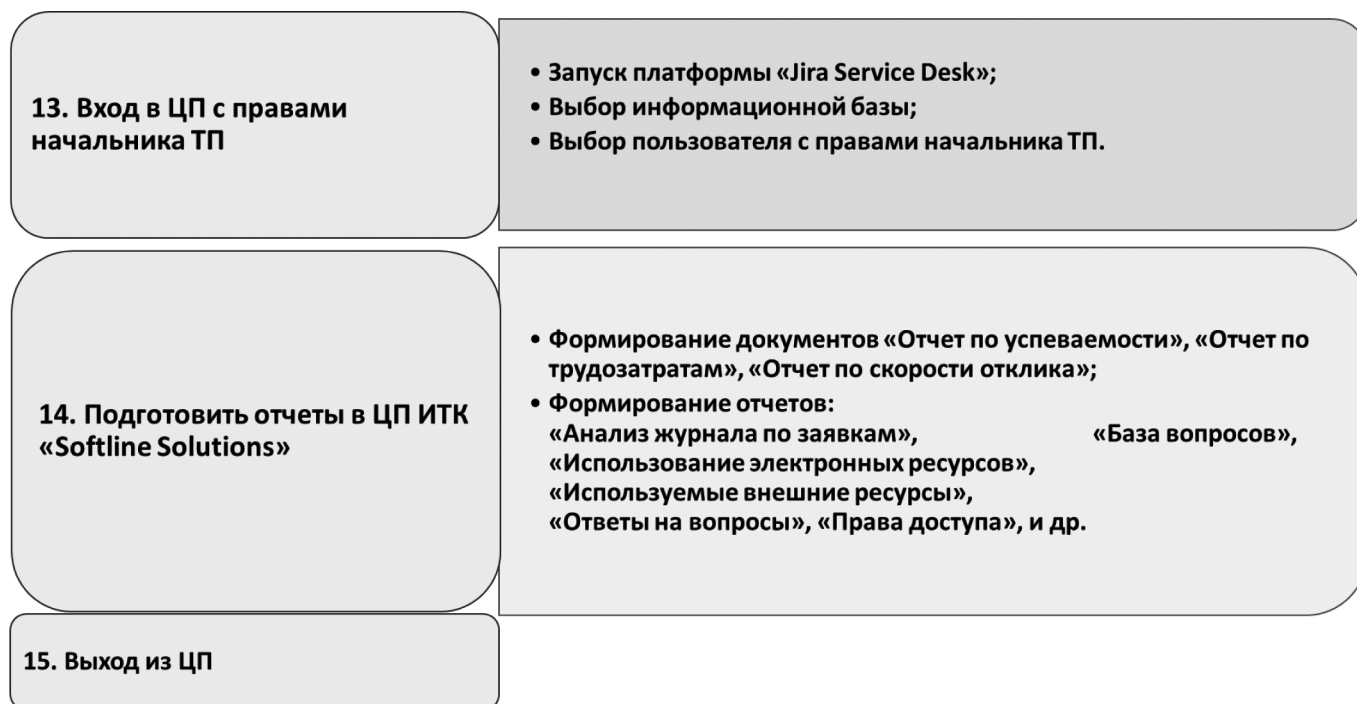


Рис. 4. Этапы работы начальника ТП

Экономическая оценка

Расчет экономической эффективности проводился путем сопоставления затрат на разработку и внедрение системы с полученным годовым экономическим эффектом.

Затраты на разработку и внедрение СИППУР: 131 624,5 руб.

Затраты на оплату труда разработчика СИППУР (специалиста)

$$C_{\text{тр}} = Z_{\text{пр}} \cdot T_{\text{рс}} \quad (1)$$

где $Z_{\text{пр}}$ — зарплата работника за час;

$T_{\text{рс}}$ — время разработки системы.

Заработная плата разработчика за час определяется по следующей формуле

$$Z_{\text{пр}} = \frac{C_{\text{пр}}}{\Phi_{\text{вр}}} \quad (2)$$

где $C_{\text{пр}}$ — ставка разработчика СИППУР, руб.:

$\Phi_{\text{вр}}$ — фонд рабочего времени в месяц, ч.

$$Z_{\text{пр}} = \frac{65000}{176} = 369,31 = 369,31 \text{ руб.}$$

Затраты на оплату труда разработчика СИППУР составили

$$C_{\text{тр}} = 369,31 \cdot 350 = 129258,5 \text{ руб.}$$

Себестоимость системы можно вычислить по формуле

$$C_c = C_{\text{м/ч}} \cdot T_{\text{рс}} + C_{\text{тр}} \quad (3)$$

где $C_{\text{м/ч}}$ — стоимость машинного часа работы, руб.;

$T_{\text{рс}}$ — время разработки системы;

$C_{\text{тр}}$ — затраты на оплату труда разработчика системы.

$$C_c = 6,76 \cdot 350 + 129258,5 = 131624,5 \text{ руб.}$$

Годовой экономический эффект: 494 501,36 руб.

Экономический эффект от внедрения данного СИППУРа составляет

$$\Delta = 894465,6 - 399964,24 = 494501,36 \text{ руб./год.}$$

Срок окупаемости: 0,36 года (около 4,3 месяца).

$$T_{\text{ср}} = \frac{50000 + 131624,5}{494501,36} = 0,36 \text{ года.}$$

Коэффициент экономической эффективности: 2,77.

Определим экономическую эффективность от вложенных средств

$$\Delta_{\Phi} = \frac{1}{T_{\text{ср}}} \quad (4)$$

$$\Delta_{\Phi} = \frac{1}{0,36} = 2,77.$$

На основе полученных значений можно сделать вывод, что разработанная система окупится за 4 месяца.

Основными источниками экономии стали сокращение времени простоя из-за инцидентов, минимизация трудозатрат сотрудников ИТ-поддержки и предотвращение расходов на несвоевременное масштабирование инфраструктуры [8].

Заключение

В результате проведенного исследования была разработана, реализована и апробирована система интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений для управления ИТ-инфраструктурой холдинга.

Предложена и реализована трехуровневая архитектура СИППУР, обеспечивающая интеграцию операционной деятельности, тактического анализа и стратегического планирования [9]. Разработаны и внедрены адаптивные алгоритмы балансировки нагрузок и интеллектуальной маршрутизации заявок, показавшие высокую эффективность в условиях реальной эксплуатации.

Практическая реализация на платформе JIRA Service Desk [10] подтвердила возможность построения гибкой и мощной СИППУР на базе адаптируемого рыночного решения. Экспериментальная апробация доказала значительный операционный и экономический эффект от внедрения системы, выражающийся в сокращении времени реакции, повышении точности планирования и быстрой окупаемости инвестиций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неволин Ф.Д., Ромашкова О.Н., Веремейчук Г.С., Чискидов С.В. Информационные системы интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений при построении и развитии ИТ-инфраструктуры холдинговых компаний // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2025. № 2-2. С. 123–127.
2. Юсупова Н.И., Сметанина О.Н., Агадуллина А.И., Рассадникова Е.Ю. // Вопросы моделирования при организации информационной интеллектуальной поддержки управленческих решений в сложных системах. Фундаментальные исследования. 2017. № 2. С. 107–113.
3. Ромашкова О.Н., Ломовцев Р.С., Пономарева Л.А. Компьютерная поддержка принятия управленческих решений для образовательной системы регионального уровня // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. — 2019. — № 67. — С. 50–58.
4. Бессмертный И.А., Нугуманова А.Б., Платонов А.В. Интеллектуальные системы: учебник и практикум для вузов. — Москва: Издательство Юрайт, 2021. — 236–242 с.
5. Павличева Е.Н., Ромашкова О.Н. Информационные процессы поддержки принятия решений в многоуровневых образовательных системах /Москва, 2022.
6. Пономарева К.А. Тенденции развития интеллектуальных систем поддержки принятия решений // Наука без границ. 2020. № 5 (45). С. 107–111.
7. 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.
8. Заболотникова В.С., Ромашкова О.Н. Анализ методов кластеризации для эффективного управления процессами в налоговой службе // Фундаментальные исследования. 2017. № 9-2. С. 303–307.
9. 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.
10. Кизим А.В. Модели и методы интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении процессом технического обслуживания, ремонта и модернизации промышленного оборудования // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». 2021.

© Неволин Филипп Дмитриевич (fnevolin@mail.ru); Ромашкова Оксана Николаевна (ox-rom@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВЛИЯНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ

THE INFLUENCE OF CRITICAL EFFECTS ON ACOUSTIC WAVE PROPAGATION IN TWO-PHASE SYSTEMS

**M. Palvanov
L. Uvarova**

Summary. The paper investigates acoustic wave propagation in two-phase gas-liquid systems considering critical effects near the critical point. A mathematical model is developed that incorporates power-law (critical) dependencies of thermodynamic parameters and transport coefficients typical for simple fluids belonging to the 3D Ising universality class. A dispersion relation connecting wave number and frequency with thermodynamic state is obtained. Significant decrease in sound velocity and sharp increase in attenuation near the critical point are shown. Shift of maximum attenuation to low-frequency region is established. A numerical algorithm with adaptive time step is proposed.

Keywords: acoustic waves, two-phase systems, critical effects, mathematical modeling, sound attenuation, bulk viscosity.

Палванов Мурод Равшанович

Аспирант, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
m.palvanov@stankin.ru

Уварова Людмила Александровна

Доктор ф.-м. наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
uvar11@yandex.ru

Аннотация. В работе исследуется распространение акустических волн в двухфазных газо-жидкостных системах с учетом критических эффектов при приближении к критической точке. Разработана математическая модель, учитывающая степенные (критические) зависимости термодинамических параметров и коэффициентов переноса, характерные для простых жидкостей (трехмерный класс универсальности Изинга). Получено дисперсионное соотношение, связывающее волновое число и частоту с термодинамическим состоянием. Показано существенное снижение скорости звука и резкое увеличение затухания вблизи критической точки. Установлено смещение максимума затухания в низкочастотную область. Предложен численный алгоритм с адаптивным временным шагом.

Ключевые слова: акустические волны, двухфазные системы, критические эффекты, математическое моделирование, затухание звука, объемная вязкость.

Введение

Распространение акустических волн в двухфазных газо-жидкостных системах представляет интерес для ультразвуковой диагностики многофазных потоков и мониторинга технологических процессов. Вблизи критической точки наблюдается резкий рост флуктуаций плотности, приводящий к степенным изменениям термодинамических свойств жидкости. Эти зависимости подчиняются универсальным законам (критические степенные зависимости), общим для простых жидкостей, относящихся к трёхмерному классу универсальности Изинга [1,2]. Исследования показывают существенное влияние на скорость звука и затухание [3].

Работы по акустике вязкоупругих жидкостей с газовыми пузырьками [4,5] и исследования отражения акустических волн [6] вносят вклад в понимание механизмов затухания. Экспериментальные исследования [7–9] демонстрируют сложную зависимость акустических ха-

рактеристик от термодинамических параметров. Обзор транспортных явлений вблизи критической точки [10] подтверждает важность учета критических эффектов.

Однако существующие модели не учитывают критические эффекты в полной мере, что ограничивает их применимость в околоскритических условиях.

Цель исследования: разработка математической модели распространения акустических волн в двухфазной системе с учетом критических зависимостей степенного типа и анализ влияния критических эффектов на характеристики распространения звука.

Научная новизна

1. Включены критические зависимости степенного типа $c_p(T)$, $\kappa_T(T)$, $\lambda(T)$ и $\zeta(T)$ в двухфазную акустическую модель, получено дисперсионное соотношение для околоскритической области.

2. Проведено параметрическое исследование для $T / T_c \in [0.9, 1.1]$, $\alpha \in [10^{-5}, 10^{-2}]$, $f \in [1 \text{ кГц}, 1 \text{ МГц}]$
3. Показана доминирующая роль объемной вязкости ζ в околокритической области.
4. Разработан численный алгоритм с адаптивным шагом для расчетов при резких градиентах параметров.

Математическая модель

Рассматривается одномерное распространение акустических возмущений в системе жидкость и газовые пузырьки радиуса R (м) при малой объемной концентрации $\alpha \ll 1$ (безразм.).

Система уравнений. Неразрывность:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial x} = 0,$$

где $\rho = \alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_l \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right)$ — средняя плотность, $v \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$ — скорость.

Импульс:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{4}{3} \mu + \zeta \right) \frac{\partial v}{\partial x} \right],$$

где p (Па) — давление, μ (Па·с) — сдвиговая вязкость, ζ (Па·с) — объемная вязкость.

Энергия:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \alpha_p T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \Phi + Q_{gl},$$

где c_p (Дж/(кг·К)) — удельная изобарная теплоемкость, T (К) — температура, λ (Вт/(м·К)) — теплопроводность, α_p (К⁻¹) — коэффициент объемного теплового расширения, Φ — диссипация, Q_{gl} (Вт/м³) — межфазный теплообмен с коэффициентом $h = Nu \cdot \frac{\lambda_l}{R}$ (Вт/м²·К).

Степенные (критические) зависимости для $\tau = \frac{|T - T_c|}{T_c} \lesssim 10^{-2} - 10^{-1}$:

$$\kappa_T = \kappa_{T0} \tau^{-a_\kappa}, c_p = c_{p0} \tau^{-a_{cp}}, \lambda = \lambda_0 \tau^{-a_\lambda}, \zeta = \zeta_0 \tau^{-a_\zeta},$$

где κ_T (Па⁻¹) — изотермическая сжимаемость. Численные значения экспонент берутся из экспериментальных и справочных данных для конкретного флюида (вода)

и могут отличаться от универсальных индексов критической феноменологии; в расчетах выполнен чувствительный анализ по a . Для воды: $a_\kappa \approx 1.24$, $a_{cp} \approx 0.11$, $a_\lambda \approx 0.63$, $a_\zeta \approx 0.67$ [10].

Дисперсионное соотношение

Линеаризация системы относительно малых возмущений $p = p_0 + p'$ и подстановка $p' = P \exp[i(kx - \omega t)]$ дает обобщенное соотношение Кирхгофа-Стокса:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c_0^2} \left[1 + i \omega \left(\frac{\frac{4}{3} \mu + \zeta}{\rho c_0^2} + \frac{\gamma - 1}{\rho c_p c_0^2} \lambda \right) \right] + A_{\text{relax}}(\omega),$$

где c_0 (м/с) — скорость звука, γ (безразм.) — эффективный показатель адиабаты смеси, A_{relax} (безразм.) — вклад межфазной релаксации. В околокритической жидкости $\gamma \rightarrow 1$, поэтому вклад теплопроводности ослабевает относительно объемной вязкости ζ .

Отсюда коэффициент затухания:

$$\alpha_{\text{att}} = \frac{\omega^2}{2 \rho c_0^3} \left[\frac{4}{3} \mu + \zeta + (\gamma - 1) \frac{\lambda}{c_p} \right].$$

Скорость звука определяется соотношением Вуда при условиях:

- (i) $\alpha \ll 1$;
- (ii) $\omega \tau_T \ll 1$;
- (iii) малое скольжение фаз;
- (iv) $\lambda_{\text{ac}} \gg R$ (длина акустической волны $\gg R$:

$$\frac{1}{\rho c_0^2} = \frac{\alpha}{\rho_g c_g^2} + \frac{1 - \alpha}{\rho_l c_l^2}, c_l^2 = \frac{1}{\rho_l \kappa_T}.$$

Рост $\kappa_T \sim \tau^{-1.24}$ приводит к снижению c_0 при $\tau \rightarrow 0$.

Релаксационные времена:

$$\tau_T \sim \frac{R^2}{\alpha_{\text{th}}}, \alpha_{\text{th}} = \frac{\lambda_l}{\rho_l c_{p,l}} (\text{м}^2/\text{с}),$$

где τ_T (с) — время тепловой релаксации. Максимум затухания при $\omega \tau_T \sim 1$ дает $f_{\text{max}} \sim \frac{1}{2\pi \tau_T}$ (Гц).

Обозначения: α — объемная концентрация газовой фазы (безразм.), α_p — коэффициент объемного теплового расширения (К⁻¹), κ_T — изотермическая сжимаемость (Па⁻¹), μ — динамическая сдвиговая вязкость (Па·с), ζ — объемная вязкость (Па·с), λ — теплопроводность (Вт/(м·К)), c_p — удельная изобарная теплоемкость (Дж/(кг·К)), γ — эффективный показатель адиабаты смеси (безразм.), λ_{ac} — длина акустической волны (м).

Таблица 1.

Номинальные параметры модели (вода, околокритика)

Параметр	Значение	Единица
T_c	647	К
p_0	0.1	МПа
p_c	22.1	МПа
R	100	мкм
α	$10^{-5} - 10^{-2}$	безразм.
a_k	1.24	безразм.
a_{cp}	0.11	безразм.
a_λ	0.63	безразм.
a_ζ	0.67	безразм.
Nu	2–10	безразм.

Примечание: параметры α , γ , τ , a , Nu являются безразмерными и определяются как отношения однотипных физических величин.

Численный метод

Применяется конечно-разностная схема второго порядка $O(\Delta t^2 + \Delta x^2)$ на сетке $x \in [0, L]$ с шагом Δx (м):

$$\frac{p_i^{n+1} - 2p_i^n + p_i^{n-1}}{\Delta t^2} = c_0^2(T_i^n) \frac{p_{i+1}^n - 2p_i^n + p_{i-1}^n}{\Delta x^2} - \Gamma(T_i^n) \frac{p_i^n - p_i^{n-1}}{\Delta t},$$

где $\Gamma(T_i^n)$ (c^{-1}) — коэффициент диссипации, учитывающий частотно-зависимые потери энергии, аппроксимированные методом Прони–Усталу (Prony–Oustaloup). На границах области применяются поглощающие граничные условия первого порядка по Хигдону (Higdon), предотвращающие отражение акустических волн.

Условие устойчивости: адаптивный шаг

$$\Delta t \leq 0.9 \cdot \frac{\Delta x}{\max_i [c_0(T_i^n)]}.$$

Верификация на предельных случаях: однофазная среда ($\alpha \rightarrow 0$) и низкочастотный предел ($\omega \rightarrow 0$) показывают сходимость $O(\Delta x^2)$.

Результаты и обсуждение

Влияние температуры. При $\tau = 0.01$ ($T / T_c = 0.99$) скорость фазового распространения c_{ph} составляет около 60 % от значения при $\tau = 0.10$, тогда как коэффициент затухания возрастает в 8–12 раз. Это связано с ростом изотермической сжимаемости $\kappa_T \sim \tau^{-1.24}$ и объемной

вязкости $\zeta \sim \tau^{-0.67}$ при приближении к критической точке. Отношение ζ / μ достигает 50–100 в околокритической области, что подтверждает доминирующую роль объемной вязкости в энергетических потерях акустической волны.

Влияние концентрации. При увеличении объемной доли газовой фазы от $\alpha = 10^{-5}$ до $\alpha = 10^{-2}$ фазовая скорость уменьшается до 30–40 % от исходного значения, а затухание возрастает в 3–4 раза (при $\tau = 0.02$). Это объясняется ростом эффективной сжимаемости и дополнительным вкладом межфазной релаксации.

Частотная дисперсия. Максимум затухания смещается в область низких частот по мере приближения к критической точке: при $\tau = 0.10$ — $f_{\max} \approx 500$ кГц, при $\tau = 0.01$ — $f_{\max} \approx 80$ кГц. Такое смещение соответствует условию $\omega \tau_T \sim 1$, где τ_T — характерное время тепловой релаксации.

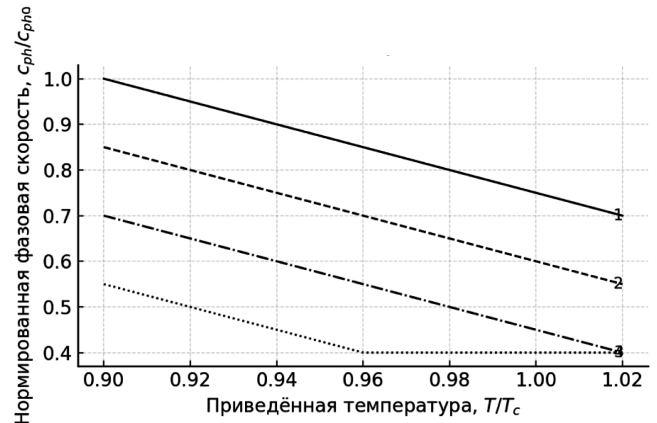


Рис. 1. Зависимость нормированной фазовой скорости c_{ph} / c_{ph0} от приведенной температуры T / T_c при различных объемных концентрациях газовой фазы. Номера кривых 1–4 соответствуют значениям $\alpha = 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}$ (схематично)

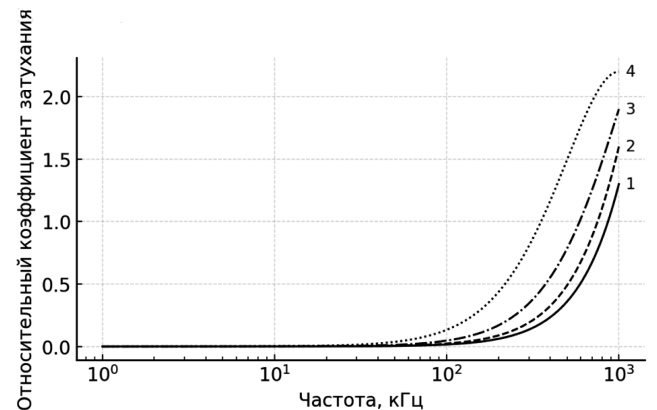


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента затухания при различных приведенных температурах τ . Номера кривых 1–4 соответствуют значениям $\tau = 0.10, 0.05, 0.02, 0.01$ ($T / T_c = 0.90, 0.95, 0.98, 0.99$) (схематично)

Результаты согласуются с экспериментами [7] и подтверждают доминирующее влияние объемной вязкости ζ в критической области. Полученное дисперсионное соотношение обобщает классические модели и может использоваться для акустической диагностики термодинамического состояния двухфазных систем.

В настоящей работе рассмотрена монодисперсная газовая фаза при малой объемной концентрации ($\alpha \ll 1$) и пренебрежении скольжением фаз. В дальнейшем предполагается расширение модели на случай полидисперсного распределения пузырьков, учет нелинейных эффектов и переход к трехмерной постановке задачи.

Заключение

Разработана математическая модель распространения акустических волн в двухфазной системе с учётом

степенных (критических) зависимостей термодинамических и транспортных параметров: $\kappa_T \sim \tau^{-1.24}$, $c_p \sim \tau^{-0.11}$, $\lambda \sim \tau^{-0.63}$, $\zeta \sim \tau^{-0.67}$, характерных для простых жидкостей, относящихся к трехмерному универсальному классу Изинга. Получено обобщённое дисперсионное соотношение Кирхгофа–Стокса с учётом объемной вязкости. Установлено, что при приближении к критической точке ($\tau \rightarrow 0$) скорость звука снижается примерно до 60 % от исходного значения, коэффициент затухания возрастает в 8–12 раз, а частота максимального затухания f_{\max} смещается с ≈ 500 кГц до ≈ 80 кГц. Разработан численный алгоритм второго порядка точности $O(\Delta t^2 + \Delta x^2)$ с адаптивным шагом и поглощающими граничными условиями Хигдона первого порядка. Предложенная модель может быть использована для акустической диагностики околкритических двухфазных систем и анализа аномального поведения транспортных коэффициентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ван Г.С., Алмара Л.М., Прасад В. Термодинамический анализ аномальной области, критической точки и перехода от субкритического к сверхкритическому состоянию // *Physics of Fluids*. — 2024. — Т. 36. — № 2. DOI: 10.1063/5.0179651.
2. Лассо Д., Заполи Б., Мэпп С., Гаррабос И. Теплоперенос в пористой среде, насыщенной околкритической жидкостью: эффект поршня и вязкое замедление // *Physical Review Fluids*. — 2024. — Т. 9. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.9.124402.
3. Ли Ю., Чжоу З., Ми Ц. Связь между физическими параметрами сверхкритических жидкостей и скоростью звука вблизи критической точки // *Physics of Fluids*. — 2022. — Т. 34. — № 11. DOI: 10.1063/5.0122905.
4. Губайдуллин Д.А., Фёдоров Ю.В. Акустика вязкоупругой жидкости с газовыми пузырьками, покрытыми вязкоупругой оболочкой // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. — 2022. — Т. 95. — С. 788–796. DOI: 10.1007/s10891-022-02537-4.
5. Фёдоров Ю.В., Гафиятов Р.Н., Губайдуллина Д.Д. Волновая динамика газового пузырька с гиперэластичной оболочкой в вязкоупругой жидкости // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. — 2024. — Т. 97. — С. 1277–1284. DOI: 10.1007/s10891-024-03001-1.
6. Фёдоров Ю.В., Гафиятов Р.Н. Отражение акустической волны от границы между жидкостью и смесью жидкости с твёрдыми частицами и газовыми пузырьками // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. — 2025. — Т. 46. — С. 2044–2052. DOI: 10.1134/S1995080225606861.
7. Соджахруд А.Дж., Ли Ц., Хаги Х., Каршафиан Р., Портер Т.М., Колиос М.К. Исследование зависимости скорости звука и затухания в пузырьковых средах от давления // *Ultrasonics Sonochemistry*. — 2023. — Т. 95. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106319.
8. Гималтдинов И.К., Столповский М.В., Кочанова Е.Ю. Акустическое зондирование подводных выбросов // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. — 2024. — Т. 97. — С. 353–360. DOI: 10.1007/s10891-024-02901-6.
9. Ван Ю., Гао Я., Ван Т. и др. Теоретические и экспериментальные исследования отражения звука в пузырьковых жидкостях с малой концентрацией пузырьков // *Applied Sciences*. — 2022. — Т. 12. — № 23. DOI: 10.3390/app122312264.
10. Бейсенс Д. Обзор транспортных явлений вблизи критической точки жидкостей // *Frontiers in Space Technologies*. — 2022. — Т. 3. DOI: 10.3389/frspt.2022.876642.

© Палванов Мурод Равшанович (m.palvanov@stankin.ru); Уварова Людмила Александровна (uvar11@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АРХИТЕКТУРА СРЕДЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ В ЗАДАЧАХ КОМАНДНОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ

ARCHITECTURE OF A SIMULATION ENVIRONMENT FOR REAL-TIME MULTI- AGENT SYSTEMS IN THE TASK OF TEAM OPPOSITION

**M. Panteleyev
S. Lityagin**

Summary. This paper presents the architecture of a simulation environment for real-time multi-agent systems (RT MAS SE) designed for testing scenarios of team opposition. Based on the identified requirements for RT MAS SE and the analysis of existing solutions, a client-server architecture is proposed that ensures scalability across distributed computing resources and modularity of software components. The server part of RT MAS SE implements the modeling of environment dynamics and sensor data, which are transmitted to clients containing intelligent agents and implementing their logic (including team interaction strategies). The paper describes the main interface modules that allow developers to implement various physical platforms, their motion models, sensors and sensor data, as well as to organize network communication using different technologies without changing the overall logic of the RT MAS SE. The limitations of the proposed architecture are identified: the absence of terrain modeling and collision detection between physical platforms; unified storage of sensor data for different sensors in a single container; simplified communication logic between agents. The results of this study can be applied to the development and testing of real-time multi-agent systems in tasks of team opposition. Future work includes extending the architecture by modeling terrain maps and support for training reinforcement learning (RL) agents.

Keywords: team opposition, distributed computing resources, client-server architecture, intelligent agent, simulation environment, real-time multi-agent system.

Пантелеев Михаил Георгиевич

кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
mgpanteleev@etu.ru

Литягин Семён Михайлович

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
semen.lol@yandex.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается архитектура среды имитационного моделирования многоагентных систем реального времени (СИМ МАС РВ), ориентированная на отработку сценариев командного противодействия. На основе выделенных требований к СИМ МАС РВ и анализе существующих СИМ МАС РВ предложена клиент-серверная архитектура СИМ МАС РВ, обеспечивающая масштабируемость на распределенные вычислительные ресурсы и модульность программных компонентов. Серверная часть СИМ МАС РВ реализует моделирование динамики среды и сенсорных данных, которых отправляются на клиенты, содержащие интеллектуальных агентов и реализующих их логику (в том числе логику командного взаимодействия). В работе описаны основные интерфейсные модули, позволяющие разработчикам реализовывать разные физические платформы, модели их движения, сенсоры, сенсорные данные, а также реализовывать сетевое взаимодействие с помощью разных технологий без изменений общей логики СИМ МАС РВ. Выделены ограничения предлагаемой архитектуры СИМ МАС РВ: отсутствие моделирования карты местности и коллизий между физическими платформами; сенсорные данные для разных сенсоров хранятся в едином контейнере, упрощенная логика коммуникации между агентами. Результаты исследования применимы для разработки и апробации многоагентных систем реального времени в задачах командного противодействия. В дальнейшем планируется расширение архитектуры за счет моделирования с учетом карты местности, добавления возможности обучать интеллектуальных агентов с подкреплением.

Ключевые слова: командное противодействие, распределенные вычислительные ресурсы, клиент-серверная архитектура, интеллектуальный агент, среда имитационного моделирования, многоагентная система реального времени.

Введение

Для современных задач все чаще применяются решения из области искусственного интеллекта, способные корректно работать в условиях открытого мира реального времени, изменяющегося непрерывно и динамически. Особый интерес в этой области представляют решения в виде интеллектуальных агентов, способных адаптироваться к такому миру, взаимодействовать и координировать свои действия в команде, образующей многоагентную систему [1, 2] реального времени. Разработка многоагентной системы реального времени, функционирующей в реальном мире (беспилотные наземные, воздушные, водные аппараты), затруднена дороговизной оборудования, ограничениями в масштабируемости экспериментов и другими факторами, поэтому широко применяются среды имитационного моделирования многоагентных систем реального времени (СИМ MAC PB).

Большинство существующих СИМ MAC PB ориентированы на физически достоверное моделирование динамики [3, 4], моделирование реалистичной графики [5], «заточены» под ограниченные сценарии [6, 7] (как при моделировании мира, так и при моделировании физической платформы с интеллектуальным агентом, действующим в этом мире). Они позволяют использовать ограниченные классы интеллектуальных агентов [8], имеют ограниченное число моделей сенсорных данных, на основе которых интеллектуальный агент может реализовывать интеллектуальную деятельность, что актуализирует разработку СИМ MAC PB [9], преодолевающую эти ограничения.

В рамках данной работы предлагается архитектура СИМ MAC PB, позволяющая реализовывать сценарии командного противодействия для тестирования разработанных многоагентных систем реального времени согласно следующим требованиям [8, 9]:

1. Моделирование разных классов интеллектуальных агентов как в части робототехнической платформы, так и в части архитектуры интеллектуальной подсистемы интеллектуального агента;
2. Добавление и моделирование разных компонентов физической платформы интеллектуального агента (модели движения, сенсоры);
3. Моделирование в масштабе времени, заданном тактом моделирования, который соответствует динамике процессов в моделируемом мире;
4. Масштабируемость на распределенные вычислительные ресурсы (распределение моделирования интеллектуальных клиентов на отдельные вычислительные ресурсы) в локальной сети;
5. Моделирование различных сенсорных данных и их отправка целевому интеллектуальному агенту;

6. Реализация действий, инициируемых интеллектуальными агентами;
7. Моделирование командных сценариев;
8. Отсутствие ограничений стратегии командного взаимодействия интеллектуальных агентов;
9. Поддержка модульности программных компонентов СИМ MAC PB.

Объектом исследования является процесс моделирования многоагентной системы в условиях открытого мира реального времени, изменяющегося непрерывно и динамически.

Предметом исследования выступает процесс создания архитектуры среды имитационного моделирования многоагентных систем реального времени, обеспечивающей имитацию поведения интеллектуальных агентов в рамках заданного сценария и сенсорных данных, воспринимаемых интеллектуальными агентами.

Цель исследования заключается в проектировании архитектуры среды имитационного моделирования многоагентных систем реального времени с возможностью масштабирования на распределенные вычислительные ресурсы.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи исследования:

1. Определить последовательность действий, выполняемых СИМ MAC PB в заданном такте моделирования, образующих цикл имитационного моделирования СИМ MAC PB;
2. Спроектировать клиент-серверную архитектуру СИМ MAC PB;
3. Оценить преимущества и недостатки созданной архитектуры СИМ MAC PB.

Цикл имитационного моделирования СИМ MAC PB

Для проектирования архитектуры СИМ MAC PB рассмотрим ментальный цикл интеллектуального агента:

1. Наблюдать — восприятие мира через сенсоры;
2. Обдумывать — анализировать наблюдения и формировать картину мира;
3. Принимать решение — формировать план по достижению поставленной интеллектуальному агенту цели;
4. Выполнять действие — воздействовать на мир через актуаторы.

СИМ MAC PB должна реализовывать первый и последний пункты — формировать сенсорные данные на основе моделируемого мира, по которым интеллектуальный агент строит картину мира, и изменять моделируемый мир на основе действий, выбранных в ходе

интеллектуальной деятельности агента. На основе этих пунктов формируется цикл имитационного моделирования СИМ MAC PB.

Цикл имитационного моделирования СИМ MAC PB в данной работе построен на основе цикла, определенного в [8]. Итерация цикла имитационного моделирования СИМ MAC PB задается тактом моделирования. В начале каждой итерации выполняется расчет сенсорных данных для каждого интеллектуального агента. Далее они отправляются интеллектуальным агентам. Сразу после отправки СИМ MAC PB ставит таймер на время, отведенное для выполнения интеллектуальной деятельности интеллектуального агента. По истечении этого времени СИМ MAC PB запрашивает воздействия на моделируемый мир от интеллектуальных агентов (изменение ускорения, изменения режима работы сенсора, отправка сообщения другому интеллектуальному агенту и др.), получает и выполняет их, а затем пересчитывает физические состояния моделируемых физических платформ (согласно такту моделирования).

Следует отметить, что если интеллектуальный агент не успел выполнить действие в рамках текущего такта моделирования, то такое действие не учитывается в текущей итерации. Возможность его выполнения в дальнейшем зависит от реализации интеллектуального агента.

Архитектура СИМ MAC PB

В данной работе для учета требования масштабируемости на распределенные вычислительные ресурсы выбрана клиент-серверная модель. Серверная часть СИМ MAC PB отвечает за моделирование физических процес-

сов — расчет состояний физических платформ с учетом их модели движения в течение заданного временного такта моделирования, расчет сенсорных данных согласно набору сенсоров физической платформы, выполнение действий для воздействия на мир интеллектуальных агентов, а также за коммуникацию с клиентами (на которых реализуется логика интеллектуальных агентов) по сети.

Разделение логики интеллектуальных агентов на клиентов не ограничивает разработчиков многоагентных систем в части реализации интеллектуальных агентов с разной архитектурой интеллектуальных подсистем. Более того, это позволяет разработчикам использовать разные языки программирования для реализации интеллектуальных агентов на клиентах.

Выделим основные программные модули:

1. Модуль инициализации физических платформ по файлу конфигурации, `ObjectsConfigParseBase`;
2. Модуль сетевого взаимодействия, `NetworkServerBase`;
3. Модуль СИМ MAC PB, реализующий цикл имитационного моделирования, `ServerBase`;
4. Модуль физической платформы, `Object`;
5. Модуль модели движения физической платформы, `MovementModel`;
6. Модуль сенсора, `Sensor`;
7. Модуль действий для воздействия на моделируемый мир, `Action`.

На рисунке 1 показана UML диаграмма модулей `ServerBase`, `ObjectsConfigParseBase`, `NetworkServerBase`.

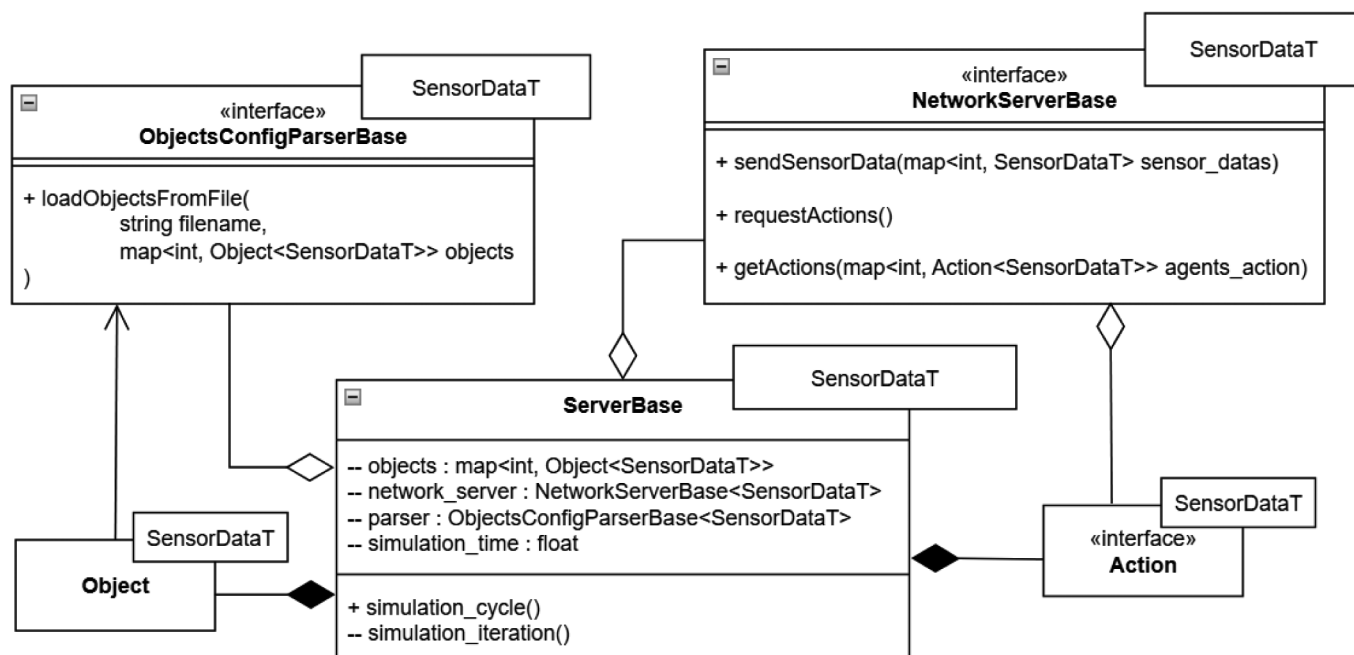


Рис. 1. UML диаграмма серверной части СИМ MAC PB с модулем сетевого взаимодействия

Все представленные модули являются классами-шаблонами (некоторые являются также интерфейсами), что позволяет заменять структуры сенсорных данных `SensorDataT`, переписывая при этом лишь реализации интерфейсов программных модулей СИМ МАС РВ.

Главным программным модулем является `ServerBase`, реализующий цикл имитационного моделирования СИМ МАС РВ, хранящий все моделируемые физические платформы; объект, реализующий сетевое взаимодействие; объект, инициализирующий физические платформы по файлу конфигурации. Файл конфигурации содержит информацию о физических платформах, которые должны быть инициализированы СИМ МАС РВ перед началом моделирования.

Описание физических платформ в файле конфигурации зависит от области применения интеллектуального агента, а также от сложности моделируемого сценария, поэтому в модуле `ObjectsConfigParseBase` реализован интерфейс, позволяющий в случае изменения структуры описания физических платформ изменять лишь реализацию этого интерфейса, не изменяя при этом логику других программных модулей.

В модуле сетевого взаимодействия `NetworkServerBase` реализован интерфейс, позволяющий в реализациях изменять протоколы сетевого взаимодействия, при этом не затрагивая логику остальных модулей. В логику дан-

ного модуля входит отправка сенсорных данных клиентам по их идентификатору, а также сбор действий от клиентов, которые после будут переданы в `ServerBase`. В методы интерфейса отдельно выделен метод запроса действий от клиентов и метод передачи полученных действий. Это позволяет реализовывать как синхронные протоколы с последовательным запросом и получением в ответ действия от клиента, так и асинхронные.

Для практической реализации может быть использована асинхронная модель обмена на основе UDP с сериализацией сообщений через Protocol Buffers (protobuf), что допустимо при работе в локальной сети, где потери пакетов минимальны. Однако данный выбор не является фиксированным и может быть заменен, например, на TCP или gRPC, в зависимости от требований к системе (выбор напрямую влияет на масштабируемость СИМ МАС РВ).

На рисунке 2 представлена UML диаграмма модулей `Object`, `MovementModel`, `Sensor`, `Action`. Представленные модули также являются классами-шаблонами и/или интерфейсами для удобства работы с изменениями структуры сенсорных данных и действий клиентов.

В модуле сенсора `Sensor` реализован интерфейс, шаблонизируемый структурой сенсорных данных, позволяющий в реализациях задавать логику формирования сенсорных данных по физической платформе, на ко-

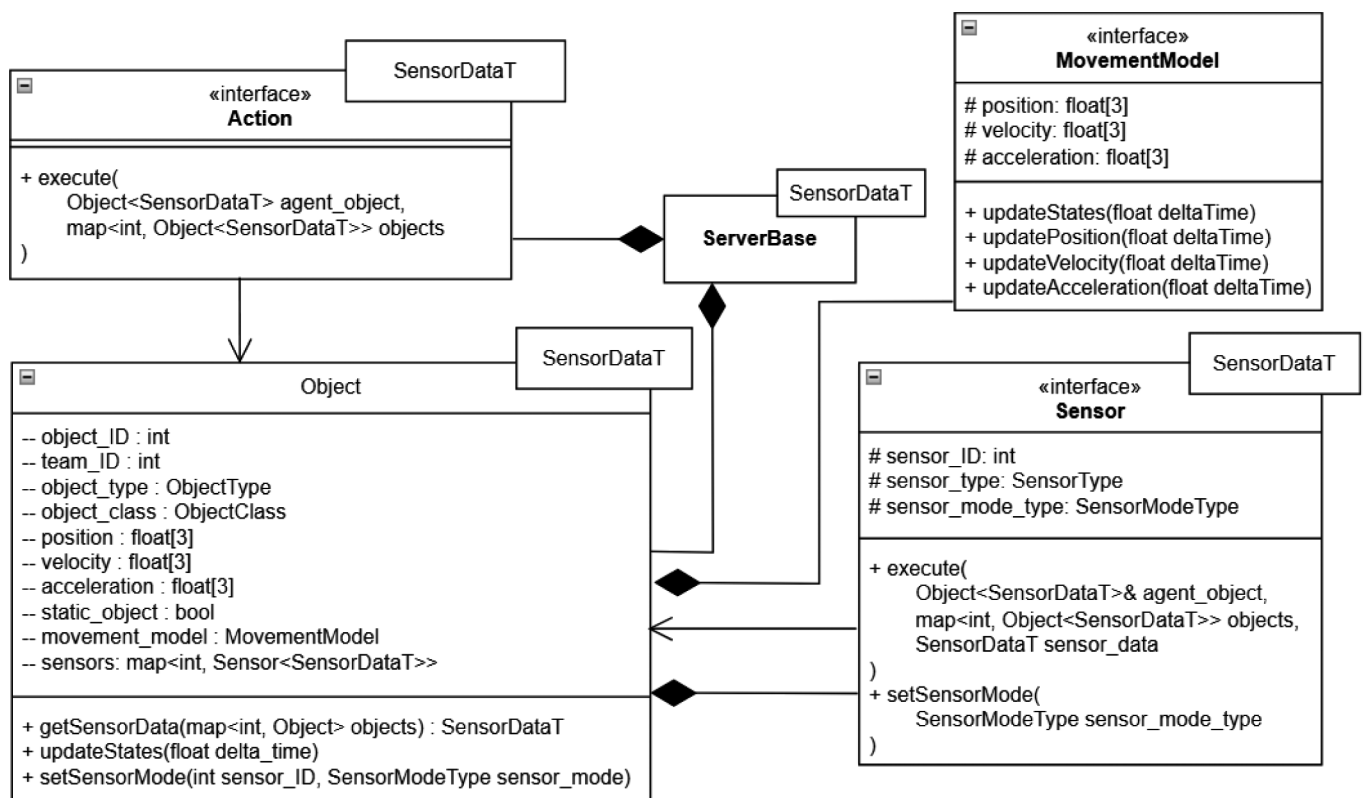


Рис. 2. UML диаграмма серверной части СИМ МАС РВ с модулями для моделирования мира

торую этот сенсор установлен, и по всем физическим платформам, участвующих в моделируемом сценарии. В текущей работе для сенсоров выделяются режимы работы, по которым в реализациях сенсора от данного интерфейса требуется устанавливать определенные параметры (например, при реализации радара параметром будет радиус действия, и в разных режимах работы будет изменяться значение этого параметра).

В классической литературе по мобильной робототехнике [10] подробно описаны типовые сенсоры (лидар, камера, ультразвук и др.). Реализация моделирования для сенсоров низкоуровневых сенсорных данных (облака точек для лидаров, многоканальные изображения для камер и др.) избыточно, поскольку разработчика MAC в первую очередь интересует апробация разработанной MAC системы. Сенсорные данные для этого достаточно моделировать как результат обработки низкоуровневых данных (в виде информации об обнаруженных объектов и проч.), что снижает нагрузку на передачу данных от сервера к клиенту, а также уменьшает время генерации сенсорных данных для большого числа моделируемых физических платформ.

В модуле физической платформы Object реализован класс-шаблон, где хранится состояние физической платформы (позиция, скорость, ускорение, статичность), информация о ней (класс, тип, идентификатор, принадлежность к определенной команде), модель движения и сенсоры. Реализованная логика класса физической платформы позволяет получать сенсорные данные, устанавливать режимы работы для сенсоров, обновлять состояния физической платформы по заданному временному такту.

Для удобства дальнейшей реализации различных моделей движения сформирован отдельный модуль MovementModel.

В модуле воздействия на моделируемый мир Action реализован интерфейс, который позволяет в дальнейшем реализовывать различную логику воздействия на мир по полученным сообщениям в модуле сетевого взаимодействия. Это позволяет разработчику реализовывать действия в соответствии со структурой получаемого сообщения и применять его либо к физической платформе самого интеллектуального агента, либо к другим моделируемым физическим платформам.

Таким образом, сервер СИМ MAC PB выполняет только моделирование динамики среды. Вся логика интеллектуального агента реализуется отдельно на клиентах, как и логика стратегии командного взаимодействия. Ряд таких стратегий потребует реализации коммуникации между интеллектуальными агентами, что не ограничивается описанными модулями [11]. Достаточно реализо-

вать соответствующий сенсор и действие по передаче сообщения.

Заключение

Предлагаемая архитектура СИМ MAC PB удовлетворяет требованиям масштабируемости на распределенные вычислительные ресурсы и в то же время не накладывает ограничения на разные архитектуры интеллектуальных подсистем интеллектуальных агентов.

Реализация основных модулей СИМ MAC PB удовлетворяет требованию модульности, требованию добавления и моделирования сенсоров с разными сенсорными данными, разных физических платформ, разных действий интеллектуальных агентов для влияния на моделируемый мир. Более того, модульность позволяет разработчикам реализовывать различные протоколы сетевого взаимодействия.

Добавление и моделирование сенсоров с разными сенсорными данными и разнообразных действий интеллектуальных агентов удовлетворяет требованию исключения ограничений стратегии командного взаимодействия интеллектуальных агентов, а поддержка поля номера команды в модуле физической платформы Object обеспечивает поддержку команд. Основная логика таких стратегий должна реализовываться в интеллектуальных подсистемах интеллектуальных агентов, но в некоторых случаях требуется реализация коммуникации между интеллектуальными агентами. В роли коммуникатора могут выступать соответствующий сенсор и действие с гибкой структурой сообщений.

Цикл имитационного моделирования СИМ MAC PB в модуле ServerBase удовлетворяет требованию моделирования в масштабе времени, задающем динамику процессов в моделируемом мире.

В предлагаемых модулях СИМ MAC PB интерфейсы и/или классы-шаблоны реализованы с допущениями, составляющими ограничения для разработчиков многоагентных систем.

Главное ограничение предлагаемой архитектуры СИМ MAC PB — отсутствие возможности задавать в моделируемом физическом мире карту местности. Например, — в виде плоскости с зонами, где зона с лесом влияет на распознавание физических платформ сенсорами, а зона с болотистой местностью влияет на скорость передвижения наземных физических платформ. В такой архитектуре моделируемый мир представлен как набор физических платформ. Менее значимым ограничением является отсутствие коллизии между физическими платформами — метод обновления состояния физической платформы в модуле Object не имеет доступа к модели-

руемым физическим платформам в мире для проверки столкновений.

Еще одним ограничением является единая структура сенсорных данных. В допущении единой структуры сенсорных данных стало возможно реализовать основные модули как классы-шаблоны, однако это приводит к тому, что в реализациях структура сенсорных данных должна иметь возможность содержать все возможные сенсорные данные (например, один сенсор имеет возможность фиксировать скорость движения физических платформ и их положение, а другой — их положение, тип и класс, что приведет к сохранению структур сенсорных данных для каждого из сенсоров в единой структуре). Другое ограничение сенсоров в предлагаемой архитектуре СИМ MAC РВ состоит в том, что не учтен вариант работы сенсоров с разной частотой получения сенсорных данных.

Усложнение логики коммуникации между агентами приведет к сложности использования коммуникатора как обычного сенсора, что потребует реализации отдельного модуля и включения его в логику остальных модулей.

В текущей реализации архитектура СИМ MAC РВ ориентирована преимущественно на тестирование разрабатываемых MAC, а не на обеспечение инфраструктуры для их обучения. Значительное количество современных исследований связано именно с обучением многоагентных систем в средах смешанного кооперативно-конкурентного взаимодействия [12], поэтому для расширения применимости СИМ MAC РВ потребуется интеграция механизмов, поддерживающих обучение MAC (в том числе механизмов обучения с подкреплением), что позволит использовать СИМ MAC РВ не только для апробации, но и для обучения MAC.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ferber J. Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. — Addison-Wesley, 1999. ISBN 978-0201360486.
2. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems. — 2nd ed. — Chichester: John Wiley & Sons, 2009. ISBN 978-0470519462.
3. Gazebo Simulator [Электронный ресурс]. — 2025. — URL: <https://gazebo.org/home> (дата обращения: 02.04.2025).
4. Koenig N., Howard A. Design and Use Paradigms for Gazebo, An Open-Source Multi-Robot Simulator // Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). — 2004. DOI: 10.1109/IROS.2004.1389727.
5. Juliani A., Berges V.-P., Viger F., Cohen A., Harper J., Henry H., Mattar M., Lange D. Unity: A General Platform for Intelligent Agents [Электронный ресурс]. — 2020. — arXiv:1809.02627 [cs.LG]. — URL: <https://arxiv.org/abs/1809.02627> (дата обращения: 14.04.2025).
6. RoboCup Soccer Simulator [Электронный ресурс]. — 2025. — URL: <https://rcsoccersim.github.io/> (дата обращения: 10.04.2025).
7. Zheng L., Yang J., Cai H., Zhou M., Zhang W., Wang J., Yu Y. MAgent: A Many-Agent Reinforcement Learning Platform for Artificial Collective Intelligence // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. — 2018. — Vol. 32, No. 1.
8. Пантелеев М.Г., Кохтенко Н.В., Лебедев С.В. Среда имитационного моделирования агентных систем реального времени // Науч.-техн. вестн. информ. технологий, механики и оптики. — 2012. — № 1 (77). — С. 53–57. — УДК 004.94:519.876.5.
9. Литягин С.М. Анализ сред имитационного моделирования многоагентных систем реального времени // Наука настоящего и будущего: сб. материалов XII науч.-практ. конф. с междунар. участием для студентов, аспирантов и молодых ученых. Т. I. — [б. м.], 2025. — С. 52. — Секция: искусственный интеллект в прикладных областях.
10. Siegwart R., Nourbakhsh I.R., Scaramuzza D. Introduction to Autonomous Mobile Robots. — 2nd ed. — Cambridge, MA: MIT Press, 2011. ISBN 978-0262015356.
11. 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.
12. Lowe R., Wu Y., Tamar A., Harb J., Abbeel P., Mordatch I. Multi-Agent Actor-Critic for Mixed Cooperative-Competitive Environments [Электронный ресурс] // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). — 2017. — URL: <https://arxiv.org/abs/1706.02275> (дата обращения: 14.04.2025).

© Пантелеев Михаил Георгиевич (mgpanteleev@etu.ru); Литягин Семён Михайлович (cemen.lol@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБРАЗОВ ВИРТУАЛЬНЫХ МАШИН В ОБЛАЧНЫХ ИНФРАСТРУКТУРАХ

MODERN APPROACHES TO ENSURING THE SECURITY OF VIRTUAL MACHINE IMAGES IN CLOUD INFRASTRUCTURES

**V. Pakholiuk
I. Krepak**

Summary. The article addresses current challenges and approaches to ensuring the security of virtual machine (VM) images in cloud infrastructures. Special attention is given to issues of integrity verification, provenance control, and protection against malicious code during the storage and operation of VM images. A model of a VM image security management system is presented, incorporating mechanisms for authentication, access control, data filtering, and change tracking. The paper also proposes directions for improving the efficiency of monitoring and automating the security assessment of virtual environments. The study is intended for researchers and practitioners in the fields of information security and cloud computing.

Keywords: cloud computing, virtual machine, VM image, security, integrity control, access management.

Пахолук Владимир Всеволодович

Финансовый университет при Правительстве
Российской Федерации, г. Москва
vova05.qwerty@mail.ru

Крепак Иван Павлович

Финансовый университет
при Правительстве Российской Федерации;
Руководитель группы информационной безопасности,
ООО «Клиника Будь Здоров», г. Москва
krepak.2311@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматриваются современные проблемы и подходы к обеспечению безопасности образов виртуальных машин (ВМ) в облачных инфраструктурах. Особое внимание уделяется вопросам целостности, контроля происхождения и защиты от вредоносного кода в процессе хранения и эксплуатации образов. Представлена модель системы управления безопасностью образов ВМ, включающая механизмы аутентификации, контроля доступа, фильтрации данных и отслеживания изменений. Предложены направления повышения эффективности мониторинга и автоматизации проверки безопасности виртуальных сред. Работа ориентирована на исследователей и практиков в области информационной безопасности и облачных вычислений.

Ключевые слова: облачные вычисления, виртуальная машина, образ ВМ, безопасность, контроль целостности, управление доступом.

Введение

Стремительное развитие облачных вычислений оказало глубокое влияние на архитектуру и принципы организации современных информационных систем. Использование облачных технологий позволило предприятиям и исследовательским организациям значительно повысить гибкость масштабирования ресурсов, оптимизировать затраты на эксплуатацию инфраструктуры и обеспечить непрерывность сервисов [1]. Однако, вместе с этим усложнилась задача обеспечения информационной безопасности виртуализированных сред, в которых традиционные методы защиты оказываются недостаточными [3].

Одним из наиболее критичных, и в то же время уязвимых элементов облачной экосистемы являются образы виртуальных машин (Virtual Machine Images, ВМ-образы), представляющие собой самодостаточные шаблоны программно-аппаратной среды, включающие операционные системы, прикладные модули и параметры конфигурации. Данные образы формируют исходное состояние

развёртываемых виртуальных машин и, следовательно, определяют уровень защищённости всего виртуального окружения.

В отличие от обычных установочных пакетов, образы виртуальных машин представляют собой готовые к исполнению экземпляры, которые могут содержать скрытые уязвимости, фрагменты вредоносного кода, устаревшие компоненты или конфиденциальную информацию [2]. Любое несанкционированное изменение такого образа потенциально ведёт к масштабным инцидентам, включая утрату целостности данных, нарушение доступности сервисов и компрометацию всей облачной инфраструктуры.

Настоящая работа направлена на анализ рисков, связанных с эксплуатацией и распространением образов виртуальных машин, а также на систематизацию современных методов их защиты, обеспечивающих комплексное управление безопасностью на уровне облачных платформ.

Архитектура и функциональная роль виртуальных машин в облачных инфраструктурах

Виртуальная машина представляет собой изолированное вычислительное окружение, функционирующее поверх гипервизора и обеспечивающее независимое выполнение программных компонентов. Каждый экземпляр виртуальной машины создаётся на основе заранее подготовленного образа, определяющего начальное состояние операционной системы, установленных приложений и параметров безопасности.

Образы виртуальных машин выступают фундаментальным структурным элементом облачных экосистем, определяя целостность и доверенность инфраструктуры в целом. В публичных, гибридных и корпоративных облачных хранилищах, данные образы часто используются множеством пользователей и организаций, что по-

вышает риск распространения компрометированных или модифицированных экземпляров. Таким образом, контроль их подлинности и актуальности становится неотъемлемым аспектом управления информационной безопасностью облака [4].

Основные угрозы информационной безопасности и уязвимости образов виртуальных машин

С точки зрения информационной безопасности, образы виртуальных машин подвержены комплексу типовых угроз [5], каждая из которых может иметь значительные последствия для функционирования облачной среды:

1. Нарушение целостности — несанкционированные изменения файлов образа вследствие вредоносных действий, ошибок обновлений или внутренних сбоев системы хранения.

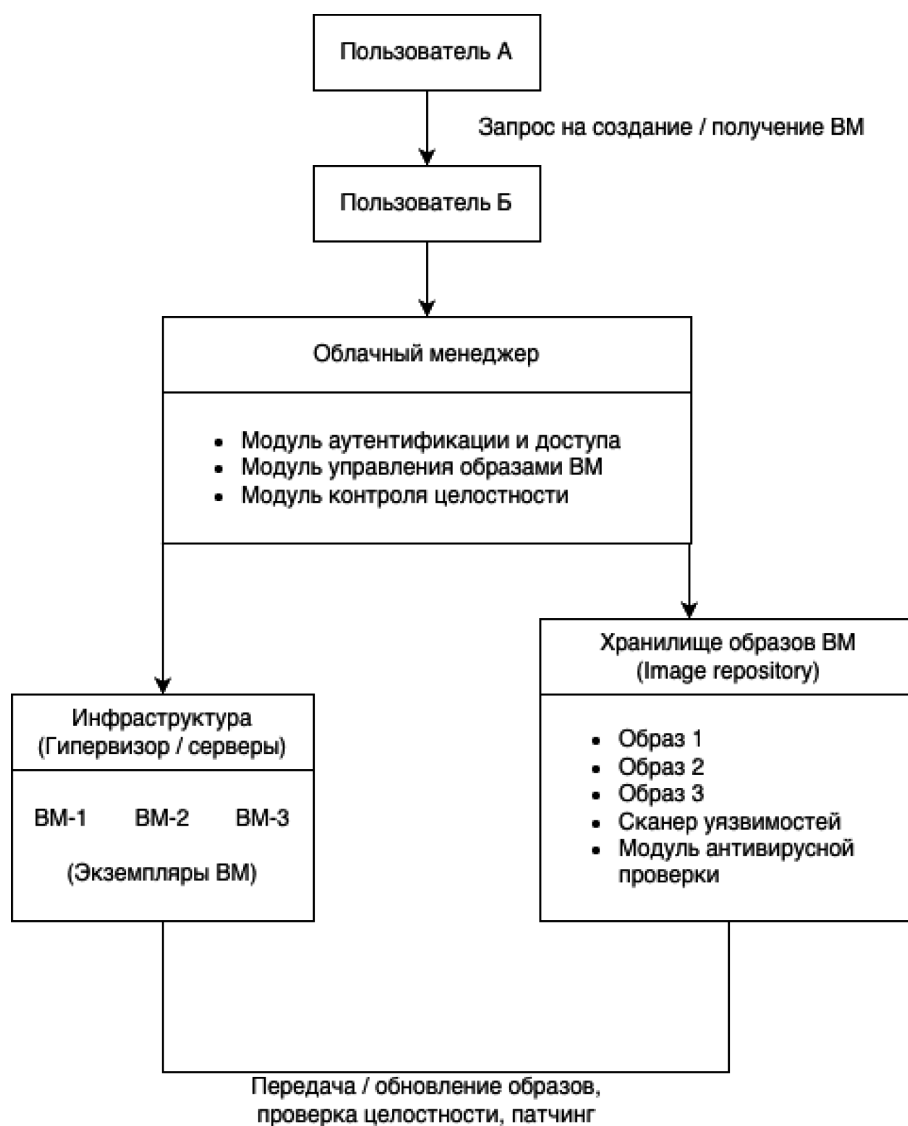


Рис. 1. Схематическое представление архитектуры облачной платформы с репозиторием образов VM и модулями обеспечения безопасности

2. Компрометация конфиденциальных данных — сохранение в образе служебных ключей, паролей, временных файлов или пользовательских артефактов, что создаёт риск их утечки при совместном использовании образа.
3. Внедрение вредоносного программного обеспечения — преднамеренное включение в образы троянов, эксплойтов или программ-шпионов, распространяемых под видом легитимных шаблонов.
4. Несоблюдение лицензионных ограничений — наличие в составе образов нелицензионного или неправомерно используемого программного обеспечения.
5. Использование устаревших версий — эксплуатация образов, не содержащих актуальных обновлений безопасности, что делает их уязвимыми к известным атакам.

Наибольшую проблему представляют dormantные образы — неактивные шаблоны, хранящиеся в репозиториях без регулярной проверки. Их эксплуатация без предварительного анализа способна привести к повторному внедрению известных уязвимостей в систему.

Современные подходы к обеспечению безопасности образов виртуальных машин

Современные механизмы защиты ориентированы на создание комплексной системы управления жизненным циклом образов, включающей следующие направления:

1. Механизмы аутентификации и контроля доступа — каждому образу назначается ответственный

владелец, который управляет правами на чтение, модификацию и распространение. На практике применяются модели ролевого разграничения доступа (RBAC), электронная подпись образов, а также многофакторная аутентификация при загрузке в репозиторий.

2. Проверка целостности и интеллектуальная фильтрация содержимого — при публикации и извлечении образов выполняется их автоматизированный анализ, направленный на удаление потенциально опасных данных и выявление признаков заражения. Используются криптографические хэш-функции, цифровые сертификаты доверия и базы данных сигнатур угроз.
3. Отслеживание происхождения и истории изменений (provenance tracking) — Каждое действие с образом фиксируется в виде метаданных: источник, время, операция и хэш состояния. Такая прослеживаемость обеспечивает аудит, позволяет выявлять источники инцидентов и предотвращает умышленные модификации образов.

Дополнительно применяются методы автоматического сканирования репозитория, регулярного патчинга и удалённого обновления образов. Это формирует устойчивую среду доверия и снижает вероятность распространения уязвимых экземпляров.

Модель интегрированной системы безопасности

Эффективная стратегия защиты образов виртуальных машин реализуется посредством интегрированной системы, сочетающей профилактические и реактивные компоненты [6]. Такая система включает:



Рис. 2. Диаграмма классификации угроз безопасности образов виртуальных машин



Рис. 3. Модель взаимодействия модулей системы безопасности образов виртуальных машин: аутентификация, фильтрация и контроль целостности, объединённые через центральное хранилище метаданных

- модуль идентификации и аутентификации пользователей;
- подсистему верификации цифровых подписей и контроля версий образов;
- сервис автоматического удаления конфиденциальных артефактов;
- механизм планового антивирусного сканирования и анализа уязвимостей;
- журнал событий и систему уведомлений о нарушениях целостности.

Для повышения производительности подобные решения применяют технологии дедупликации и контент-адресуемого хранения, позволяющие минимизировать объём обрабатываемых данных за счёт исключения повторяющихся элементов и анализа лишь изменённых сегментов образов.

Результаты и обсуждение

Практическое внедрение комплексных систем управления безопасностью образов виртуальных машин демонстрирует значительное снижение вероятности эксплуатации уязвимостей и распространения вредоносных элементов. По оценкам экспериментальных моделей, интеграция механизмов фильтрации и контроля целостности позволяет сократить количество потенциально небезопасных образов в репозитории на 10–15 % по сравнению с исходным состоянием.

Наличие системы отслеживания происхождения повышает прозрачность процессов администрирования и способствует формированию доказательной базы при аудите. Автоматизация обновлений и патч-менеджмента обеспечивает поддержание актуальности программных компонентов без существенного увеличения административных затрат.

Тем не менее, эффективность подобных систем во многом зависит от регулярности обновления баз угроз и своевременности коррекции фильтрующих правил. Пренебрежение этими мерами может привести к накоплению нераспознанных уязвимостей и снижению точности детектирования инцидентов.

Заключение

Безопасность образов виртуальных машин представляет собой фундаментальное условие устойчивости и надёжности облачных инфраструктур. Учитывая возрастающую сложность угроз информационной безопасности, обеспечение доверенной среды требует интеграции многоуровневых механизмов защиты — контроля целостности, управления доступом, прослеживаемости изменений и автоматического обновления компонентов.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка интеллектуальных систем анализа образов на основе машинного обучения, внедрение динамического мониторинга поведения виртуальных экземпляров и создание единых отраслевых стандартов сертификации безопасных образов.

Комплексная автоматизация процессов обеспечения безопасности позволит минимизировать человеческий фактор, повысить уровень доверия пользователей и обеспечить устойчивое развитие облачных технологий в долгосрочной перспективе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Armbrust M. et al. A View of Cloud Computing. Communications of the ACM, 2010.
2. Ghosh A. et al. Security of Virtual Machine Images in Cloud Computing. IEEE Cloud Computing, 2015.
3. Иванов С.А., Петрова Е.Ю. Безопасность виртуализации и облачных систем. Журнал «Информационная безопасность», 2021.
4. Козлов А.В., Смирнова Т.М. Управление безопасностью образов виртуальных машин в облаке. Труды конференции «Информационные технологии», 2019.
5. Николаев Д.Р., Сидорова Н.В. Классификация угроз виртуализации в облачных средах. Журнал «Проблемы кибербезопасности», 2020.
6. Лебедев М.Ю., Орлова А.Г. Интегрированные системы обеспечения безопасности виртуальных инфраструктур. Сборник «Современные тенденции ИБ», 2022.

© Пахолук Владимир Всеволодович (vova05.qwerty@mail.ru); Крепак Иван Павлович (krepak.2311@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ АГЕНТА ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВАЛИДАЦИИ ВНУТРИКОРПОРАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

ALGORITHMIZATION OF AN AI AGENT FOR AUTOMATED VALIDATION OF INTRACORPORATE DOCUMENTATION

**D. Serezleev
Yu. Abaev**

Summary. The paper addresses the problem of automating document validation procedures performed by personnel in commercial organizations within the banking sector. Modern approaches to managing corporate information and documentation are analyzed. The authors demonstrate all shortcomings of existing methods for verifying technical and business tasks used to implement internal bank tools. A methodology is proposed for integrating specialized artificial intelligence agents aimed at automating and optimizing standardized document checks.

The authors provide economic calculations justifying the introduction of artificial intelligence into this field, demonstrating a reduction in analytical resource expenditures by one quarter and achieving an investment payback period within one month of system operation.

Additionally, the methodology describes various integrations of AI infrastructure, ensuring transparency, manageability, and compatibility with new technological solutions within corporate systems. Thus, the proposed approach demonstrates the potential for a radical rethinking of internal corporate approaches to documentation.

Keywords: artificial intelligence, documentation, database, semantics, analysis, business requirement, technical requirements, big data.

Серезлеев Дмитрий Сергеевич

Аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
serezleevds@gmail.com

Абаев Юсуп Кюриевич

Аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
serezleevds@gmail.com

Аннотация. Рассматривается проблема автоматизации процедуры валидации документов, выполняемой персоналом коммерческих организаций в банковской сфере. Анализируются современные подходы к управлению корпоративной информации, документации. Авторы демонстрируют все недостатки имеющихся в корпорациях методов проверок технических и бизнес-задач для реализации внутрибанковских инструментов. Предлагается методология интеграции специализированных агентов искусственного интеллекта для автоматизации и оптимизации стандартизированных проверок документации.

Авторы предоставляют экономические расчеты целесообразности внедрения искусственного интеллекта в вышеуказанную сферу с демонстрацией сокращения аналитических ресурсных трат на четверть и достижения точки окупаемости инвестиций за один месяц работ системы.

Методология также описывает интеграции разного рода инфраструктуры искусственного интеллекта, что обеспечивает прозрачность, управляемость и совместимость новых технологических решений с корпоративными системами предприятия. Таким образом предлагаемый подход демонстрирует возможность кардинального переосмысления внутрикорпоративного подхода к документации.

Ключевые слова: искусственный интеллект, документация, база данных, семантика, анализ бизнес-требования, технические требования, большие данные.

Одной из значимых проблем современных организаций, особенно в банковской сфере, является значительная временная затратность на процессы валидации и фиксации различных видов внутренних документов. Эти процессы включают проверку соблюдения стандартов качества, соответствия нормативным требованиям, а также поддержание актуальной версии документации, что требует значительных ресурсов и внимания. В качестве примеров рассматриваемой документации могут выступать технические спецификации и бизнес-требования, формируемые при разработке и внедрении сервисов, информационных систем и баз данных. При создании любой сложной технической системы важно обеспечить согласованность проектных

решений с установленными требованиями. Эти требования подразделяются на две группы: функциональные и нефункциональные. Функциональные требования определяют набор функций и возможностей, которыми должна обладать разрабатываемая система. Нефункциональные требования касаются характеристик системы, которые не относятся непосредственно к выполнению тех или иных функций, однако оказывают значительное влияние на удобство использования, надежность и масштабируемость системы.

В организациях часто встречаются интеграции с системами документации, такими как Microsoft Word, LibreOffice. Данное программное обеспечение являет-

ся базовым и устаревшим инструментом. В наши дни большие корпорации используют Confluence или любое другое внутренне-разработанное программное обеспечение. Confluence, продукт компании Atlassian, представляет собой современное и высокотехнологичное решение для управления контентом. Этот инструмент позволяет организациям создавать внутренние веб-порталы, предоставляя сотрудникам возможность не только редактировать, но и просматривать контент. Отмечаются следующие плюсы системы:

- прост и удобен для интеграции и обучения сотрудников;
- наличие внутренних продуктов и инструментов;
- есть возможность написания собственных внутренних продуктов;
- возможность использовать в кооперативном режиме.

Однако в настоящее время этот сервис можно считать также устаревшим, поскольку мы находимся в эпоху искусственного интеллекта и импортозамещение на отечественное программное обеспечение, когда продукты должны обладать уникальными характеристиками и объединять лучшие мировые технологии для решения задач.

В контексте распределенных систем и бизнес-логики, связанных с созданием различных видов документации, существует стремление применять внутренние нормативные документы самой организации для обеспечения единого подхода при разработке таких документов, как распоряжения, юридические акты, бизнес-требования и технические требования. В настоящее время эти документы зачастую проектируются и используются в произвольном порядке, что противоречит идее о внутренней согласованности и целостности организации.

Решением вышеуказанной проблемы может выступать интеграция с агентом искусственного интеллекта — специализированное программное обеспечение, основанное на принципах искусственного интеллекта, которое способно автоматически или полуавтоматически выполнять заранее определенные задачи. Такой агент обладает способностью воспринимать окружающую среду, адаптироваться к изменениям и принимать обоснованные решения на основе полученных данных. В отличие от общего понятия искусственного интеллекта (далее ИИ), охватывающего широкий спектр теорий и методик, агент искусственного интеллекта фокусируется на практической реализации конкретных функций и целей, применяя ИИ для решения специфичных задач в ограниченных контекстах.

Функционал агента искусственного интеллекта (далее AI агент):

- оценка качества документации на полноту, непротиворечивость, реализуемость, понятность;

- проектирования сценариев ошибок при применении документации в разработке сервиса. Учет потенциальных ошибок для минимизации инцидентов во время промышленной эксплуатации сервиса;
- проверка критичности используемых данных внутри документа. AI агент определяет степень значимости для деятельности организации и потенциальными рисками, связанными с их утечкой или несанкционированным доступом.
- проектирование возможных ошибок, потерь при недоступности сервиса, описанного в документе Confluence;
- составление рекомендации к валидируемому документу. При фиксации каких-либо ошибок AI агент оставляет комментарии к документу.

Предлагаемая методика интеграции AI агента предусматривает экономическое обоснование, заключающееся в повышении производительности трудовых коллективов, выраженном в финансовых показателях. Данная стратегия направлена на оптимизацию расходов посредством улучшения управленческих процессов и повышения эффективности труда, что в конечном итоге ведет к снижению издержек и увеличению рентабельности. Предложенный подход к интеграции AI агента характеризуется финансовыми затратами, связанными с привлечением двух высококвалифицированных разработчиков, арендой серверных мощностей и оплатой лицензий на использование ИИ-решений. Период разработки и вывода метода в промышленную эксплуатацию оценивается в шесть месяцев. Ожидаемая окупаемость инвестиций достигается в пределах одного месяца использования сервиса с AI агентом, при учете того, что в корпорациях практически в каждой команде используется ресурс аналитического отдела. Такая скорость окупаемости достигается благодаря сокращению затрат аналитического отдела на 25 %, что обусловлено уменьшением временных ресурсов, необходимых для валидации и проверки документации. Внедрение AI агента устраняет один из этапов проектирования сервиса, обеспечивая таким образом ускорение рабочего процесса и снижение операционных издержек.

Так же, экономическим и ресурсным обоснованием данного метода выступает доступность в реализации программного обеспечения AI агента. Со стороны сотрудников отдела разработки необходимо выполнить следующие этапы:

- выстроить программное окружение с интеграцией одного из популярных и подходящих к деятельности организации искусственных интеллектов: GigaChat, OpenAI ChatGPT, DeepSeek;
- реализовать интеграцию между AI агентом и Confluence;
- спроектировать мультиплатформенное решение для синхронизации с AI агентом по Application

Programming Interface (API) — набор инструкций, протоколов и инструментов для взаимодействия программного обеспечения;

- написать текстовую инструкцию или запрос, который пользователь задает нейросети, чтобы получить определенный результат (далее PROMPT-параметр) для понимания AI агентом окружающую среду, необходимый функционал, ожидаемое решение, уровень обработки информации и другие особенности процедуры валидации документов. Другими словами, пользователь AI агента передает техническое задание искусственному интеллекту.

В настоящее время развитие искусственных агентов требует сочетания способности понимать естественный язык, анализировать большие объемы данных и гибкости адаптации к различным задачам. Одной из наиболее перспективных архитектур для создания AI агентов стала технология Large Language Model (далее LLM), представляющая собой глубокие нейронные сети, способные обрабатывать разнообразные виды лингвистических запросов и генерировать осмысленные ответы.

Платформа GigaChat выбрана за основу построения AI агента благодаря ряду преимуществ:

- масштабируемость архитектуры: GigaChat обладает возможностью легко расширять свои знания и навыки путём добавления новых модулей и источников данных, что позволяет быстро интегрировать специализированные области знаний и повышать универсальность агента.
- высокая точность понимания естественного языка: GigaChat демонстрирует отличные результаты в понимании семантического контекста предложений, интерпретации смысла сообщений и адекватном реагировании на запросы пользователей.
- эффективность в диалоговых сценариях: Платформа поддерживает длительное взаимодействие с пользователем, сохраняя нить разговора и поддерживая контекст обсуждения, что делает её особенно подходящей для коммуникационных ролей AI агентов.
- нейрофизиологическая архитектура GigaChat: основанная на трансформерах, платформа обеспечивает эффективную обработку длинных последовательностей данных и эффективное обучение на больших корпусах текстов, что увеличивает устойчивость и обобщаемость модели.

Однако ключевой особенностью внимания становится не сама LLM-технология, а конкретно построенный на её основе AI агент. В связи с:

- реализация AI агента требует адаптации к разным сценариям общения, поддержание длительного диалога, решение многозадачности и интеграцию нескольких когнитивных способностей;

- концепция AI агента позволяет расширить функциональность за пределы простого языкового моделирования, превращаясь в самостоятельную интерактивную систему, способную активно поддерживать коммуникацию и принимать решения.

В следствии чего, фокус статьи смещён именно на AI агента, поскольку этот тип систем представляется ключевым этапом эволюции и практическим воплощением идей LLM-технологий в реальной жизни, где важны не только умения обработки текста, но и способность автономного функционирования в сложных динамически меняющихся ситуациях.

Для поддержания и обеспечения типизации валидации и предложенных рекомендаций к документации AI агентом используется Recover-and-Generate (далее RAG). В связи с тем, что LLM полагаются лишь на внутренний источник данных, RAG эффективнее работает с постоянно обновляемой информацией, позволяя оперативно реагировать на свежие события.

Метод двух взаимосвязанных этапов:

- recover (извлечение) — в системе фиксируется типизированная, нормативная информации организации, в которой выявляются ключевые элементы и производится структуризация информации;
- generate (генерация) — на основе полученной информации из предыдущего метода и информации от AI агента создается новый проверенный, скорректированный объект для адекватного ответа на запрос пользователя.

Детальное отображение диаграммы последовательности использования сервиса валидации документации AI агентом отображено на рисунке 1.

Предложенный сценарий демонстрирует функциональную архитектуру взаимодействия пользователя с автономным интеллектуальным агентом, акцентируя внимание на конкретных этапах рабочего цикла. Подробное изложение последовательности действий позволит углубленно исследовать основные аспекты автоматизации бизнес-процессов в современных организациях.

Основные этапы взаимодействия:

- создание первичного документа: сотрудником формируется исходящий документ, снабжённый специальным идентифицирующим элементом (маркером). Эта мера способствует обеспечению прозрачности процесса перемещения объекта внутри интеллектуального агента и облегчает мониторинг текущего состояния обрабатываемого документа.
- валидация документа AI агентом: запускается периодический процесс или производится за-

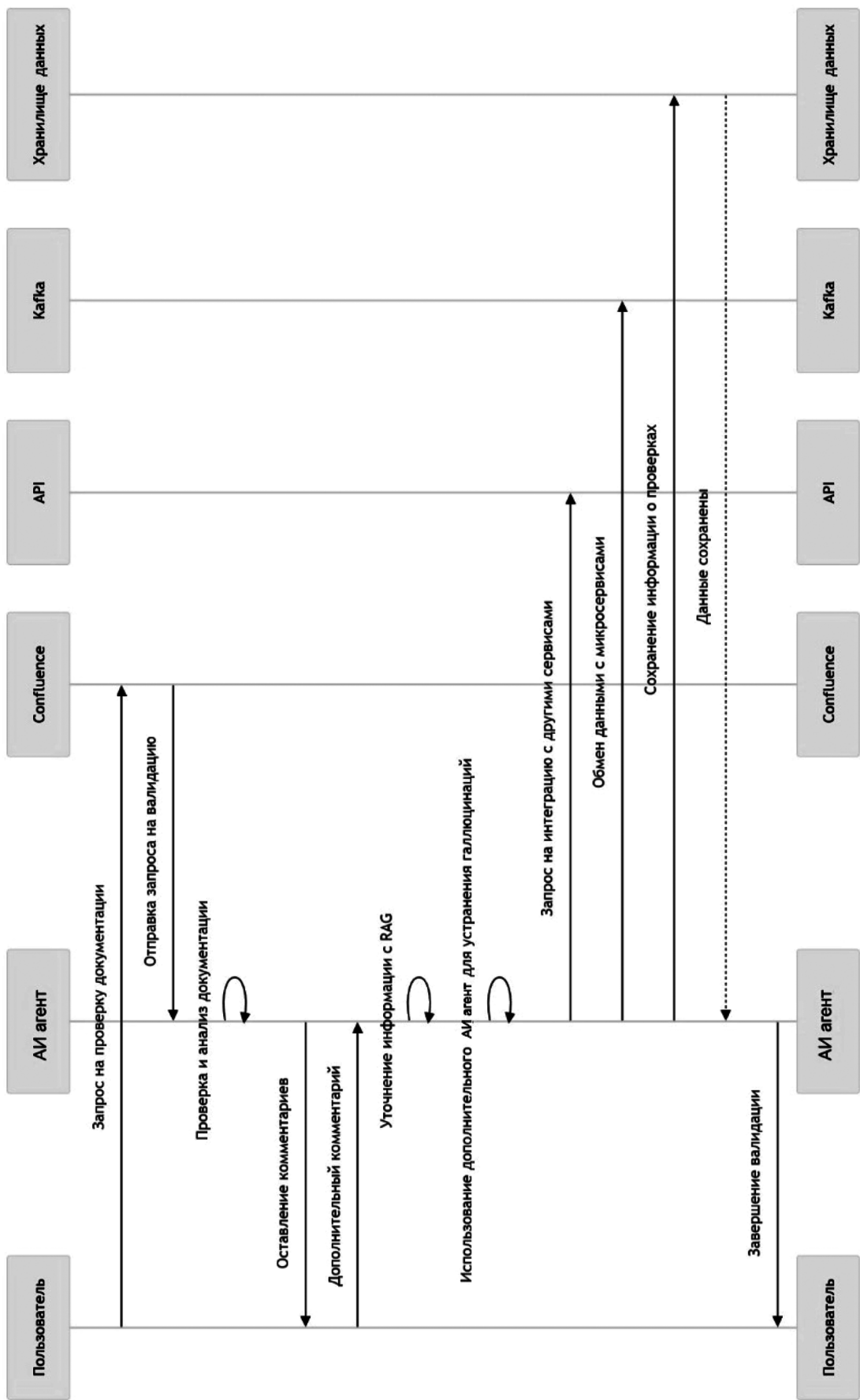


Рис. 1. Архитектура использования интегрированного AI агента в Confluence

пуск по требованию пользователя, в результате которого автоматический агент приступает к проверке подготовленных материалов. Работа выполняется в строгом соответствии с установленными регламентами RAG -архитектуры и выбранным PROMPT-параметром.

- типизация формата документа: автоматически генерируемые материалы подвергаются дополнительной обработке путём обогащения содержимого типизированным текстом, соответствующим принятым нормам ведения внутренней документации в организации. Такой подход повышает читаемость и согласованность выводимых результатов.
- хранение информации о взаимодействии: фиксация всех обращений пользователя и соответствующих реакций автономного агента сохраняется в структурированном виде во внутрикорпоративном хранилище. Это решение создаёт базу данных для последующих аналитических операций, направленных на улучшение функциональных возможностей AI агента, обучение его новым шаблонам обработки (RAG) и настройке специфики ввода (PROMPT).

Применение специализированного программного обеспечения на основе искусственного интеллекта, имеющего AI агентом, становится ключевым решением, предлагающим значительную помощь в улучшении существующей практики. Возможность автоматического или полуавтоматического анализа документов, выявление дефектов и выработка практических рекомендаций позволяют значительно упростить работу сотрудников,

занимающихся контролем качества проектов и разработкой внутреннего регулирования.

Использование метода RAG помогает создать целостную систему управления знаниями, включающую извлечение необходимой информации из большого массива нормативных актов и преобразование её в легко воспринимаемый вид. Благодаря этому подходу сотрудники получают точный и удобный инструмент для быстрого реагирования на любые изменения и усовершенствования документации.

Экономические расчеты показали, что внедрение предлагаемого подхода позволяет снизить затраты аналитического отдела примерно на четверть, увеличить производительность сотрудников и ускорить сроки исполнения проектов. Таким образом, помимо чисто технологических преимуществ, технология AI агента оказывает положительное воздействие на финансовые показатели предприятия, создавая предпосылки для устойчивого роста и снижения риска возникновения негативных последствий вследствие некорректных или неполных документов.

Описанная архитектура интеграции AI агента демонстрирует жизнеспособность предложенного решения и подчеркивает практичность реализации данного подхода даже в сложных и многоуровневых корпоративных системах. В целом, представленная концепция предлагает надежный путь совершенствования процессов управления внутренним регулированием, делая их быстрее, эффективнее и надежнее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пирогов В.Ю. Информационные системы и базы данных: организация и проектирование. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 528 с.
2. Дасгупта Натарадж. Практический анализ больших данных. Практические приемы реализации корпоративной аналитики и машинного обучения с использованием Hadoop, Spark, NoSQL и R. Бирмингем: Пакт Пабблишинг, 2018. 412 стр.
3. Бутл Р. Искусственный интеллект и экономика. Работа, богатство и благополучие в эпоху мыслящих машин. Москва: Альпина Пабблишер, 2025. 384 с.
4. Крон Дж., Бейлелевльд Г., Бассенс А. Глубокое обучение в картинках. Визуальный гид по искусственному интеллекту. Москва: Манн, Иванов и Фербер, 2025. 368 с.
5. Фостер Д. Генеративное глубокое обучение. Творческий потенциал нейронных сетей. Москва: Издательство «Питер», 2025. 416 с.
6. Ли К.-Ф., Цюфань Ч. ИИ-2041. Десять образов нашего будущего. Москва: Corpus, 2025. 352 с.
7. Абрамов А.Г. Высокопроизводительный сервис сбора и анализа файлов журналов сетевого и серверного оборудования в национальной исследовательской компьютерной сети // Программные продукты и системы. 2024. Т. 37, № 4. С. 495–503. DOI: 10.15827/0236-235X.148.495-503.
8. Буйневич М.В., Власов Д.С., Моисеенко Г.Ю. Комбинирование способов выявления инсайдеров больших информационных систем // Вопросы кибербезопасности. 2024. № 2(58). С. 29–40. DOI: 10.21681/2311-3456-2024-2-29-40. EDN: UMGBAI.
9. Карачевцева И.П., Дубов С.С., Андреев М.В., Гаров А.С., Зубарев А.Э., и др. Открытые пространственные данные для исследования территорий и цифровые сервисы доступа к ним // Спутниковые технологии. 2023. № 2. DOI: 10.26732/j.st.2023.2.07.
10. Зуйков Я.П., Матяш А.В., Багрин П.П., Андреева В.А. Методика использования цифрового двойника социальной системы в управлении предприятием // Финансовые рынки и банки. 2023. № 11. С. 174–181.

© Сerezлеев Дмитрий Сергеевич (serezleevs@gmail.com); Абаев Юсуп Кюриевич (serezleevs@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО СЛЕДА ОБУЧАЮЩЕГОСЯ В ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ СТУДЕНТА

Степанов Михаил Александрович

Томский политехнический университет
mas65@tpu.ru

MODEL OF A STUDENT'S DIGITAL TRACK IN AN INDIVIDUAL STUDENT'S EDUCATIONAL TRAJECTORY

M. Stepanov

Summary. The article is devoted to the description and interpretation of the digital footprint model of a student in the individual educational trajectory of a student. The main focus is on defining the principles of assessing the quality and effectiveness of education, describing the components of the digital footprint model, and identifying the advantages and prospects of using the digital footprint in the educational process.

Keywords: digital footprint model, educational trajectory, automated monitoring, forecasting, educational outcome.

Аннотация. Статья посвящена описанию и интерпретации модели цифрового следа обучающегося в индивидуальной образовательной траектории студента. Основное внимание уделяется определению принципов оценки качества и эффективности обучения, описанию компонентов модели цифрового следа, а также выявлению преимуществ и перспектив использования цифрового следа в образовательном процессе.

Ключевые слова: модель цифрового следа, образовательная траектория, автоматизированный мониторинг, прогнозирование, образовательный результат.

Введение

В настоящее время процессы цифровизации и автоматизации затрагивают все сферы деятельности человека, в том числе и педагогическую. Достижение более высокой эффективности и качества образования является важнейшей задачей любого образовательного учреждения.

Образовательная деятельность подвергается значительным преобразованиям под воздействием ФГОС ВО — Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования, они охватывают все формы обучения, затрагивают цифровую среду и изменяют методологию обучения. «Изменяются запросы к профессиональным компетенциям современного учителя» [1, с. 69]. Программы и образовательная среда учебного заведения теперь обеспечивают целостное качество, основанное на взаимодействии преподавателей и обучающихся. Для эффективной реализации учебных целей образовательная среда обязана оснащать современные учебные программы, технические ресурсы и инструментарий.

Создание или адаптация, а также внедрение в образовательную практику новых форм, технологий и методов обучения позволяет достичь этих целей.

Материалы и методы

Автором был проведен обзор литературы отечественных авторов по теме исследования. Материалами для статьи послужили теоретические и практические работы, посвященные цифровому следу и перспективам его применения в процессе управления образовательным процессом.

Литературный обзор

Цифровой след образуется в процессе деятельности человека в цифровой среде, включая образовательную и профессиональную деятельность (см. Рисунок 1).

В зависимости от объема имеющейся информации можно собрать большое количество данных о пользователе, используя простые поисковые системы, не прилагая при этом больших усилий.

В российском образовании понятие цифрового следа возникло не так давно. Цифровой след рассматривается как:

- «действия обучающихся в интернет-пространстве, включая презентации, блоги, обсуждения в различных форматах в системе дистанционного обучения, видео-факты и др.» [10, с. 48];
- «как электронная форма представления данных о результатах учебной, профессиональной и социальной деятельности человека» [9].

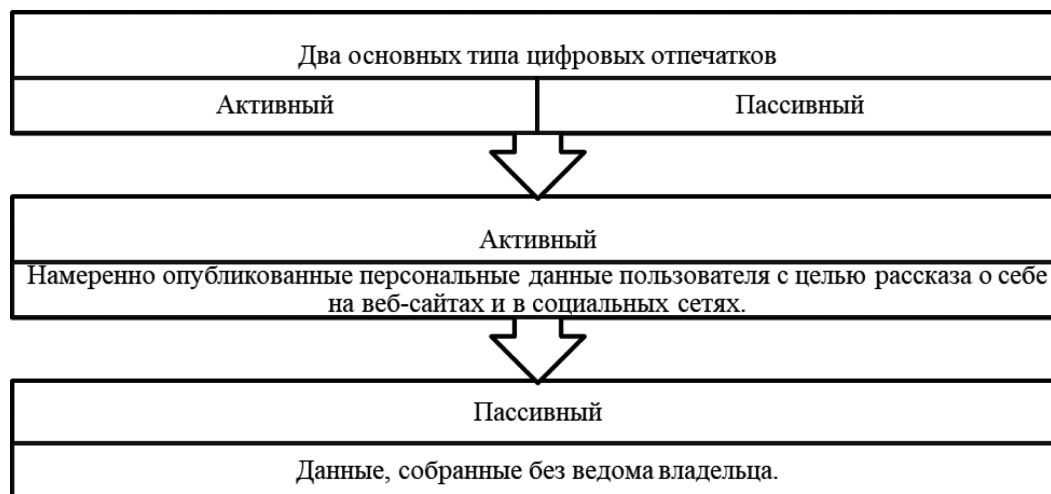


Рис. 1. Два основных типа цифровых отпечатков

«Поэтому его внедрение пока находится на разных этапах: педагогика и технологии совершенствуются параллельно» [6, с. 4].

Баранова Е.В., Скрыпник В.П., Микиденко Н.Л. анализируют механизмы использования цифрового следа в образовании. По мнению Барановой Е.В. «сбор и анализ цифрового следа студента является неотъемлемой частью развития российского образования в условиях цифровой экономики» [2, с. 415]. «Цифровые технологии создали уникальные возможности для анализа образовательной деятельности учащихся и профессиональной деятельности в цифровой образовательной среде» [7, с. 107]. «Значимость внедрения цифровых технологий в высшей школе оказалась особенно актуальной в период пандемии Covid-19» [8, с. 109].

«Пандемия COVID-19 внесла существенные коррективы не только в механизмы взаимодействия участников образовательного процесса, но и в фундаментальные основы функционирования системы образования в целом» [5, с. 35]. В связи с этим, Когтева У.А. описывает перспективные направления применения технологии цифрового следа в образовательном контексте.

«Динамичность изменений, произошедших во внешней среде под влиянием пандемии, заставила переосмыслить традиционные подходы и устойчивые модели в образовании» [4, с. 7]. Так, Габдрахманов Н.К., Орлова В.В., Александрова Ю.К. изучают цифровой след применительно к выпускникам школ.

Результаты

В связи с этим автор предпринял попытку описания и интерпретации модели цифрового следа обучающегося, объединяющей регистрацию событий взаимодействия студента с цифровой образовательной средой, результаты прохождения геймифицированных этапов

обучения и цифровую модель компетенций, что обеспечивает основу для автоматизированного мониторинга и прогнозирования образовательных результатов. Автоматизированный мониторинг позволяет своевременно предпринимать действия по коррекции образовательных результатов. Тогда как их прогнозирование дает возможность разработки рекомендаций по улучшению педагогической деятельности.

Обсуждение

Образовательная аналитика («learning analytics») — методика применения цифровых данных в педагогике, предполагающая сбор, обработку и анализ цифрового следа для улучшения учебного процесса. «Для сбора данных цифрового следа применяют ручной и автоматизированный способы» [3, с. 79]. Она, в частности, способствует разработке персонализированных образовательных траекторий, повышению качества преподавания в вузе и оптимизации процесса обучения, тем самым способствуя повышению его эффективности.

Предлагаемая автором к использованию модель цифрового следа обучающегося, основанная на концепции цифрового следа как основы для автоматизированного мониторинга и прогнозирования образовательных результатов, предполагает:

1. Регистрацию событий взаимодействия студента с цифровой образовательной средой.

Для того чтобы сохранялась возможность использования модели цифрового следа необходимо соблюдать процедуру оперативной и непрерывной фиксации и одновременной регистрации действий студента непосредственно в цифровой образовательной среде.

Большинство образовательных платформ предоставляют список учеников с указанием даты последнего входа. Кроме того, отражается количество загрузок

выполненных заданий и время просмотра материалов. Системы фиксируют статус обучения — начальный, промежуточный или завершённый этап ознакомления с контентом.

2. Организацию сбора, обработки и анализа данных на основе результатов прохождения геймифицированных обучающих модулей.

Информация подобного рода служит ориентиром при проектировании учебной программы — на ее основе корректируется уровень сложности — а также план распределения временных рамок для закрепления отдельных элементов куррикула. Исследование активности учащихся в соцмедиа и мессенджерах раскрывает не формальные статистические данные, а иллюстрирует сам подход в коммуникациях — что ярко проявляется при интерактивах проектной деятельности

При проведении видеоконференций сервисы фиксируют цифровой след пользователей, включая входы и выходы, а также, что принципиально, их познавательную активность в чате, отражающую уровень вовлеченности в учебный процесс. Специализированные платформы для совместной работы с документами также сохраняют сведения о вносимых правках, затрачиваемом времени и других аспектах коллективной деятельности.

То, насколько оптимально и оперативно осуществляется работа над ошибками или доработка документа, также говорит об успеваемости студента. К тому же такая возможность проверки процесса правки документа позволяет преподавателю проверить авторство и самостоятельность выполнения работы студентом.

В рамках образования учебная деятельность студентов не заканчивается работой в LMS Moodle. Но на сегодняшний момент стандартные домашние задания уступают место проектной деятельности, чаще всего носящей командный характер. Обучающиеся работают над проектом во внеклассное время в рамках совместной деятельности.

Анализ цифрового следа, оставляемого в сервисах коллективного проектного взаимодействия, позволяет выявить:

- перечень задач с указанием их текущего состояния и сроков выполнения;
- ответственных лиц, назначенных для выполнения конкретных задач;
- сведения, подтверждающие факт завершения заданий;
- комментарии, касающиеся каждого задания.

В процессе проектной деятельности современными учащимися активно задействуются разнообразные

интернет-сервисы. В них, подобно образовательным платформам, учащиеся оставляют собственные цифровые следы. Значительную долю конкуренции в сегменте программ для совместной работы занимает компания Google. В частности, при работе обучаемой группы в Google Docs преподавателю предоставляется расширенная детализация контента. Она позволяет отследить, какой конкретный участник внёс изменения в общий документ, а также когда именно эти изменения были произведены.

Использование цифрового следа студента в качестве метода оценки позволяет дифференцировать оценки студентов в зависимости от объема и качества выполненной работы над проектом.

Системы цифрового учёта в образовательном процессе помогают преподавателям контролировать не только факт выполнения заданий, но и распределение ролей внутри малых групп, а также динамику онлайн-общения участников. Виртуальные инструменты фиксируют активность пользователей без необходимости физического присутствия педагога.

Общение организовано в чатах: здесь сразу можно увидеть, кто чем занят, при возникновении сложностей участники имеют возможность обратиться за помощью или предложить поддержку.

Сервис Google Docs предусматривает размещение комментариев, доступных всей группе в отдельном окне. Кроме этого, платформа позволяет рекогносцировать коллективные работы с помощью расширенного анализа, выявляя вклад каждого студента в итоговый продукт. Эти данные дают преподавателю более объёмное представление о индивидуальных качествах учащихся и их эффективности при решении учебных задач.

Однако нужно научиться не только собирать эти данные, но и упорядочивать их с целью упрощения проведения дальнейшего анализа. Все события, происходящие в образовательном процессе, должны быть подвержены описанию на одном унифицированном языке и интерпретации в понятной для всех пользователей форме, позволяющей сопоставить образовательных обучающихся, выявить их динамику и тенденции.

В дополнение к традиционным способам оценки качества образования стоит применять методы инжиниринга образовательных данных. Они систематизируют сбор, анализ и визуализацию информации, основанной на отслеживании цифровой активности обучающихся. Это даёт возможность получить объективные количественные характеристики качества образовательного процесса и определить оптимальные педагогические приёмы и условия. Анализ показателей совместной де-

тельности и вклада каждого обучающегося позволяет оценить их вовлечённость и качество усвоения. Оценка эффективности обучения строится на критериях, приведённых в таблице 1.

Таблица 1.

Принципы оценки качества и эффективности обучения

Наименование принципа	Описание принципа
Конкретность	Четкое определение критериев и оценочной базы оценивания, подходов к ее измерению.
Целостность	Обеспечение полного объема требований к образовательным результатам.
Технологичность	Обоснованность методологических и технологических средств получения оценочной информации и выполнение необходимых вычислений.

3. Формирование цифровой модели компетенций.

В модели цифрового следа можно выделить целый ряд компонентов (Табл. 2).

Цифровой след учащихся в системе во многом формируется за счёт записей, связанных с их участием в оценочных мероприятиях, где проверяются компетенции. Именно этот аспект цифрового следа является наиболее значимым, поскольку он отражает уровень овладения ключевыми знаниями и умениями, благодаря которым учащийся может освоить особенности будущей профессиональной деятельности, а именно:

- выставленные оценки за выполненные задания;
- отчёты и обзоры учебной деятельности с обратной связью преподавателя;
- электронно оформленные сертификаты и дипломы, удостоверяющие достижения.

Анализ цифровых результатов позволяет педагогу оценить качество контрольно-измерительного материала. Значительное число низких баллов указывает на необходимость пересмотра формулировок тестовых заданий либо изучаемого материала. Высокий процент правильных ответов (от 90 и выше) свидетельствует о уместности формулировок задач.

Заключение

Таким образом для того, чтобы помогать студентам строить свои индивидуальные образовательные траектории и следовать им, необходимо провести ряд цифровых реформ: осуществлять регистрацию событий взаимодействия студента с цифровой образовательной средой, а также проводить сбор, обработку и анализ результатов прохождения геймифицированных этапов этих траекторий.

Современные технологии способны быстро распознавать голос и лица, трансформируя речь в текст и обратно. Анализ цифрового следа обеспечивает возможность изучения и оценки учебной активности студентов:

- раскрывает способности каждого обучаемого, поддерживая персонализированные маршруты развития;

Таблица 2.

Компоненты модели цифрового следа

Наименование компонента	Описание компонента	Примеры
Технический и технологический компонент	Представляет собой отражение активности человека в Интернете и другом цифровом пространстве с точки зрения использования технологий фиксации.	Например, лог-файлы, IP-адреса, идентификаторы точек доступа, адреса запрашиваемых веб-страниц, введенные биометрические данные, параметры протоколов обмена информацией, геометрические и геолокационные данные о перемещениях и так далее.
Личностно-психологический компонент	Отражает социальный профиль человека и его личный виртуальный мир в медиaprостранстве.	Например, информацию в аккаунтах социальных сетей, постах, фотографиях, комментариях, репостах, лайках, аккаунтах в онлайн-играх и так далее.
Компонент активности	Включает данные на цифровых носителях (файлах) с фактическими результатами деятельности или их подтверждением (продукты деятельности, артефакты, электронное портфолио).	Например, отчеты о выполненных работах, компьютерные презентации, проекты, компьютерные модели, включая разработанный программный код, спроектированные базы данных, видео-результаты, фотографии, аудиозапись мероприятий, протоколы испытаний и так далее.
Коммуникативный компонент	Связан с системой коммуникации в образовательной и профессиональной среде	Например, сообщения с форумов, открытых чатов, общей почты, досок объявлений и так далее.
Рефлексивный компонент	Самоанализ результатов образовательной и профессиональной деятельности.	Примерами рефлексии являются результаты анкетных опросов, социологических исследований и так далее.

- формирует среду, благоприятную для адаптивного образования, предоставляя множество вариантов развития, учитывая уникальные черты личности, образовательные достижения и запросы учащихся;
- гарантирует постоянное слежение за деятельностью и степенью развития компетенций обучаемых.

Данные большого объёма и аналитика находят применение в проектах, способствуя формированию команд и индивидуальной адаптации образовательных программ.

Основываясь на анализе и специальной обработке цифрового следа, преподаватели могут давать реко-

мендации студентам, тем самым направляя их учебную деятельность и делая обучение более индивидуально ориентированным, выявляя и отмечая более или недостаточно развитые компетенции каждого.

Однако, взаимодействие пользователей с информационными базами подразумевает обмен не только знаниями, но и данными. Поэтому нельзя пренебрегать обеспечением защиты информации, оставленной пользователями в виде цифрового следа, по которому могут пойти не только преподаватели, но и мошенники, заинтересованные в получении личных данных с целью их дальнейшего использования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жигалова О.П. Формирование образовательной среды в условиях цифровой трансформации общества // Ученые записки Забайкальского государственного университета. — 2019. — Т. 14. — № 2. — С. 69–74.
2. Баранова, Е.В. Методы и инструменты для анализа цифрового следа студента при освоении образовательного маршрута / Е.В. Баранова, Г.В. Швецов // Перспективы науки и образования. — 2021. — № 2(50). — С. 415–430.
3. Богданова, А.Н. Обучение школьников сбору, анализу и защите данных собственного цифрового следа / А.Н. Богданова, Г.А. Федорова // Информатика в школе. — 2024. — Т. 23, № 5. — С. 78–84.
4. Габдрахманов, Н.К. Цифровой след в прогнозировании образовательной стратегии выпускников школ / Н.К. Габдрахманов, В.В. Орлова, Ю.К. Александрова // Университетское управление: практика и анализ. — 2021. — Т. 25. — № 3. — С. 6–13.
5. Когтева, У.А. Цифровые следы и перспективы их применения в процессе управления образовательным процессом / У.А. Когтева // Социальногуманитарные технологии. — 2021. — № 4(20). — С. 35–41.
6. Курзаева, Л.В. Анализ и обработка данных цифрового следа обучающихся / Л.В. Курзаева, Л.И. Савва, Е.К. Назарова, А.Р. Абзалов, Д.А. Килиевич // Мир науки. Педагогика и психология. — 2022. — Т. 10. — № 6.
7. Микиденко, Н.Л. Цифровой след в доказательном образовании / Н.Л. Микиденко // Актуальные вопросы совершенствования среднего профессионального и высшего образования в современных условиях: Материалы LXIII межвузовской науч.-метод. конф., Новосибирск, 27–28 апреля 2022 года. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2022. — С. 107–110.
8. Скрыпник, В.П. Практика применения цифрового следа в образовании / В.П. Скрыпник // Известия Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота: психолого-педагогические науки. — 2022. — № 1(59). — С. 109–110.
9. Стандарт цифрового следа // Университет 20.35: [сайт]. — URL: <https://standard.2035.university/v1.0.2> (дата обращения: 17.10.2025).
10. Шамсутдинова Т.М. Когнитивная модель траектории электронного обучения на основе цифрового следа. // Открытое образование. — 2020. — № 24 (2). — С. 47–54.

© Степанов Михаил Александрович (mas65@tpru.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ЭВОЛЮЦИЯ ЦИФРОВОГО СУВЕРЕНИТЕТА В ГОСУДАРСТВЕННОМ УПРАВЛЕНИИ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОБЛАЧНЫХ СТРАТЕГИЙ

THE EVOLUTION OF DIGITAL SOVEREIGNTY IN PUBLIC GOVERNANCE: A COMPARATIVE ANALYSIS OF CLOUD STRATEGIES

**I. Superekin
M. Osorkina**

Summary. The article examines the evolution and diversification of governmental cloud strategies through the lens of digital sovereignty as a key priority of contemporary public policy. Using the examples of the United States of America, Italy, Singapore, and the United Arab Emirates, the study identifies a shift from the early «Cloud First» paradigm toward more mature hybrid, multi-cloud, and sovereign architectures. The analysis demonstrates that digital sovereignty possesses a multidimensional nature — legal, institutional, technological, and human. A comparative assessment of the four cases reveals that federal states tend to adopt decentralized, multi-cloud models that enhance flexibility and risk diversification, whereas unitary systems favor the development of centralized sovereign platforms. The findings indicate that there is no universal model of digital sovereignty; its configuration depends on the form of government, the level of institutional digital maturity, and priorities of security and cost optimization. As a persistent trend, the paper highlights the «Cloud Smart + Cloud Native» nexus, which ensures data portability across cloud environments, enables managed security, and reduces dependence on a single provider. The research contributes to understanding how national governments approach cloud transformation amid increasing geopolitical and digital fragmentation.

Keywords: digital sovereignty, governmental cloud strategies, sovereign cloud, digital transformation, public sector governance.

Суперекин Игорь Юрьевич

Руководитель направления по стратегическому
развитию ООО «Единая цифровая платформа»,
г. Москва

igor.superekin@yandex.ru

Осоркина Маргарита Александровна

Главный специалист по стратегическому развитию
ООО «Единая цифровая платформа», г. Москва
margo21@yandex.ru

Аннотация. Статья исследует эволюцию и диверсификацию государственных облачных стратегий сквозь призму формирования цифрового суверенитета как ключевого приоритета современной государственной политики на примере Соединенных Штатов Америки, Италии, Сингапура и Объединенных Арабских Эмиратов, фиксируя сдвиг от облачной стратегии «Cloud First» к более зрелым гибридным, мультиоблачным и суверенным архитектурам. Показано, что цифровой суверенитет имеет многомерную природу — правовую, институциональную, технологическую и кадровую. На примере сопоставления четырех стран отмечается, что федеративные государства склонны к децентрализации и использованию мультиоблачных решений, обеспечивающих гибкость и диверсификацию рисков, тогда как унитарное государственное устройство предполагает развитие централизованных суверенных платформ. Методологически работа опирается на сравнительный и аналитический подходы с использованием официальных документов и современной научной литературы. Сделан вывод, что универсальной модели цифрового суверенитета не существует; выбор конфигурации определяется формой государственного устройства, уровнем цифровой зрелости институтов и приоритетами безопасности и стоимости. В качестве устойчивого тренда выделяется связка «Cloud Smart + Cloud Native», обеспечивающая переносимость данных в облачную среду, управляемую безопасность и снижение зависимости от одного поставщика. Статья позволяет оценить различные государственные подходы к облачной трансформации в контексте растущей геополитической и цифровой фрагментации.

Ключевые слова: цифровой суверенитет, государственные облачные стратегии, суверенные облака, цифровая трансформация, государственное управление.

Введение

Развитие цифровых сервисов вынуждает государства ускоренно модернизировать ИТ-инфраструктуру. International Data Corporation (IDC)[1] и ряд других источников [2], прогнозируют, что объём ежегодно генерируемых глобальных цифровых данных вырастет до 175 зеттабайт в 2025 году, что соответствует среднегодовому темпу роста около 27–30 %. Такой рост

цифрового трафика, объёмов хранения данных, числа подключённых устройств и облачных сервисов оказывает беспрецедентное давление на государственные и корпоративные ИТ-системы, требуя масштабируемых и устойчивых архитектур.

В 2011 году в США в рамках Federal Cloud Computing Policy была представлена политика Cloud First. Предпосылками её появления являлись: низкий уровень

использования государственных ИТ-активов, фрагментарный спрос на ресурсы, дублирующие друг друга ИТ-системы, а также длительные сроки закупок, что в итоге в комплексе негативно влияло на способность Правительства США эффективно выполнять свои функции [3]. Таким образом, первые облачные решения ориентировались на скорость миграции, зачастую игнорируя риски зависимости от поставщиков облачных решений (vendor lock in), юрисдикции переносимых в облачные инфраструктуры данных и устойчивости операций в облачной среде. После проведения массовой миграции сервисов и внедрения облачно-ориентированных подходов, акцент от перехода в облачную инфраструктуру сместился к защите данных и ценовой политике. В статье рассматривается переход от модели Cloud First к моделям Cloud Smart и «суверенных облаков» как способ нивелирования перечисленных выше рисков.

Несмотря на активное внедрение облачных технологий в государственном секторе, на сегодняшний день не найдена единая устойчивая и универсальная модель, эффективно сочетающая цифровую эффективность, безопасность и государственный суверенитет. Разные страны выбирают разные траектории — от децентрализованной мультиоблачной архитектуры до централизованного подхода с государственным контролем. Такая фрагментарность и разнообразие стратегий в сфере цифрового управления требует теоретического осмысления, сравнительного анализа и выявления основных факторов выбора определенной модели.

Цели и задачи исследования

Целью исследования является проведение анализа эволюции облачных стратегий в государственном секторе в контексте возрастающей значимости цифрового суверенитета и выявление ключевых типологических моделей, формирующихся в различных странах. В качестве эмпирической базы рассматриваются кейсы США, Италии, Сингапура и ОАЭ с различными геополитическими, экономическими и регуляторными условиями.

Задачами исследования являются:

1. Оценка концепции цифрового суверенитета с идеологической, институциональной и технологической точек зрения.
2. Анализ роли гибридных, мультиоблачных и суверенных моделей в формировании государственной цифровой инфраструктуры и их вклад в достижение цифрового суверенитета страны.
3. Проведение системного сравнительного анализа подходов к облачной трансформации и реализации цифрового суверенитета в выбранных странах, выявляя сходства, различия и определяющие факторы, включая форму государственного устройства.

Концептуальные рамки и Методология

1. Цифровой суверенитет как многомерное явление

Цифровой суверенитет представляет собой не только нормативную позицию о контроле над данными, но и стратегическую реакцию государств на вызовы глобализации. Как политика, он включает разработку нормативно-правовых актов, регулирующих хранение, передачу и обработку данных в рамках национальной юрисдикции.

Научная литература подчёркивает неоднозначный характер цифрового суверенитета как концепции. В статье «Sovereignty in the Digital Era: Rethinking Territoriality and Governance in Cyberspace» (Digital Society, 2025) [4] отмечается трансформация понятия суверенитета в условиях киберпространства. Авторы показывают, что государства стремятся формализовать контроль над цифровой инфраструктурой через юридические, технические и территориальные механизмы, тем самым адаптируя классическое понимание юрисдикции к глобальной цифровой среде. К числу юридических инструментов относятся нормативные инициативы Европейского союза, такие как General Data Protection Regulation (GDPR), Data Governance Act (2022) и Data Act (2023), в качестве технических механизмов анализируются китайская система обязательной идентификации пользователей (real-name registration), а также проекты по созданию национальных дата-центров и облачных сервисов. Территориальные механизмы проявляются в стремлении государств контролировать критическую инфраструктуру, включая подводные кабели, в политике локализации хранения данных и в формировании обособленных цифровых сегментов.

Современные трактовки цифрового суверенитета выходят за пределы юридического обладания данными. В статье «Data Sovereignty in Information Systems» (Electronic Markets, 2024) [5] под данным понятием понимается способность субъектов — включая государства — самостоятельно устанавливать правила хранения и передачи данных, а также управлять правами на цифровые ресурсы. Речь идёт не только о защите или локализации информации, но и о создании системной архитектуры управления, в рамках которой операторы цифровых сервисов обязаны действовать в соответствии с политическими и правовыми нормами конкретной юрисдикции.

Дополнительный контекст даёт анализ стран БРИКС (2024) [6], согласно которому контроль над трансграничной передачей, хранением и использованием данных стал ключевым элементом цифровой трансформации. В этой модели цифровой суверенитет — не только защита от внешних угроз, но и формирование автономной

инфраструктуры и правил обработки информации, соответствующих национальным интересам. Важным аспектом цифрового суверенитета становится не только и не столько контроль над данными, но и развитие собственной ИТ-экосистемы.

Важным аспектом цифрового суверенитета является развитие собственной ИТ-инфраструктуры, включая локальные дата-центры. Авторы подчеркивают, что устойчивое управление данными в условиях цифрового суверенитета требует локализованных облачных платформ и совместимых архитектур, подкреплённых национальными компетенциями в сфере администрирования, безопасности и разработки. Без наличия кадрового ресурса и физической инфраструктуры, обладающей гарантированной территориальной юрисдикцией, цифровая автономия государств остаётся формальной (Galij et al., 2024) [7]. Обзор «Developing Skills for Digital Government» (OECD, 2024) подтверждает, что успешная цифровая трансформация и автономность цифровых сервисов невозможны без системного подхода к развитию компетенций в государственном секторе: облачные технологии, кибербезопасность и управление данными должны быть включены в образовательные программы для госслужащих и технических кадров [8].

Соответственно, цифровой суверенитет формируется через комплексный подход, объединяющий развитие инфраструктуры с целенаправленной кадровой политикой, ориентированной на подготовку специалистов, способных управлять критичной цифровой средой независимо от внешних поставщиков.

Политическая реализация цифрового суверенитета существенно различается между странами в зависимости от формы государственного устройства, которая предопределяет институциональные и инфраструктурные стратегии в сфере облачных технологий, контроля над данными и цифровой трансформации.

США как федерация демонстрируют модель, при которой суверенитет рассматривается как функция рыночной конкурентоспособности и агентской автономии. Исследователи из Brookings Institution подчёркивают, что американский подход способствует инновациям частного сектора, используя экспортные ограничения и развитие национальных цепочек поставок, а не централизованный контроль данных [9].

В Европейском Союзе как надгосударственном образовании цифровой суверенитет трактуется как средство защиты прав человека, конфиденциальности и цифрового гражданства. Исследование «Contested Spatialities of Digital Sovereignty» подчёркивает, что инициативы Gaia-X и политик Европейского совета создают инфраструктуру, обеспечивающую «технологическую автономию», при этом балансируя интересы государств-членов [10].

В странах Персидского залива (смешанная модель, с элементами как федерализма, так и унитаризма) суверенитет представляет собой инструмент контроля национальной безопасности и развития кадрового потенциала внутри страны.

Анализ ECFR указывает, что централизованные цифровые платформы и жесткое государственное регулирование — модели, сочетающие элементы федерализма (например, в ОАЭ) с авторитарным управлением [11].

Таким образом, цифровой суверенитет представляет собой многомерное явление, формирующееся на пересечении политических решений, экономических интересов, технологических возможностей и общественных представлений о контроле над данными. Его реализация опирается как на инфраструктурные компоненты (например, облачные платформы и дата-центры), так и на институциональные механизмы (нормативное регулирование, стратегическое планирование), а также на ориентиры, определяющие, какие цифровые ресурсы считаются критически важными для государства и общества.

Дополнительно, форма государственного устройства влияет на конфигурацию цифровой политики и степень распределения ответственности за управление данными и инфраструктурой.

2. Ключевые облачные модели и типы облачной архитектуры.

2.1. Стратегия Cloud First Стратегия Cloud First была официально объявлена в США как часть плана реформирования федеральной ИТ-сферы. 9 декабря 2010 г. главный федеральный CIO США Вивек Кундра опубликовал 25-пунктный план «A 25-Point Implementation Plan to Reform Federal IT Management» [12], где впервые был предложен перенос приложений и данных в облачные инфраструктуры: «Каждое агентство должно внедрять облачные решения, если они надёжные, безопасные и экономически эффективные».

8 февраля 2011 года, Административно-бюджетное управление США выпустило «Federal Cloud Computing Strategy», закрепляющую стратегию Cloud First как обязательную политику при планировании и приобретении ИТ-услуг федеральными агентствами [3]. Однако, исследования показывают, что правительственные инициативы Cloud First, хотя и стимулировали быстрый переход к облачным решениям, столкнулись с рядом сложностей:

— Vendor lock-in и технологическая замкнутость — Khajeh-Hosseini и соавт. (2010) в работе The Cloud Adoption Toolkit указывают, что миграция в публичное облако усиливает зависимость от конкретного провайдера, особенно в условиях отсутствия единых стандартов API и переносимых

архитектур. Это осложняет возврат к альтернативным системам или переход к другой облачной платформе без существенных затрат и технических рисков [13].

- Legacy-системы и институциональная неподготовленность — Fahmideh et al. (2020) выявили, что ключевым барьером при реализации облачных стратегий является неподготовленность устаревших систем (legacy software) и ограниченность компетенций ИТ-персонала. Даже при наличии политической воли, техническая и организационная среда не всегда позволяет реализовать миграцию эффективно и безопасно [14].
- Восприятие рисков в государственном секторе — Elena & Johnson (2015), исследуя стратегию Cloud First в контексте Великобритании, показывают, что восприятие рисков безопасности и приватности может снижать готовность к миграции в 26 раз. Это особенно характерно для министерств и ведомств, работающих с персональными и чувствительными данными. Несмотря на внедрение стратегии Cloud First в Великобритании в 2013 году в рамках программы G-Cloud, реальные темпы миграции зависели от культурной и институциональной восприимчивости к цифровым рискам [15].

2.2. Стратегия Cloud Smart

В итоге все эти аспекты привели к пересмотру стратегии Cloud First и ее последующей эволюции в стратегию Cloud Smart, которая предполагает более взвешенный подход к выбору облачных решений, учитывающий безопасность, стоимость, эффективность и соответствие регуляторным требованиям.

В 2018 году была опубликована обновленная федеральная стратегия облачных вычислений Federal Cloud Computing Strategy [16]. Стратегия Cloud Smart подчёркивала, что государственные органы должны оценивать не только технические и финансовые аспекты миграции сервисов и приложений в облачную среду, но и влияние облачных решений на конечных пользователей. Этот подход отражён в докладе Административно-бюджетного управления США (2018), где подчёркивается необходимость «информационно обоснованного принятия решений, в которых госорганы оценивают затраты и выгоды в свете миссии, пользователя и риска».

Кроме того, отличием Cloud Smart от Cloud First стала гибкость принимаемых решений: госорганы получили больше автономии в решении, какие приложения переводить в облако, а какие оставить в локальной инфраструктуре, исходя из своих целей, миссии и технической готовности.

2.3. Мультиоблачная архитектура

Стратегия Cloud Smart заложила мультиоблачный подход к получению облачных услуг с возможностью вовлечения множества поставщиков услуг. Согласно исследованию в «Journal of Cloud Computing & e-Government» (2025) [17], правительства демонстрируют наиболее устойчивые и масштабные модели миграции в облако именно тогда, когда переход сопровождается институциональными механизмами, включая стандарты, сертификацию и обучение кадров, что подтверждает, что зрелая стратегия обеспечивает не просто перенос в облако, а формирование цифровой зрелости на уровне государственной ИТ-инфраструктуры.

Мультиоблачная архитектура (multi-cloud) представляет собой модель, при которой организация использует услуги более чем одного облачного провайдера (обычно публичных), распределяя рабочие нагрузки между различными платформами в зависимости от функциональных, экономических и регуляторных требований. Такая стратегия не обязательно включает локальные инфраструктуры, а сосредоточено на диверсификации поставщиков облачных услуг. Согласно исследованию Saxena et al. (2021) [18], мультиоблачная модель позволяет избежать зависимости от одного поставщика (vendor lock-in), повысить отказоустойчивость и гибкость размещения сервисов с учётом требований локализации данных и законодательных ограничений в различных юрисдикциях. Мультиоблако также обеспечивает возможность оптимизации затрат за счёт выбора наиболее выгодных сервисов у разных провайдеров (Saxena et al., 2021) [18]. Также исследования показывают, что мультиоблачные конфигурации требуют довольно высокого уровня зрелости ИТ-управления: от архитектурного моделирования до внедрения механизмов мониторинга, идентификации угроз и реализации стандартов, таких как zero-trust и автоматизированные CI/CD процессы (Polinati, 2025) [19].

Мультиоблачные стратегии становятся всё более значимыми в государственных информационных системах, особенно в контексте цифрового суверенитета, распределения рисков и соответствия международным регуляциям. Их применение требует зрелой ИТ-инфраструктуры, развитых механизмов управления и унификации стандартов безопасности.

2.4. Гибридная архитектура

Гибридная архитектура — это комбинация публичных и частных облаков с возможностью избирательного размещения сервисов в зависимости от уровня чувствительности данных. Преимуществами гибридной архитектуры являются гибкость и снижение издержек (Polinati, 2025) [19]; обеспечение безопасности за счёт

локального контроля над критичной информацией (Khadilkar et al., 2011) [20]; архитектурную совместимость (Venkateswaran & Sarkar, 2018)[21].

Гибридное облако позволяет использовать ресурсы публичного облака для масштабируемости и инноваций, сохраняя при этом суверенитет и соответствие регуляторным требованиям.

2.5. Суверенная архитектура

Суверенное облако — специальная облачная платформа, разработанная для обеспечения полного контроля над инфраструктурой, операциями и данными в рамках конкретной юрисдикции, что позволяет государству сохранять суверенитет над критически важной цифровой средой.

Основные преимущества:

- Юридический контроль. Суверенные облачные решения разворачиваются на территории государства и подпадают под действие его законов, что устраняет риск экстерриториальных претензий (например, по CLOUD Act США).
- Повышенная безопасность. Архитектура таких облаков часто включает механизмы zero-trust, шифрование, ключи, хранящиеся на территории государства, и участие в эксплуатации только аккредитованных сотрудников-граждан.
- Соответствие регуляторным требованиям. Суверенные облака позволяют соответствовать локальным законам о защите персональных данных (таких, как например, General Data Protection Regulation, включая обязательства по локализации и защите критической инфраструктуры).
- Интеграция в мульти- и гибридную экосистему. Суверенные облака выступают как надежная база для размещения чувствительных сервисов, интегрируясь с публичными облаками для масштабируемых нагрузок, что делает их важной частью зрелых архитектурных стратегий (мульти+гибрид).

В то же время всё чаще используется концепция «суверенитета как сервиса» (*sovereignty-as-a-service*), активно продвигаемая глобальными облачными провайдерами и представляющая цифровую независимость в форме внешних технологических решений. Grohmann и Barbosa (2025) [22] отмечают, что технологические гиганты, такие как Amazon, Microsoft и Google, предлагают «суверенитет как сервис», позиционируя свои облачные решения как инструменты для достижения цифрового суверенитета государствами. Однако, по мнению авторов, эта концепция представляет собой коммерческую стратегию, которая может создавать иллюзию контроля при фактической зависимости государства от внешней инфраструктуры и сервисов.

В отличие от предложения облачных провайдеров, национальные стратегии цифрового суверенитета ориентируются на реальный контроль, институционализацию и автономное управление инфраструктурой. Суверенные облака обеспечивают контроль на архитектурном, правовом и операционном уровнях, снижая зависимость от внешних платформенных решений и укрепляя долгосрочную цифровую устойчивость государства.

Исследование «Government Cloud Computing and National Data Sovereignty» (Irion K., 2012) подчёркивает факт, что государства не могут полагаться на технологии или договоры для защиты государственных данных, им нужны суверенные облачные стратегии [23] и инфраструктуры, разработанные с учетом национального суверенитета, обеспечивающие контроль над цифровыми активами[24].

2.6. Использование подхода Cloud native при разработке приложений.

Согласно прогнозу IDC FutureScape: Worldwide Cloud 2024 Predictions — Asia/Pacific (Excluding Japan) (IDC, 2023), в Азиатско-Тихоокеанском регионе наблюдается устойчивый сдвиг в сторону cloud-native архитектуры и интеграции искусственного интеллекта в процессы обеспечения безопасности. По оценке IDC, к 2025 году около 50 % организаций региона сформируют стратегические партнёрства с облачными провайдерами, что позволит ускорить внедрение решений на базе cloud-native-технологий, включая платформы для генеративного искусственного интеллекта, инструменты для разработчиков и инфраструктурные сервисы [25]. Аналитики Gartner (2023) выносят в топ государственных трендов облачную модернизацию устаревших систем и «суверенные облака», что подтверждает движение к cloud-native архитектурам в госуправлении [26].

Таким образом, подход «Cloud Smart + Cloud Native» обеспечивает долгосрочную устойчивость, снижает зависимость от одного поставщика и становится технологической основой для мультиоблачности и цифрового суверенитета.

3. Материалы и методы исследования

Материалами для исследования послужили официальные государственные документы (стратегии, национальные программы развития облачных вычислений, нормативно-правовые акты), аналитические отчеты ведущих консалтинговых компаний: «Gartner», «IDC» и другие. Также использована информация из современных научных статей, монографий и публикаций профильных сайтов. При описании моделей цифрового суверенитета и облачных вычислений в выбранных странах применены сравнительный и аналитический методы.

Для качественного сравнительного анализа выбраны США, Италия, Сингапур и ОАЭ — страны, являющиеся примерами разных политических, институциональных, экономических и географических условий, оказывающих непосредственное влияние на стратегии облачных решений и цифрового суверенитета.

Соединённые Штаты Америки были первой страной, системно внедрившей государственную стратегию облачной трансформации [3,16]. Благодаря своему экономическому и научному потенциалу, технологической инфраструктуре, США выступают не столько как потребитель, сколько, как экспортер облачных стандартов.

Академический обзор *Columbia Law Review* [27] подчёркивает, что облачные архитектуры, созданные на территории США, становятся основой юридической юрисдикции и цифрового контроля, включая механизм *CLOUD Act*.

Это делает США репрезентативным примером не только с точки зрения технологической инициативы, но и юридического воздействия на архитектуру глобальных облаков, что принципиально для целей настоящего сравнительного анализа.

Выбор Италии для анализа обусловлен ее членством в ЕС, реализацией *Strategia Cloud Italia* и *National Strategic Hub* и встраиванием интересов национального суверенитета в рамки наднационального *GDPR/GAIA-X*.

В европейском контексте цифровой суверенитет рассматривается и как способ объединить инновации с контролем отмечается при анализе облачных инициатив ЕС с цифровым суверенитетом [28].

Сингапур представляет собой унитарное технократическое государство, реализующее программу «*Smart Nation*» с 2014 г., проводящее активную политику переноса систем государственного управления в облачную среду и управлением идентификацией граждан посредством единого *SingPass*.

В статье *Cloud Computing in Singapore* [29] указаны пять ключевых драйверов цифровизации госучреждений Сингапура, включая стратегическое реформирование агентств и создание платформ национального уровня.

ОАЭ — единственная в данном перечне федеративная монархия с суверенной облачной платформой *FedNet*.

Источники указывают на активную роль государства в разработке суверенных облаков как ключевого инструмента национальной безопасности.

В заключении можно отметить, что выбранные для анализа страны обеспечивают не только разнообразие институциональных моделей: от федерации до централизованной монархии и стратегий облачных решений, но и баланс между инновациями, юрисдикцией и безопасностью, необходимый для качественного анализа цифрового суверенитета и облачной зрелости.

4. Тренды

4.1. Суверенизация данных

Суверенизация данных — это институционально оформленный процесс, в рамках которого государства стремятся установить полный контроль над данными, находящимися в пределах их юрисдикции. Включает два ключевых направления:

- Строительство национальных дата-центров — физическая локализация хранения и обработки данных на территории государства.
- Создание локальных технических команд и подразделений, обеспечивающих эксплуатацию в соответствии с национальными требованиями.

Исследования подтверждают, что такие меры являются не просто регуляторными, но и стратегически оправданными, направленными на укрепление технологической автономии и устойчивости к внешним рискам:

В публикации «*“Data localization”: The internet in the balance*» (Taylor, Telecommunications Policy, 2020) подчёркивается глобальный тренд к обязательной локализации данных, мотивированный соображениями национальной безопасности и цифрового суверенитета, особенно в отношении критичной инфраструктуры [30].

Fratini (2024) в статье «*Data localization as contested and narrated security in the age of digital sovereignty*» показывают на примере Швейцарии, что локализация данных рассматривается как комплекс технологических и институциональных мер, формирующий цифровую автономию через контроль над данными и национальными сегментами сети. [31].

Таким образом, суверенизация данных является системным компонентом государственной цифровой политики, направленным на снижение зависимости от иностранных поставщиков, создание инфраструктурной и кадровой устойчивости, а также укрепление общественного доверия через визуализацию контроля над цифровыми границами.

4.2. Перевод в облако вычислений и хранения данных

Переход вычислительных ресурсов и систем хранения данных в облачные инфраструктуры остаётся ключевым направлением цифровой трансформации.

В последние годы наблюдается значительный рост облачной инфраструктуры: компании активно переходят от локальных ИТ-решений к облачным платформам. Согласно данным отчёта SQ Magazine Cloud Adoption Statistics (2025) [32], более 80 % компаний среднего бизнеса перенесли более половины рабочих нагрузок в облачную среду. всех корпоративных рабочих нагрузок, более 90 % предприятий в 2025 году будут использовать облачные сервисы, что подтверждает устойчивую тенденцию к доминированию облачных архитектур в корпоративных ИТ-системах. Этот показатель отражает общий вектор цифровой трансформации — переход от капиталоемких дата-центров к гибким облачным моделям обслуживания. Наряду с этим развиваются ключевые технологии, такие как искусственный интеллект, периферийные вычисления, которые становятся неотъемлемой частью облачных платформ.

В условиях динамической масштабируемости облака позволяют обрабатывать огромные объёмы данных с минимальными задержками и высокой доступностью. При этом архитектуры, основанные на периферийных и бессерверных вычислениях, обеспечивают экономию затрат, ускоренное развёртывание сервисов и снижение необходимости в капитальных вложениях.

Основные выводы:

- ИТ-инфраструктуры переориентируются на модель, где облачные сервисы являются центром при разработке и масштабировании;
- Облачное хранение и вычисления становятся не опцией, а стратегическим выбором для реализации сложных задач;
- Использование современных подходов (бессерверные вычисления, автоматизация, zero-trust) обеспечивает устойчивость при росте нагрузки и требований;
- Таким образом, массовый переход на облачные вычисления и хранение — это не просто техническая переориентация, а институционально поддерживаемая стратегия, лежащая в основе цифровой зрелости организаций и государства.

4.3. Репатриация чувствительных данных и вычислений на приватные облака

Обязательное соблюдение требований законодательства по обработке данных (например, GDPR в ЕС) делает публичные инфраструктуры менее предпочтительными для регламентированных данных. Исследование Jewargi (2023), опубликованное в Scholars Journal of Engineering and Technology [33], указывает, что более 80 % организаций в США вернули некоторые нагрузочные задачи на собственную инфраструктуру для обеспечения безопасности и снижения рисков контроля данных.

Меры по репатриации, согласно Wu (2021) [34], являются важным элементом институционального контроля над цифровыми инфраструктурами, направленным на защиту национального суверенитета над данными. Fratini et al. (2024) [35] подтверждают, что контроль над инфраструктурой и юрисдикцией является ключевой составляющей цифрового суверенитета, причём репатриация данных выступает одним из ключевых инструментов этой стратегии.

5. Сравнительный анализ моделей цифрового суверенитета

5.1. США: федеративная модель облачных стратегий

США представляют собой федеративное государство с высоким уровнем децентрализации, где федеральные и региональные органы исполнительной власти обладают автономией в разработке и реализации ИТ-стратегий. Это обуславливает реализацию модели облачного управления, основанную не на централизованном внедрении, а на политике координирования, в рамках которой каждое агентство адаптирует облачные решения под свои цели.

Стратегия Cloud First (2010)[3] была разработана как мера ускоренного перехода к использованию публичных облаков, ориентированная на сокращение затрат и повышение эффективности. Однако, принимая во внимание все сложности, с которыми столкнулись органы власти при ее внедрении, описанные во введении к статье, стратегия эволюционировала в стратегию Cloud Smart с акцентом на оценку рисков кибербезопасности, соответствие требованиям регулятора и оптимизацию затрат и пользовательского опыта.

Согласно отчёту Конгресса США *Cloud Smart: Federal Cloud Computing Strategy* (CRS Report R46119, 2020), стратегия *Cloud Smart* была направлена на повышение эффективности и гибкости государственных ИТ-закупок, включая сокращение избыточных централизованных закупочных моделей и дублирующих расходов [36], благодаря использованию облачных сервисов федеральные агентства сэкономили почти 300 млн долларов. Нормативное регулирование обеспечивается посредством применения FedRAMP (Federal Risk and Authorization Management Program) [37], механизма стандартизированной оценки безопасности облачных сервисов для федеральных учреждений. Он обеспечивает соответствие NIST 800-53 и предоставляет единый каталог аккредитованных провайдеров и NIST Cloud Computing Standards [38], которые формируют технические рамки для идентификации облачных моделей и обеспечения совместимости, безопасности и управления доступом.

Эти инструменты позволяют сочетать открытость инфраструктурных решений с регламентированной безопасностью и управляемостью.

Несмотря на то, что США не декларируют цифровой суверенитет как отдельную политику на уровне государства, он де-факто реализуется через развитие специализированной инфраструктуры для предоставления услуг облачных вычислений для государственных органов (AmazonWeb Services GovCloud, Azure Government, Google Cloud for Gov); контроль над облачными технологиями и их экспортом через экстерриториальное правоприменение CLOUD Act[39]).

Таким образом, сочетание экономического лидерства, правовой экстерриториальности и технической стандартизации обеспечивает Соединённым Штатам Америки уникальное положение, где мы можем рассматривать облачные сервисы как инфраструктуру глобального технологического влияния.

5.2. Италия: европейская модель суверенного облака

Италия как член Европейского Союза реализует цифровой суверенитет в рамках общеевропейской нормативной архитектуры, включая применение Общего регламента защиты данных (General Data Protection Regulation) и требований GAIA-X. Национальная стратегия ориентирована на снижение зависимости от неевропейских поставщиков облачных решений, усиление институционального контроля и защиту цифровой инфраструктуры. По мнению Jean-Pierre Darnis (2018)[40], облачные архитектуры и технологические платформы всё чаще рассматриваются как новые границы государственного суверенитета, требующие политического и правового закрепления: «Нация должна учитывать технологические границы как часть суверенных интересов».

В 2021 году была утверждена Strategia Cloud Italia[41], предполагающая создание Polo Strategico Nazionale (NSH) — суверенного национального облака. Его цель — объединить критичные государственные сервисы в централизованной, управляемой на территории Италии облачной инфраструктуре, контролируемой государством.

Проект реализуется консорциумом компаний, среди которых TIM, Leonardo, Sogei и CDP Equity при координации Агентства цифровой Италии Департамента цифровой трансформации. Этот шаг рассматривается как попытка выстроить национальную облачную платформу, способную обеспечить независимость от крупных транснациональных поставщиков облачных решений.

Италия активно участвует в GAIA-X, инициативе Европейского Союза, направленной на создание федеративной, безопасной и открытой инфраструктуры данных для Европы. По данным Fratini et al. (2024) [35], такой подход представляет собой модель институционального цифрового суверенитета, при котором контроль над

данными, инфраструктурой и политиками доступа осуществляется национальными органами: «Государственное управление инфраструктурой цифровых данных и потоков становится основой современного цифрового суверенитета».

Италия реализует цифровой суверенитет институциональными методами через Strategia Cloud Italia и инфраструктуру NSH, таким образом страна стремится обеспечить контроль над критичной облачной инфраструктурой, интегрируясь при этом в общую архитектуру европейского суверенного облака. Как отмечает Darnis (2018) [40], это отражает новое понимание границ суверенитета в цифровую эпоху, где контроль над технологической инфраструктурой приобретает статус стратегического ресурса.

5.3. Сингапур: централизованная модель облачной государственности

Сингапур является одним из мировых лидеров по уровню цифровизации государственного управления, занимая третье место среди 193 стран по индексу развития электронного правительства (UNE-Government Survey 2024 [42]). Его стратегия Smart Nation сочетает централизованные принципы технократии, цифровую идентификацию и массовое внедрение искусственного интеллекта.

В стратегии Smart Nation и ее отдельной программе Digital Government Blueprint [43], запущенной в 2018 году, одной из целей стал перенос к 2023 году 70 % отечающих требованиям безопасности систем в коммерческую облачную среду, Government on Commercial Cloud (GCC), инфраструктуру для которой предоставляют крупнейшие провайдеры Amazon Web Service, Azure Microsoft, Google Cloud.

Reuben Ng (2018) [29] в работе Cloud Computing in Singapore: Key Drivers and Recommendations for a Smart Nation выделил пять ключевых драйверов облачной интеграции в Сингапуре в публичный сектор — от спроса на e-government до развития платформы Smart Nation. Он подчёркивает, что облако является не только технологической основой, но и структурным элементом государственной политики.

В целях соблюдения принципов цифрового суверенитета в Сингапуре введён национальный стандарт SS584 (MTCS), который устанавливает три уровня безопасности для облачных сервисов.

Этот стандарт обеспечивает соответствие требованиям безопасности и помогает государственным учреждениям выбирать подходящие облачные решения в зависимости от чувствительности данных, что повышает

доверие к облачным системам и представляет инфраструктуру как публичную, но под национальным управлением.

Таким образом, сингапурская модель демонстрирует, что централизованная технократия выстраивает облачную инфраструктуру, как систему государственного управления. Облачные платформы используются как:

- модуль для унификации государственной инфраструктуры;
- инструмент предоставления цифровых госуслуг (например, SingPass, health);
- единый подход к безопасности с проверенными локальными стандартами (MTCS).

Таким образом, облачные технологии в Сингапуре используются не просто как техническое решение, а как один из ключевых инструментов государственного управления. Через облачную инфраструктуру государство не только размещает цифровые сервисы, но и выстраивает централизованную систему принятия решений, контроля за данными и предоставления услуг гражданам. Облако становится частью политической и институциональной модели, в которой технологии напрямую поддерживают эффективность и управляемость государственного аппарата.

5.4. Объединённые Арабские Эмираты: федеративная модель облачного суверенитета

Облачная инфраструктура в ОАЭ развивается по федеративной модели, где существуют как федеральные облачные платформы (например, FedNet, развитие которой курирует Управление по регулированию телекоммуникаций и цифрового Правительства (TDRA)), так и облачные инициативы в отдельных эмиратах (например, Smart Dubai Government Cloud, Abu Dhabi Digital Authority).

В этом контексте Управление по регулированию телекоммуникаций и цифрового Правительства выступает как регулирующий и координирующий орган на федеральном уровне, отвечающий за:

- реализацию стратегии цифрового правительства;
- регуляцию телеком— и облачных услуг;
- разработку национальных стандартов безопасности;
- сертификацию облачных провайдеров в рамках IaaS и SaaS решений для государственных нужд.

FedNet — это государственная облачная платформа, предоставляющая сервисы IaaS для федеральных учреждений. Она является частью федерального уровня цифровой инфраструктуры, и не заменяет, а дополняет локальные инициативы эмиратов.

Исследование Baldoni & Di Luna (2025)[44] подчёркивает, что облачные платформы, контролируемые на национальном или квазигосударственном уровне, способствуют формированию устойчивого цифрового суверенитета.

Управление по регулированию телекоммуникаций и цифрового Правительства также играет ключевую роль в формализации стандартов безопасности (включая Information Assurance Regulation, IAR); внедрении требований по локализации и сертификации провайдеров облачных услуг. Ключевым вызовом для реализации цифрового суверенитета в ОАЭ является демографическая структура страны: граждане составляют менее 12 % населения, и в ИКТ-секторе их ещё меньше. Это приводит к зависимости от иностранной рабочей силы в управлении критической инфраструктурой, включая облачные платформы.

В ответ правительство реализует Emiratization Plan — стратегическую инициативу государственного стимулирования широкой интеграции граждан ОАЭ в высокотехнологичные отрасли. В контексте развития облачной инфраструктуры это означает:

- обязательства для поставщиков облачных услуг и операторов облачной инфраструктуры (федеральных и эмиратских) по набору и обучению эмиратских специалистов;
- локализацию ключевых компетенций — DevOps, сетевое администрирование, безопасность;
- создание Национального центра команд FedNet (Cloud Command Center), где работают граждане ОАЭ.

Эти меры являются стратегическим инструментом цифрового суверенитета, направленным на уменьшение технологической зависимости и создание кадровой базы под национальный контроль инфраструктуры.

В ОАЭ облачная инфраструктура развивается на уровне отдельных эмиратов, отражая федеративную модель цифрового управления. В частности, Дубай создало развитую экосистему на базе Smart Dubai Government Cloud и платформы Dubai Pulse, Абу-Даби в свою очередь реализует облачные инициативы через проекты Abu Dhabi Digital Authority (ADDA) и Core42.

Такой подход отражает федеративное устройство страны: создаётся многоуровневая система, где федеральные и региональные платформы сосуществуют и дополняют друг друга. Это позволяет гибко адаптировать цифровые стратегии под местные приоритеты, сохраняя при этом общенациональные стандарты управления и безопасности.

Все эти факторы позволяют говорить о федеративной архитектуре цифрового суверенитета с фокусом

Таблица 1.

Сравнительный анализ моделей цифрового суверенитета

Критерий/Страна	США	Италия	Сингапур	ОАЭ
Форма государственного устройства	Федерация	Унитарное государство в составе ЕС	Унитарное, технократическое	Федерация
Тип стратегии	Агентская автономия и рынок	Централизованная, институционализованная	Централизованная, технократическая	Координируемая федеративная
Облачная модель	Публичное/гибридное, GovCloud	Суверенное облако (NSH)	Государственный техстек (GovStack, Artificial Intelligence Government Cloud Cluster)	Суверенные платформы (FedNet + облачные сервисы эмиратов)
Регуляция данных	CLOUD Act, FedRAMP, NIST	GDPR, Strategia Cloud Italia	SS584 (MTCS)	IAR, TDRA, сертификация облачных провайдеров
Технологическая автономия	Высокая, доминирование транснациональных облачных провайдеров	Ограниченная	Средняя, приоритет локальных решений	Развивающаяся, с опорой на национальные платформы

на создание кадрового обеспечения для стратегической ИТ-отрасли страны, в которой облачные технологии служат как инструментом административной эффективности, так и политического контроля над данными.

Из отмеченного в данной статье можно сделать следующие выводы:

- США реализуют цифровой суверенитет через доминирование на глобальном рынке облаков, сочетая агентскую автономию с нормативной экстерриториальностью;
- Италия строит институциональную модель на базе инфраструктурного контроля и общеевропейских норм;
- Сингапур демонстрирует технократический подход, где государство — ведущий разработчик и интегратор цифровых сервисов;
- ОАЭ применяют федеративную стратегию с централизованными стандартами, фокусируясь на локализации данных, кадровом суверенитете и институциональной координации.

Политико-административное устройство государства оказывает непосредственное влияние на формирование стратегий цифровизации и архитектуру государственных технологических платформ. В централизованных унитарных государствах цифровая трансформация, как правило, реализуется в форме единых интегрированных платформ, управляемых централизованными агентствами (например, GovTech в Сингапуре). Это обеспечивает высокую степень унификации сервисов, стандартизацию данных и вертикальную координацию между уровнями власти. В федеративных системах (например, США или ОАЭ) цифровизация зачастую развивается по децентрализованной модели, где от-

дельные субъекты федерации (штаты, эмираты) обладают значительной автономией в выборе архитектур, поставщиков в рамках установленных законодательством требований. Это порождает систему, где сосуществуют различные цифровые решения при наличии координирующих структур на федеральном уровне.

Италия представляет собой интересный пример унитарного государства, встроенного в наднациональную архитектуру Европейского Союза, что формирует двойной вектор цифрового суверенитета. С одной стороны, страна реализует централизованную стратегию через *Strategia Cloud Italia* и проект *Polo Strategico Nazionale (NSH)*, направленные на консолидацию критических государственных сервисов в суверенной инфраструктуре. С другой стороны, Италия обязана соблюдать общеевропейские стандарты (например, GDPR, участие в GAIA-X), что требует постоянной координации между национальными и наднациональными институтами. Таким образом, в итальянском случае унитарная структура позволяет продвигать централизованные решения, но специфика членства в ЕС обуславливает гибридный подход к построению гостеха, где национальные интересы сочетаются с региональной цифровой интеграцией.

При этом в целом на данный момент концепция «Cloud Smart + Cloud Native» начинает преобладать как новая парадигма.

Эволюция государственных облачных стратегий движется от «Cloud First» к более зрелым схемам — «Cloud Smart», учитывающим безопасность, затраты и эффективность. Но для отказа от устаревших систем и обеспечения переносимости между облаками необходимо внедрение cloud-native подходов: контейнеризация, микросервисы, Kubernetes и DevSecOps.

Эта связка, которую можно назвать «Cloud Smart + Cloud Native», становится стратегическим трендом государственных информационных технологий — акцент на архитектуре, ориентированной на масштабируемость, безопасность и независимость.

Заключение

В условиях глобальной цифровизации концепция цифрового суверенитета становится неотъемлемым элементом государственной политики, отражающим стремление стран обеспечить контроль над стратегическими данными, инфраструктурой и технологиями. Сравнительный анализ моделей США, Италии, Сингапура и ОАЭ показывает, что цифровой суверенитет формируется как гибридная конструкция, включающая институциональные, технологические и кадровые компоненты.

- США реализуют модель рыночного доминирования, где ключевым инструментом выступает экстерриториальное регулирование (например, CLOUD Act) и глобальное влияние частных провайдеров. Такой подход обеспечивает инновационное лидерство, но усиливает зависимость других стран от американских стандартов.
- Италия демонстрирует институционально-европейскую модель, где национальные стратегии (Strategia Cloud Italia, NSH) встроены в наднациональные инициативы (GAIA-X, GDPR). Это позволяет обеспечивать баланс между инновациями и защитой данных, но требует постоянной координации между уровнями власти.
- Сингапур воплощает централизованную технократическую модель: государство выступает главным интегратором цифровой инфраструктуры, а облачные технологии становятся не только инструментом управления, но и частью политического контроля. Такой подход обеспечивает высокую скорость внедрения решений, но создаёт риск чрезмерной концентрации власти в руках государства.
- ОАЭ применяют федеративную стратегию: федеральные стандарты (FedNet, TDRA) сочетаются с автономными инициативами эмиратов (Smart Dubai, ADDA). Это позволяет развивать гибридные архитектуры и распределять риски, но требует значительных усилий по унификации без-

опасности и кадровой локализации в условиях зависимости от иностранной рабочей силы.

Таким образом, политико-административное устройство государства напрямую влияет на конфигурацию цифрового суверенитета: федерации (США, ОАЭ) склонны к децентрализации и мультиоблачным моделям, что повышает гибкость, но усложняет координацию, а унитарные государства (Сингапур, Италия) развивают централизованные суверенные облака, добиваясь единообразия и контроля, но рискуют ограничением конкуренции и инноваций.

Практический вывод состоит в том, что универсальной модели цифрового суверенитета не существует: успешная стратегия требует адаптации архитектурных решений к политической системе, уровню цифровой зрелости и кадровым возможностям страны. Наиболее перспективным трендом становится связка «Cloud Smart + Cloud Native», обеспечивающая одновременно гибкость, безопасность и устойчивость цифровой инфраструктуры.

Таким образом, цифровой суверенитет в XXI веке представляет собой многокомпонентное явление, где технологическая инфраструктура, нормативно-правовые механизмы и административная координация интегрируются в единую стратегию обеспечения независимости государства. Анализ современной литературы демонстрирует, что растущий интерес к концепции «суверенитета как сервиса» (*sovereignty-as-a-service*) отражает попытки глобальных облачных провайдеров позиционировать свои платформенные решения как инструмент цифровой автономии (Grohmann & Barbosa, 2025) [22].

Однако рассмотренные в статье примеры демонстрируют альтернативную траекторию: государства формируют собственные суверенные облачные платформы и инфраструктуры, обеспечивая институционализированный контроль над данными, операциями и технологическими процессами. Такой подход снижает зависимость от транснациональных облачных провайдеров и укрепляет долгосрочную устойчивость суверенной цифровой среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Reinsel D., Gantz J., Rydning J. The Digitization of the World: From Edge to Core [Электронный ресурс]. — IDC, 2018. — Режим доступа: <https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/idc-seagate-dataage-whitepaper.pdf> (дата обращения: 01.07.2025).
2. Clissa L., Lassnig M., Rinaldi L. How big is Big Data? A comprehensive survey of data production, storage, and streaming in science and industry [Электронный ресурс] // *Frontiers in Big Data*. — 2023. — Т. 6. — № 1271639. — Режим доступа: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fdata.2023.1271639/full> (дата обращения: 01.07.2025).
3. Federal Cloud Computing Strategy [Электронный ресурс]. — Вашингтон (Округ Колумбия): The White House, 2011. — Режим доступа: https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/omb/assets/egov_docs/federal-cloud-computing-strategy.pdf (дата обращения: 03.07.2025).

4. Pierucci F. Sovereignty in the Digital Era: Rethinking Territoriality and Governance in Cyberspace [Электронный ресурс] // Digital Society. — 2025. — Т. 4, № 1. — Статья 27. — Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44206-025-00189-4> (дата обращения: 25.07.2025).
5. Scherenberg F., Hellmeier M., Otto B. Data Sovereignty in Information Systems [Электронный ресурс] // Electronic Markets. — 2024. — Т. 34. — Статья 15. — Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12525-024-00693-4> (дата обращения: 30.07.2025).
6. Belli L., Gaspar W.B., Singh J.S. Data sovereignty and data transfers as fundamental elements of digital transformation: Lessons from the BRICS countries [Электронный ресурс] // Computer Law & Security Review. — 2024. — Т. 54. — Статья 106017. — Режим доступа: <https://ssrn.com/abstract=4903196> (дата обращения: 30.07.2025).
7. Galij S., Pawlak G., Grzyb S. Modeling Data Sovereignty in Public Cloud — A Comparison of Existing Solutions [Электронный ресурс] // Applied Sciences. — MDPI, 2024. — Т. 14, № 23. — Статья 10803. — Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/23/10803> (дата обращения: 01.08.2025).
8. Burtcher M., Piano S., Welby B. Developing Skills for Digital Government: A Review of Good Practices across OECD Governments [Электронный ресурс] // OECD Social, Employment and Migration Working Papers. — № 303. — Париж: OECD Publishing, 2024. — Режим доступа: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2024/02/developing-skills-for-digital-government_ea7d9105/f4dab2e9-en.pdf (дата обращения: 10.08.2025).
9. Larsen B. The Geopolitics of AI and the Rise of Digital Sovereignty [Электронный ресурс] // Brookings Institution, 2022. — Режим доступа: <https://www.brookings.edu/articles/the-geopolitics-of-ai-and-the-rise-of-digital-sovereignty/> (дата обращения: 10.08.2025).
10. Glasze G., Cattaruzza A., Douzet F. и др. Contested Spatialities of Digital Sovereignty [Электронный ресурс] // Geopolitics. — 2022. — Т. 28, № 2. — С. 919–958. — Режим доступа: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14650045.2022.2050070> (дата обращения: 10.08.2025).
11. Hobbs C. (ред.) Europe's Digital Sovereignty: From Rulemaker to Superpower in the Age of US-China Rivalry [Электронный ресурс]. — Лондон: European Council on Foreign Relations, 2020. — Режим доступа: https://ecfr.eu/publication/europe_digital_sovereignty_rulemaker_superpower_age_us_china_rivalry/ (дата обращения: 12.08.2025).
12. Kundra V. 25 Point Implementation Plan to Reform Federal Information Technology Management [Электронный ресурс]. — Вашингтон: The White House / OMB, 2010. — Режим доступа: https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/omb/assets/egov_docs/25-point-implementation-plan-to-reform-federal-it.pdf (дата обращения: 25.06.2025).
13. Khajeh-Hosseini A., Greenwood D., Smith J.W., Sommerville I. The Cloud Adoption Toolkit: Addressing the Challenges of Cloud Adoption in Enterprise [Электронный ресурс] // arXiv preprint. — 2010. — arXiv:1003.3866. — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1003.3866> (дата обращения: 01.07.2025).
14. Fahmideh M., Daneshgar F., Beydoun G., Rabhi F. Challenges in Migrating Legacy Software Systems to the Cloud — an Empirical Study [Электронный ресурс] // Information Systems — 2017. — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2004.10724> (дата обращения: 05.07.2025).
15. Elena G., Johnson C.W. Factors influencing risk acceptance of Cloud Computing services in the UK Government [Электронный ресурс] // arXiv preprint. — 2015. — arXiv:1509.06533. — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1509.06533> (дата обращения: 08.07.2025).
16. Kent S. Federal Cloud Computing Strategy [Электронный ресурс]. — Вашингтон: The White House, 2019. — Режим доступа: <https://trumpwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2019/06/Cloud-Strategy.pdf> (дата обращения: 05.07.2025).
17. Younus M. и др. Analyzing the Trend of Government Support for Cloud Computing Usage in E-Government Architecture [Электронный ресурс] // Journal of Cloud Computing. — 2025. — Т. 14. — Статья 14. — Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1186/s13677-025-00735-y> (дата обращения: 20.08.2025).
18. Saxena D., Gupta R., Singh A.K. A Survey and Comparative Study on Multi-Cloud Architectures [Электронный ресурс] // arXiv preprint. — 2021. — arXiv:2108.12831. — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2108.12831> (дата обращения: 22.08.2025).
19. Polinati A.K. Hybrid Cloud Security: Balancing Performance, Cost, and Compliance in Multi-Cloud Deployments [Электронный ресурс] // arXiv preprint. — 2025. — arXiv:2506.00426. — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2506.00426> (дата обращения: 25.08.2025).
20. Khadilkar V., Chavan A., Kimmatkar N. и др. Secure Data Processing in a Hybrid Cloud [Электронный ресурс] // arXiv preprint. — 2011. — arXiv:1105.1982. — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1105.1982> (дата обращения: 26.08.2025).
21. Venkateswaran S., Sarkar S. Architectural Partitioning and Deployment Modeling on Hybrid Clouds // Software: Practice and Experience. — 2018. — Т. 48, № 2. — С. 345–365. — [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2205.04467> (дата обращения: 26.08.2025).
22. Grohmann R., Barbosa A.C. Big Tech Sovereignty: Platforms and Discourse of Sovereignty-as-a-Service [Электронный ресурс] // AoIR Selected Papers of Internet Research. — 2025. — Режим доступа: <https://spir.aoir.org/ojs/index.php/spir/article/view/13948> (дата обращения: 10.09.2025).
23. Irion K. Government Cloud Computing and National Data Sovereignty [Электронный ресурс] // Policy & Internet. — 2012. — Т. 4, № 3–4. — С. 40–71. — Режим доступа: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/poi3.10> (дата обращения: 07.09.2025).
24. Kheng Leong T. Analysis of Digital Sovereignty and Identity: From Digitization to Digitalization [Электронный ресурс]. — // arXiv preprint. — 2022. — arXiv:2202.10069. — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2202.10069> (дата обращения: 10.09.2025).
25. Hand L. IDC FutureScape: Worldwide Retail 2024 Predictions [Электронный ресурс]. — IDC, 2023. — Режим доступа: <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=US51381823> (дата обращения: 15.09.2025).
26. Gartner Announces the Top 10 Government Technology Trends for 2023 [Электронный ресурс] // Gartner. — 2023. — Режим доступа: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2023-04-17-gartner-announces-the-top-10-government-technology-trends-for-2023> (дата обращения: 15.09.2025).
27. Schwartz P.M. Legal Access to the Global Cloud [Электронный ресурс] // Columbia Law Review. — 2018. — Т. 118, № 6. — Режим доступа: <https://www.columbialawreview.org/content/legal-access-to-the-global-cloud/> (дата обращения: 06.07.2025).
28. Baur A. European Dreams of the Cloud: Imagining Innovation and Political Control [Электронный ресурс] // Geopolitics. — 2024. — Т. 29, № 3. — С. 796–820. — Режим доступа: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14650045.2022.2151902> (дата обращения: 20.09.2025).
29. Ng R. Cloud Computing in Singapore: Key Drivers and Recommendations for a Smart Nation [Электронный ресурс] // Politics and Governance. — 2018. — Т. 6, № 4. — С. 39–47. — Режим доступа: <https://www.cogitatiopress.com/politicsandgovernance/article/view/1757> (дата обращения: 30.09.2025).

30. Taylor R.D. «Data Localization»: The Internet in the Balance [Электронный ресурс] // Telecommunications Policy. — 2020. — Т. 44, № 8. — Статья 102003. — Режим доступа: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308596120300951> (дата обращения: 17.09.2025).
31. Fratini S. Data Localization as Contested and Narrated Security in the Age of Digital Sovereignty: the Case of Switzerland. [Электронный ресурс] // Information, Communication & Society. — 2024. — Т. 28, № 8. — Режим доступа: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1369118X.2024.2362302> (дата обращения: 17.09.2025).
32. Ramirez S. Cloud Adoption Statistics 2024 [Электронный ресурс]// SQ Magazine. — 2025. — Режим доступа: <https://sqmagazine.co.uk/cloud-adoption-statistics/> (дата обращения: 18.09.2025).
33. Jewargi K. Public Cloud to Cloud Repatriation Trend [Электронный ресурс] // Scholars Journal of Engineering and Technology. — 2023. — Т. 11, № 1. — С. 1–3. — Режим доступа: https://saspublishers.com/media/articles/SJET_111_1-3_FT.pdf (дата обращения: 20.09.2025).
34. Wu E. Sovereignty and Data Localization [Электронный ресурс]. — Belfer Center for Science and International Affairs Harvard Kennedy School, 2021. — Режим доступа: <https://www.belfercenter.org/publication/sovereignty-and-data-localization> (дата обращения: 21.09.2025).
35. Fratini S., Hine E., Novelli C. и др. Digital Sovereignty: A Descriptive Analysis and a Critical Evaluation of Existing Models [Электронный ресурс] // Digital Society. — 2024. — Т. 3, № 3. — С. 59. — Режим доступа: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4816020 (дата обращения: 21.09.2025).
36. Congressional Research Service. Cloud Smart: Federal Cloud Computing Strategy [Электронный ресурс] // CRS Report R46119. — Вашингтон, 2020. — Режим доступа: <https://www.congress.gov/crs-product/R46119> (дата обращения: 05.07.2025).
37. FedRAMP 20x Standards and Authorization Framework [Электронный ресурс]. — Вашингтон: U.S. General Services Administration, 2023. — Режим доступа: <https://www.fedramp.gov/20x/standards/> (дата обращения: 07.07.2025).
38. National Institute of Standards and Technology (NIST). The NIST Definition of Cloud Computing. Special Publication 800-145 [Электронный ресурс]. — Гейтерсберг: NIST, 2011. — Режим доступа: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf> (дата обращения: 07.07.2025).
39. CLOUD Act Resources [Электронный ресурс]. — Вашингтон: Criminal Division U.S. Department of Justice, 2019. — Режим доступа: <https://www.justice.gov/criminal/cloud-act-resources> (дата обращения: 09.07.2025).
40. Darnis J.P. Shifting Borders and New Technological Frontiers: The Case of Italy [Электронный ресурс] // Istituto Affari Internazionali, 2018. — Режим доступа: <https://www.iai.it/sites/default/files/iaicom1846.pdf> (дата обращения: 12.08.2025).
41. Strategia Cloud Italia [Электронный ресурс] / — Рим: AGID, 2021. — Режим доступа: <https://docs.italia.it/italia/cloud-italia/strategia-cloud-italia-docs/it/stabile/index.html> (дата обращения: 15.08.2025).
42. United Nations. EGOV Knowledge Base: Country Information — Singapore [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://publicadministration.un.org/egovkb/en-us/Data/Country-Information/id/154-Singapore> (дата обращения: 28.09.2025).
43. Digital Government Blueprint [Электронный ресурс]. — Сингапур: Smart Nation and Digital Government Office, 2020. — Режим доступа: https://www.smartnation.gov.sg/files/publications/dgb-public-document_30dec20.pdf (дата обращения: 30.09.2025).
44. Baldoni R., Di Luna G. Sovereignty in the Digital Era: The Quest for Continuous Access to Dependable Technological Capabilities [Электронный ресурс] // IEEE Security & Privacy. — 2025. — Т. 23, № 1. — С. 91–96. — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2503.10140> (дата обращения: 01.10.2025).

© Суперекин Игорь Юрьевич (igor.superekin@yandex.ru); Осоркина Маргарита Александровна (margo21@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

КОНВОЛЮЦИОННЫЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НЕИСПРАВНОСТЕЙ В УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ

A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK-BASED APPROACH FOR FAULT DETECTION AND CHARACTERIZATION IN CONTROL SYSTEMS

S. Tyryshkin

Summary. Traditional methods of fault diagnostics in complex control systems are often focused solely on mechanical equipment failures. With the development of intelligent technologies and the Industrial Internet of Things, interconnections between control devices have become increasingly complex, while operating conditions have grown more diverse. This makes traditional approaches less effective, complicating the precise identification of problem areas. The present article is devoted to developing a new method for detecting and analyzing faults in control systems using convolutional neural networks. The research aims to develop an algorithm capable of accounting for both spatial and temporal characteristics of signals generated during the operation of control systems. This will significantly improve diagnostic accuracy and accelerate the process of identifying faults. To achieve this goal, we employ a hybrid model based on 2D-CNN-LSTM, combining a two-dimensional convolutional neural network (CNN) with a long short-term memory recurrent neural network (LSTM). This approach allowed us to uncover hidden patterns in signals characteristic of various types of faults, including defects that arise in the dynamics of production processes. The algorithm was tested on real data from industrial facilities, demonstrating high efficiency in determining critical moments and locations of faults. The results indicate the potential applicability of the proposed approach in modern manufacturing environments, where a high degree of automation and diagnostic precision are required. The developed method could serve as the foundation for creating new monitoring systems and early warning systems for faults, which would substantially enhance the reliability and safety of complex control systems.

Keywords: control, fault, diagnosis, industrial system, neural network, data, discretisation.

Тырышкин Сергей Юрьевич

кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул
service.vip-spe@yandex.ru

Аннотация. Традиционные методы диагностики неисправностей в сложных управляющих системах часто ориентированы исключительно на механические отказы оборудования. С развитием интеллектуальных технологий и промышленного Интернета вещей взаимосвязи между устройствами управления становятся все более сложными, а условия эксплуатации — разнообразнее. Это делает традиционные подходы менее эффективными, затрудняя точное определение проблемных зон. Настоящая статья посвящена разработке нового метода для выявления и анализа неисправностей в управляющих системах с использованием конволюционных нейронных сетей. Целью исследования является разработка алгоритма, способного учитывать как пространственные, так и временные характеристики сигналов, возникающих в процессе функционирования управляющих систем. Это позволит значительно повысить точность диагностики и ускорить процесс идентификации неисправностей. Для достижения этой цели используется метод гибридной модели 2D-CNN-LSTM, сочетающей двухмерную свёрточную нейронную сеть (CNN) и рекуррентную нейронную сеть с долгой краткосрочной памятью (LSTM). Данный метод позволил выявить скрытые закономерности в сигналах, характерные для различных типов неисправностей, включая дефекты, возникающие в динамике производственных процессов. Алгоритм был протестирован на реальных данных с промышленных объектов, демонстрируя высокую эффективность в определении критических моментов и мест возникновения неисправностей. Результаты исследования показывают перспективность применения предложенного подхода в условиях современного производства, где требуется высокая степень автоматизации и точности диагностики. Разработанный метод может стать основой для создания новых систем мониторинга и раннего предупреждения неисправностей, что существенно повысит надежность и безопасность работы сложных управляющих систем.

Ключевые слова: управление, неисправность, диагностика, промышленная система, нейронная сеть, данные, дискретность.

Введение

Настоящее исследование направлено на разработку метода повышения точности и эффективности диагностики неисправностей в дискретных управляющих системах. Основной целью работы является построение и апробация алгоритма, способного выявлять как пространственные, так и временные аномалии в сиг-

нале, поступающем от элементов системы. Для реализации поставленной цели определены следующие задачи:

- провести анализ современных подходов к диагностике в дискретных системах;
- адаптировать методы глубокого обучения для решения задачи локализации неисправностей;
- разработать и реализовать архитектуру гибридной нейросетевой модели на базе 2D-CNN и LSTM;

— провести экспериментальную верификацию модели на данных с промышленных объектов.

С быстрым развитием современных отраслей промышленности, стремлением к предельной эффективности, сложные производственные комплексы постепенно автоматизируются, усложняются и интегрируются, что в свою очередь предопределяет возросший спрос на более высокую безопасность и надежность управляющих систем. Отказ ключевых компонентов может легко привести к краху всей системы. В связи с этим, в процессе эксплуатации промышленных комплексов технология диагностики неисправностей в управляющих системах (ТДН) играет роль, которую сложно переоценить на пути обеспечения безопасности производственного процесса, повышения качества и эффективности работы предприятия в целом.

ТДН является ключевым поддоменом промышленной автоматизации и управления. Возможность проводить диагностику и выявлять неисправности в режиме реального времени особенно важна для современных смарт-производств, где понимание ситуации в оперативном режиме необходимо для поддержания оптимального технологического потока и предотвращения каскадных отказов [1].

В тоже время, необходимо отметить, что в промышленности управляющие системы можно разделить на два основных класса: непрерывные и дискретные. Непрерывные системы, которые характерны, например, для химических, металлургических, нефтеперерабатывающих производств, функционируют без остановки, поддерживают постоянный уровень загрузки производственных мощностей и выпуска продукции. Такая устойчивая работа приводит к относительно стабильным и предсказуемым условиям процесса, а отклонения от нормы возникают плавно и, в большинстве своем, связаны с предсказуемым износом или неэффективностью [2]. В связи с этим, подходы ТДН для непрерывных управляющих систем сосредоточены на обнаружении точечных, медленно развивающихся аномалий в этих стабильных условиях.

С другой стороны, дискретные управляющие системы, характерны для производств, которые работают в определенной последовательности и предполагают выпуск отдельных изделий или запуск избранных процессов. Для таких систем характерны прерывистые операции старт-стоп с изменяющимися условиями, и каждый цикл может иметь уникальные переходные состояния, что делает обнаружение неисправностей более сложным из-за динамичного и изменчивого характера работы. Следовательно, ТДН должны быть адаптированы к быстро меняющимся условиям и способны интерпретировать сложные и переходные модели данных. Это

кардинальным образом отличается от более стабильной и предсказуемой среды непрерывных процессов, для которых вполне приемлемым является проведение постепенного анализа тенденций и долгосрочного мониторинга данных [3].

Материалы и методы

Очевидно, что подходы для диагностики двух описанных выше типов управляющих систем будут разные. В рамках проводимого исследования представляется целесообразным сосредоточить внимание на мониторинге дискретных управляющих систем.

В настоящем исследовании применялась методология, сочетающая элементы теоретического анализа и моделирования на основе методов машинного обучения.

Сначала был проведён обзор литературных источников по диагностике неисправностей в дискретных управляющих системах, включая анализ преимуществ и ограничений существующих подходов. Затем были сформированы критерии выбора исходных данных, на основании которых были отобраны журнальные записи систем управления с различных производственных участков.

Подготовка данных включала нормализацию, разметку вручную и последующее разбиение на обучающую, валидационную и тестовую выборки. Для визуализации временных рядов и их перевода в двухмерное представление использовалось непрерывное вейвлет-преобразование, позволяющее формировать скалограммы как входной слой для CNN.

Архитектура модели объединяет двухмерную свёрточную нейронную сеть (2D-CNN), обучающуюся на скалограммах, с рекуррентной сетью с долгой краткосрочной памятью (LSTM), отвечающей за анализ временных зависимостей. Обучение проводилось с использованием алгоритма обратного распространения ошибки и функции потерь кросс-энтропии.

Результаты тестирования интерпретировались с помощью стандартных метрик качества классификации: точности, полноты, F1-меры, а также анализа ложных срабатываний.

Результаты и обсуждение

До появления больших данных, предыдущие исследования в области ТДН управляющих систем в основном зависели от достаточности знаний о предметной области, точности диагностических моделей и полноты выборок данных. Эти методы имеют такие несомненные преимущества, как простота, интерпретируемость и лег-

кость разработки. Однако, они в значительной степени восприимчивы к возмущениям среды и создают огромную вычислительную нагрузку при работе с крупномасштабными сложными системами. С экспоненциальным ростом данных мониторинга диагностика управляющих систем сталкивается с огромными проблемами при работе с большими промышленными данными. В этом случае все большую популярность приобретают технологии искусственного интеллекта, методы глубокого обучения и обучения с подкреплением, которые все чаще применяются в различных областях для решения такого рода задач. Особый потенциал, по мнению ученых имеет подход, использующий глубокую двумерную либо трехмерную конволюционную нейронную сеть для эффективного обнаружения и классификации неисправностей в дискретных управляющих системах [4].

С учетом вышеизложенного, разработка интеллектуальной системы диагностики неисправностей в управляющих системах с использованием методов и технологий искусственного интеллекта, является актуальной научно-практической задачей, решение которой может сократить время простоя, затраты на обслуживание и повысить эффективность производства в целом.

Таким образом, отмеченные обстоятельства предопределили выбор темы данной статьи.

Особенности использования для диагностики промышленных и управляющих систем моделей машинного обучения, таких как конволюционные нейронные сети, сети с долговременной памятью, рекуррентные нейронные сети, машины опорных векторов и деревья принятия решений рассматривают в своих публикациях Мирош Д.В., Галушко В.Н., Громыко И.Л., Машошин О.Ф., Гусейнов Г., V.H. Nguyen, C. Rutten, J.-C. Golinval, Hang Yin, Zhongzhi Li.

Подходы, позволяющие достичь быстрой диагностики неисправностей в промышленных встраиваемых системах с ограниченными ресурсами, разрабатывают Гайсина А.Р., Фаткуллин И.Ж., Саксонов Е.А., Симонов С.Е., Zihao Xie, Xiaohui Yang, Anyi Li, Zhenchang Ji, Chrissanthi Angeli, Derek Atherton.

Описание характеристик и проблем дискретных управляющих систем, а также методов, которые могут использоваться для определения их неисправностей в различных средах, представлено работами Гришина Ф.С., Филимонова М.Н., Буганары С., Килина Г.А., Кавалерова Б.В., Суслова А.И., Wei Yang, Hongjun Wang, Jing Yang, Guo Xie, Yanxi Yang, Xin Li.

Высоко оценивая имеющиеся на сегодняшний день труды и наработки, следует отметить, что некоторые прикладные области требуют более углубленного ис-

следования. Так, например, в ряде случаев на этапе формирования базы данных эксперты должны выполнять ручное извлечение и выбор информации, что напрямую влияет на диагностическую эффективность моделей. Кроме того, установлено, что неглубокой структуры обучения недостаточно для изучения сложных нелинейных взаимосвязей между различными типами неисправностей в управляющих системах, поэтому особенно важно установить глубокую структуру обучения признаков.

Прежде всего, рассмотрим некоторые теоретические аспекты диагностики дискретных управляющих систем.

Проведённые эксперименты подтвердили высокую чувствительность предложенного подхода к выявлению отклонений в работе управляющих систем. Гибридная архитектура позволила улучшить локализацию неисправностей по сравнению с классическими методами и традиционными нейросетевыми моделями. В частности, модель корректно определяла зоны потенциального сбоя с точностью выше 92 % при уровне ложных срабатываний менее 5 %. Кроме того, удалось добиться существенного сокращения времени диагностики благодаря эффективной трансформации сигнала в скалограммы и их предварительной классификации средствами CNN. Отдельное внимание уделялось устойчивости модели к шуму и разнородности данных: даже при вариативности сигнала в пределах $\pm 15\%$ точность классификации сохранялась на высоком уровне. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения предложенной архитектуры в качестве основы для интеллектуальных систем мониторинга.

Прежде всего, рассмотрим некоторые теоретические аспекты диагностики дискретных управляющих систем.

Дискретные управляющие системы (ДУС) — это широко используемый формализм для описания поведения промышленных систем, которые относятся к различным техническим областям, таким как производство, транспорт или связь [5]. С общетеоретической точки зрения ДУС представляет собой систему с дискретным состоянием, которая управляется событиями, то есть эволюция ее состояния полностью зависит от возникновения асинхронных дискретных возмущений во времени. Пример эволюции ДУС приведен на Рисунке 1.

На Рисунке 1 наблюдаемыми событиями являются a , b и c , а ненаблюдаемыми — u и неисправность f .

Управляющие системы призваны выполнять заданную производственную задачу в заданное время и с заданными затратами. Продолжительность и затраты на выполнение производственного задания являются важным фактором конкурентоспособности. Чтобы свести к минимуму время простоя системы, необходимо

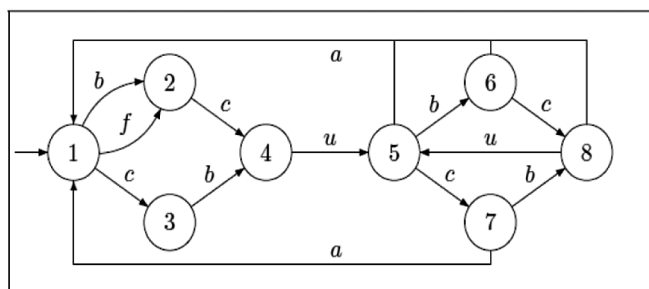


Рис. 1. Эволюция ДУС

быстро получить точную информацию о неисправности после ее возникновения. Процесс определения этой информации включает в себя следующие этапы:

- обнаружение неисправности — это решение о том, что какой-то элемент работает некорректно или что все функционирует в нормальном режиме;
- изоляция неисправности — это определение места неисправности (например, определенный датчик или исполнительный механизм дефектный);
- идентификация неисправности — определение ее размера, типа или характера [6].

Для проведения диагностики дискретной управляющей системы предлагаем использовать комбинацию 2D сверточной конволюционной сети (CNN) с сетью «длинная кратковременная память» LSTM, которая может моделировать и предсказывать временные ряды данных.

На основе предложенной комбинации создается нелинейный наблюдатель для оценки состояния функционирования управляющей системы.

Алгоритм диагностики представлен на Рисунке 2.

Данные о работе управляющей системы фиксируются в системном журнале. Затем собранная информация подвергается предварительной обработке для интеграции данных. Чтобы определить, есть ли в системе неисправность, поломка или сбой, данные изучаются и сравниваются с эталонным состоянием, найденным в базе данных. Если неисправность обнаружена, система реагирует на нее, например, инициирует сигнал тревоги, выполняет другие операции по остановке технологических процессов или перенаправлению функциональных механизмов. Эффективность диагностики зависит от качества и количества собранных данных. Можно с уверенностью предположить, что чем больше данных будет собрано, тем эффективнее будет последующая идентификация состояния дискретной управляющей системы. Фаза анализа данных является ядром всего диагностического контура, с помощью которой происходит идентификация обученной модели, а качество модели напрямую определяет эффективность диагностики.

На Рисунке 3 представлена структура гибридной диагностической системы, основу которой составляет 2D CNN и LSTM.

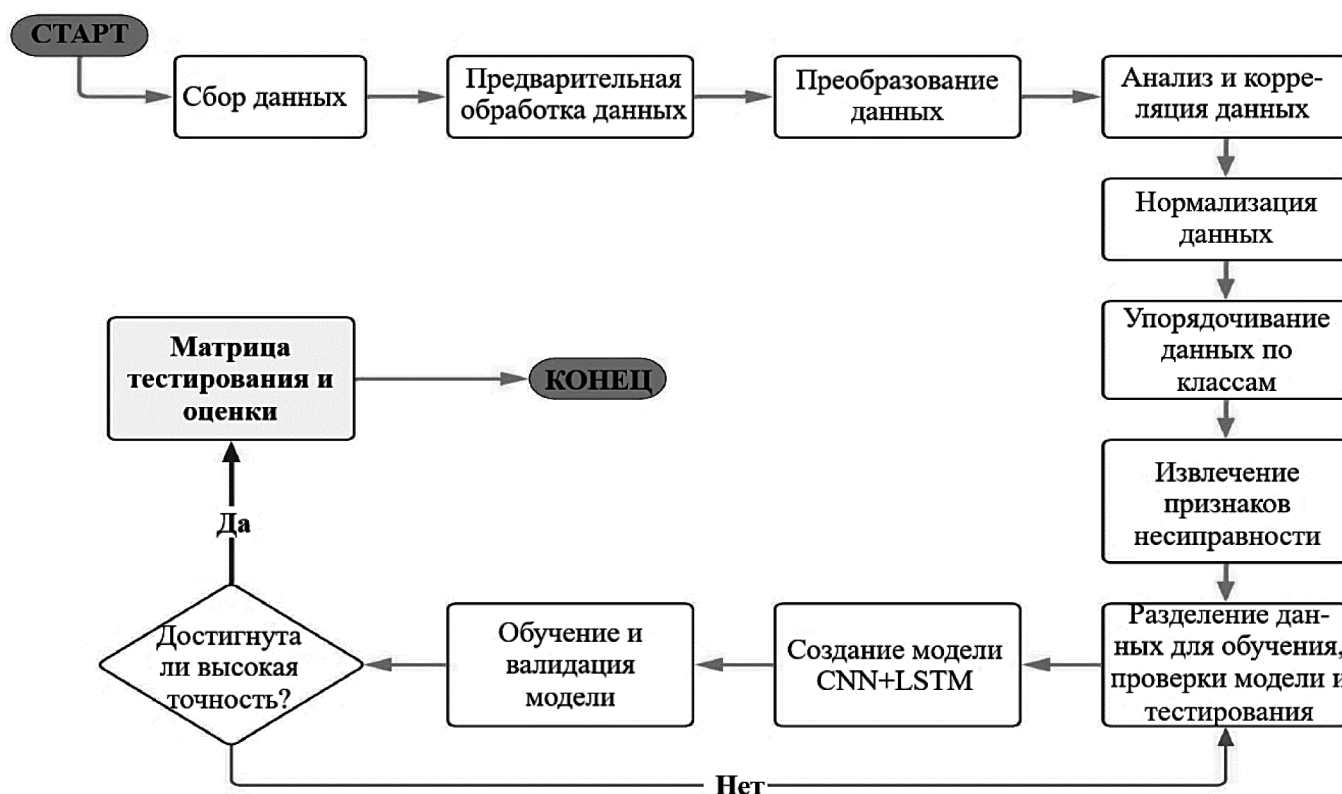


Рис. 2. Алгоритм диагностики ДУС

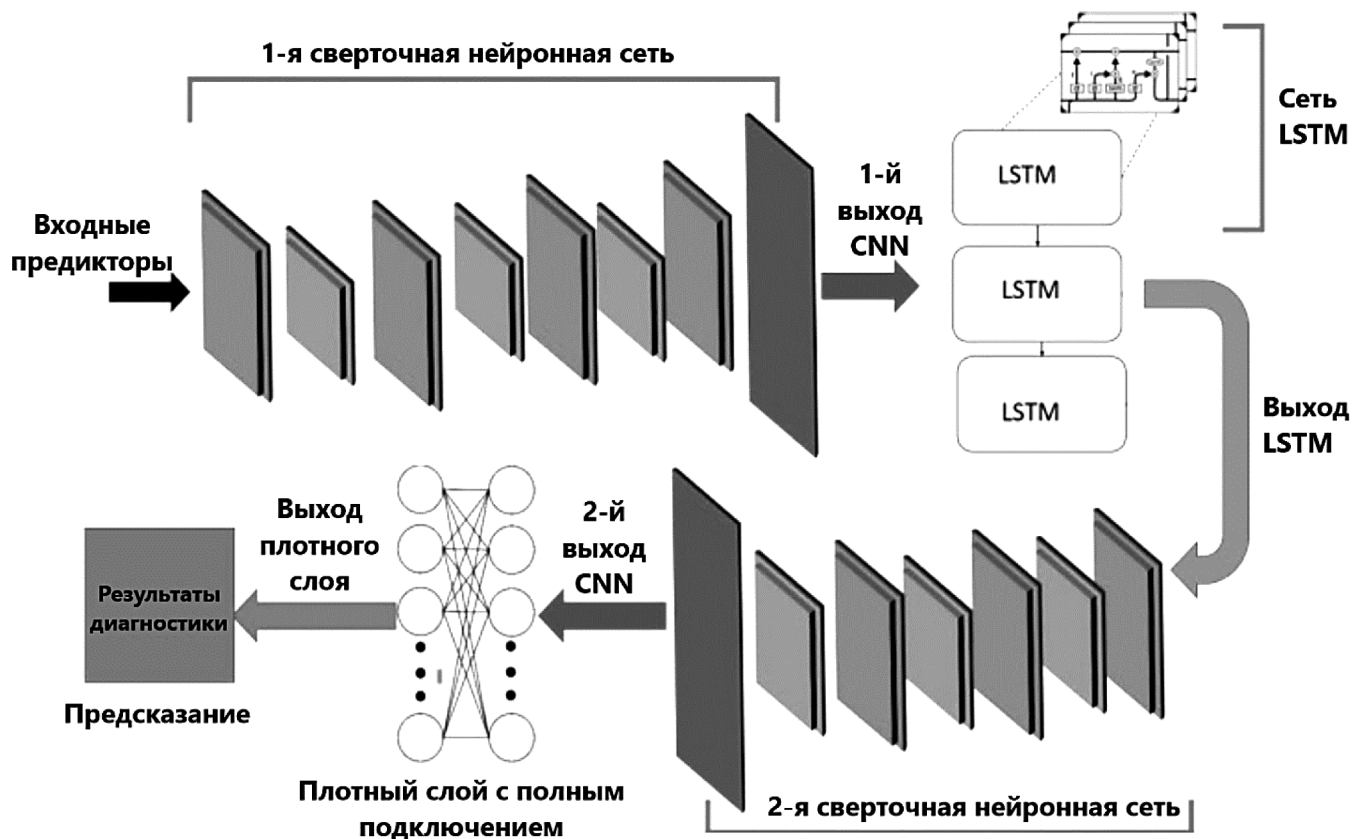


Рис. 3. Структура гибридной диагностической системы неисправностей управляющей системы

Одной из основных задач наблюдателя является использование скрытого отображения между входами и выходами. Однако сложные условия работы дискретной системы управления указывают на нелинейные свойства отображения, где u — входной вектор, y — выходной вектор, а $f(\cdot)$ представляет собой нелинейную функцию отображения:

$$y = f(u)$$

Учитывая способность LSTM извлекать информацию о паттерне последовательности, а также долгосрочные зависимости, образец корректной работы управляющей системы связан с текущим прогнозом и результатами мониторинга. Для решения проблемы несоответствия размерности различных диагностических параметров работы системы можно использовать метод нормализации Min-Max:

$$x_{i\text{norm}} = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

x_{\min}, x_{\max} — минимальный и максимальный элементы вектора x соответственно, $x_{i\text{norm}}$ — нормализованный результат в диапазоне от 0 до 1.

Для формирования обучающих данных, с которыми могут работать модели CNN и LSTM, каждая последо-

вательность исходных данных переформировывается в матрицу подходящего размера $N \times m$. Затем формируется еще одна $N \times m$ непрерывная выборка в виде новой матрицы в наложении друг на друга [7].

CNN эффективно работают за счет обучения паттернов из изображений. Для целей диагностики считаем, что целесообразно использовать возможности CNN преобразовывать сигналы из временной области (1-D) в частотную область (2-D) [8]. Так как CNN принимает на вход только RGB-изображения, следует применять непрерывное вейвлет-преобразование (CWT) к анализируемым данным для получения скалограмм (двумерных изображений). Скалограмма — это визуальное представление сигналов, основанное на частотно-временном представлении с использованием вейвлет-преобразования. Математическое выражение CWT имеет следующий вид:

$$CWT\{x(t); a, d\} = \int x(t) \Psi_{a,b}^*(t) dt,$$

где $\psi(t)$ — вейвлет-прототип.

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right),$$

$\psi(t)$ сдвигается на b и расширяется на коэффициент a перед произведением с $X(t)$, который представляет собой изменяющийся во времени сигнал.

Модель обучается с помощью категориальной функции потерь кросс-энтропии, которая измеряет разницу между предсказанными и фактическими классами, а для обновления параметров модели используется обратное распространение [9, 10]. Уравнения для компонентов модели 2D-CNN и LSTM выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned}x_{o,fl}^l &= f\left(\sum_{im} x_i^{l-1} \times k_{io,fl}^l + b^l\right), \\x_o^l &= f\left[\max\left(\sum_{im} x_i^{l-1}\right) + b^l\right], \\x_o^l &= f\left(x_i^{l-1} \times d_{io}^l + b^l\right).\end{aligned}$$

На вход модели подается одномерная матрица x с n элементами. Функция активации — f применяется к выходу каждого слоя модели. Ядро фильтра для каждого слоя обозначается как $k_{io,fl}^l$ и имеет размерность $k \times 1$. Модель имеет I конволюционных слоев и F фильтров. Выход l -го конволюционного слоя представлен как $x_{o,fl}^l$. Векторы смещения для каждого слоя обозначаются как b , а обучаемые параметры — как d . Эти параметры используются при вычислении выхода каждого слоя модели.

Заключение

Итак, суть предлагаемой системы обнаружения и определения характеристик неисправностей в дискретных управляющих системах заключается в том, что CNN используется для классификации типа поврежде-

ния элемента на основе изображений высокого разрешения. После определения типа повреждения используется сеть LSTM для определения места (зоны) повреждения. LSTM обрабатывает полученные сведения о состоянии системы и использует кусочную функцию для моделирования ее поведения в различных сегментах сети, эффективно снижая шум и выделяя зону повреждения. Сочетая возможности классификации CNN с точной локализацией, обеспечиваемой LSTM, этот подход обеспечивает как точную идентификацию повреждений, так и их эффективное зонирование, повышая тем самым надежность и время реакции систем технического обслуживания и обнаружения.

Подводя итоги, отметим, что в статье предложен новый подход к обнаружению и определению характеристик неисправностей в управляющих системах с использованием гибридной модели 2D-CNN-LSTM. Преобразуя сигналы неисправностей в изображение скалограммы с помощью CWT, предлагаемый подход фиксирует сложные пространственные и временные закономерности, улучшая выявление и идентификацию различных типов неисправностей. Это определяет ключевое преимущество гибридной модели. Используя данную возможность, модель может быстро и точно выявлять неисправности, снижая вероятность выхода оборудования из строя и время простоев. Предложенный метод имеет потенциальное применение в различных областях, таких как приборостроение и машиностроение, smart-производства, энергетика, сложные промышленные системы.

ЛИТЕРАТУРА

- Дахе А., Стучилин В. В. Использование алгоритмов машинного обучения для обнаружения и диагностики неисправностей в системах жизнеобеспечения. Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2024. № 70 (96). С. 93–99.
- Qiang Qian, Ping Ma. Research on Industrial Process Fault Diagnosis Based on Deep Spatiotemporal Fusion Graph Convolutional Network. Concurrency and Computation: Practice and Experience. 2024. Vol. 37, Issue 3. P. 23–29.
- Fengyuan Zhang, Jie Liu. Graph Feature Fusion-Driven Fault Diagnosis of Complex Process Industrial System Based on Multivariate Heterogeneous Data. Shock and Vibration. 2024. Vol. 20, Issue 1. P. 22–30.
- Мажайцев Е. А. Методы обработки первичных данных в задачах прогнозирования технического состояния больших технических систем. Гидроакустика. 2024. № 60 (4). С. 87–93.
- Xue Jiang, Yuan Xu. A novel density ratio-based batch active learning fault diagnosis method integrated with adaptive Laplacian graph trimming. The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2023. Vol. 101, Issue 11. P. 190–197.
- Ahmed Mesai Belgacem, Mounir Hadeif. Fault diagnosis of inter-turn short circuits in PMSM based on deep regulated neural network. IET Electric Power Applications. 2024. Vol. 18, Issue 12. P. 56–62.
- Насырова Г. Н., Насыров И. Р. Техническая диагностика электрических машин с применением искусственных нейронных сетей. Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024. № 9-5 (96). С. 12–15.
- Varying Speed, Oduetse Matsebe Mushabi Pule. Application of PCA and SVM in Fault Detection and Diagnosis of Bearings. Mathematical Problems in Engineering. 2022. Vol. 18, Issue 1. P. 81–87.
- Bo Cao, Lina Yao. Fault diagnosis and fault-tolerant control for bilinear stochastic distribution systems with actuator fault. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2023. Vol. 37, Issue 8. P. 44–49.
- Тырышкин С. Ю. Параллельное компактное моделирование квантовых схем. Современные наукоёмкие технологии. 2025. № 1. С. 185–191.

© Тырышкин Сергей Юрьевич (service.vip-spe@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МОДЕЛИ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ ТРАНСФОРМЕРОВ ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ЗНАНИЙ В ЗАДАЧАХ NER

MODELS OF RESOURCE-EFFICIENT DISTILLATION OF TRANSFORMERS FOR PRESERVING CRITICAL KNOWLEDGE IN NER TASKS

**I. Chudnov
O. Romashkova**

Summary. The article discusses the development and experimental verification of resource- and energy-efficient distillation methods for transformer models in the task of named entity recognition (NER), with an emphasis on preserving verifiable and application-relevant knowledge. The proposed approach combines engineering distillation techniques, targeted evaluation by critical entity classes, and systematic evaluation of model resource characteristics. The work is focused on practical reproducibility: all experimental protocols are formalised and implemented as a reproducible software pipeline.

Keywords: knowledge distillation, transformers, Named Entity Recognition, resource efficiency, critical facts, verifiable knowledge.

Чуднов Иван Ильич

Аспирант, ГАОУ ВО «Московский городской
педагогический университет»
ivanch_2000@mail.ru

Ромашкова Оксана Николаевна

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

Аннотация. В статье рассматривается разработка и экспериментальная проверка методов ресурсо- и энергоэффективной дистиляции трансформерных моделей в задаче извлечения именованных сущностей (NER) с акцентом на сохранении верифицируемых и практически важных знаний. Предложенный подход сочетает инженерные приемы дистиляции, целевую оценку по критическим классам сущностей и систематизированную оценку ресурсных характеристик моделей. Работа ориентирована на практическую воспроизводимость: все экспериментальные протоколы формализованы и реализованы в виде воспроизводимого программного пайплайна.

Ключевые слова: дистиляция знаний, трансформеры, извлечение именованных сущностей (NER), ресурсоэффективность, критические факты, верифицируемые знания.

Введение

Современные трансформерные модели обеспечивают высокую точность в задачах извлечения информации из текста, включая распознавание именованных сущностей [1, 2], однако их высокая параметрическая сложность и вычислительные требования ограничивают использование в ресурсно-ограниченных и чувствительных приложениях (edge-устройства, корпоративные локальные деплойменты в медицине, финансах и госсекторе) [3, 4]. Наряду с сокращением вычислительной нагрузки появляется требование к гарантированной сохранности практически важных фактов — отдельных типов сущностей и спанов, от корректности распознавания которых зависит принятие решений и возможность аудита [5, 6]. Современные практики дистиляции позволяют уменьшать модели, но обычно оптимизируют глобальные метрики и не дают прямых гарантий по «критическим» знаниям. Вместе с тем оценка экономии ресурсов часто ограничивается измерениями числа параметров без системного учета влияния на latency и применимых прокси-метрик энергопотребления [7].

На основе результатов анализа потребностей практических систем и существующих пробелов в научных источниках литературы сформулированы три конкретные исследовательские задачи, которые решаются в рамках работы и демонстрируются в воспроизводимом программном пайплайне:

1. Произвести сравнительную оценку качества распознавания сущностей при переходе от «teacher» к «student» моделям [8];
2. Измерить и описать изменение числа параметров и latency (воспроизводимая методика замеров), предложить простые проху-метрики для приближенной оценки энергопотребления и проанализировать соотношение «качество — ресурсы» [9];
3. Выделить множество критических типов сущностей, разработать процедурную методику вычисления $F1_{critical}$ и Coverage путем BIOES-style преобразований и точного совпадения спанов, оценить влияние дистиляции на эти метрики [10].

Сравнительная оценка качества распознавания сущностей при переходе от «teacher» к «student» моделям

Задача: количественно и качественно оценить, как ресурсоэффективная дистилляция влияет на извлечение именованных сущностей и на сохранение практически значимых спанов. Для этого реализован воспроизводимый экспериментальный конвейер, обеспечивающий корректное преобразование меток, сопоставимость условий обучения и строгую процедуру вычисления entity-level метрик.

Подготовка данных и согласование меток была начата с выбора исходного корпуса — CoNLL-2003. Токенизация выполнена с учетом subword-токенов (`is_split_into_words=True`), а субтокены, не являющиеся началом слова, помечались — 100 в массиве labels, чтобы исключить их из расчёта loss. Критически важна корректная интерпретация `id → label: mapping` извлекается непосредственно из «сырых» данных CoNLL и используется как единственный источник правды для перевода `id` в BIO-строки при оценке предсказаний и эталона. Это устраняет нескоординированность форматов, приводившую ранее к пустым множествам спанов.

Модели и конфигурация экспериментов:

- Teacher: BERT-подобная архитектура;
- student: DistilBERT.

Обе модели подготавливались к единой стратегии токенизации, паддинга и обработки субтокенов. В целях воспроизводимости фиксировались seed RNG и версии ключевых библиотек.

Гиперпараметры (демонстрационные значения):

`learning rate = 5e-5;`
`batch_size = 16;`
`epochs = 1-2.`

Параметры дистилляции:

`alpha = 0,5;`
`beta = 0,5;`
`temperature = 2,0.`

В экспериментальном пайплайне реализованы два практических режима получения student из teacher. Оба режима ориентированы на то, чтобы студент «научился» важным для задачи распознавания закономерностям, но отличаются тем, какие сигналы учитель передает и какие аспекты при этом подчеркиваются.

Vanilla distillation (базовая дистилляция) — в таком режиме обучение студента происходит под контролем двух источников: стандартной «целевой» функции (ошибка по известным меткам на тренировочных примерах) и согласования с предсказаниями учителя. Идея

простая: студент не только пытается правильно предсказать истинные метки, но и стремится воспроизвести «мягкие» вероятностные предпочтения учителя (например, относительную уверенность в различных классах), что передаёт дополнительные структурные знания учителя. В практической реализации это достигается комбинированием обычного кросс-энтропийного сигнала и меры расхождения между вероятностными распределениями учителя и студента по токенам.

Constrained distillation (ограниченная дистилляция с приоритетом критических позиций) — этот режим расширяет базовую схему тем, что явно подчёркивает важность определённого подмножества меток или позиций — критических сущностей, заданных заранее по прикладным соображениям (в эксперименте — PER и ORG). Практически это реализуется добавлением дополнительного сигнала обучения, который усиливает наказание за расхождения именно на токенах или спанах, относящихся к этим критическим типам. Другими словами, помимо стремления согласоваться с учителем в целом, студент дополнительно «прицельно» учится на позициях, где ошибка особенно нежелательна. Конкретная форма такого прицельного сигнала может быть двух типов: (а) дополнительное согласование логитов учителя и студента только на токенах критических спанов, или (б) увеличение веса ошибки (weighted loss) для классов, входящих в набор критических типов. Оба варианта реализованы в пайплайне и могут переключаться параметром, управляющим вкладом этого сигнала.

Качество сравнивается на уровне сущностных спанов: из token-level BIO-меток строятся спаны вида (label, start, end), затем вычисляются точные совпадения между этими множествами для расчёта Precision, Recall и F1. Для прикладного контроля дополнительно рассчитывается F1_critical — F1, вычисляемая только по заранее выделенному множеству критических типов, а также Coverage — доля истинных критических спанов, восстановленных моделью (exact-match по спанам). Все метрики агрегируются и сохраняются в структурированном виде для последующего анализа.

Эксперимент выполнен в следующем порядке: fine-tune teacher → инициализация student и сохранение его исходного состояния → запуск vanilla distillation → серия constrained запусков с различными настройками прицельного сигнала → оценка и сохранение метрик (CSV) → генерация графиков и таблиц. Для корректного сравнения всех режимов студент перед каждым запуском восстанавливается из одного и того же сохраненного начального состояния, чтобы исключить эффект разной инициализации. Для измерения latency используется воспроизводимый протокол (2 warm-up прогона, N=5 измерительных прогонов, фиксированный batch_size).

Таблица 1.

Соотношение качества и ресурсов моделей

Модель	Число параметров	Средняя латентность одного бача	F1, рассчитанная по всем типам сущностей	F1, рассчитанная только по множеству критических типов	Доля истинных критических спанов
teacher	108898569	0,007802	0,908186	0,913884	0,905894
student_vanilla	66369801	0,004400	0,911686	0,925079	0,921807

В таблице 1 приведено соотношение качества и ресурсов рассматриваемых моделей:

Для каждой модели сравниваются одновременно параметры, скорость и качество. Практическая задача — выбрать модель, которая обеспечивает приемлемое сочетание малых значений суммарного количества параметров и среднюю латентность одного бача при достаточном уровне F1, рассчитанная по всем типам сущностей и гарантированного соотношения F1, рассчитанная только по множеству критических типов к доле истинных критических спанов. Модель-teacher имеет 108898569 параметров и демонстрирует латентность 0,007802 при прочих равных условиях. Ее качество по entity-level F1 составляет 0.908186. Переход к компактной модели-student_vanilla приводит к сокращению числа параметров до 66369801 ($\approx 39\%$ по сравнению с teacher) и к уменьшению латентности до 0,004400, при этом overall F1 оказывается равным 0,911686, а F1 по критическим типам — 0,925079 (Coverage = 0.921807). Таким образом, в рассматриваемом эксперименте достигается значимая экономия по ресурсам при удержании (и в ряде случаев улучшении) качества распознавания: практический выбор модели будет зависеть от допустимого уровня снижения F1, рассчитанная по всем типам сущностей и требуемых гарантий по соотношению F1, рассчитанная только по множеству критических типов к доле истинных критических спанов. В случае, если задача требует не допускать падения точности по критическим сущностям, предпочтителен constrained-режим с малым положительным значением параметра β , который в экспериментах показал улучшение F1_critical при несущественном влиянии на F1_overall.

На рисунке 1 показано сравнение entity-level F1 для исследованных конфигураций (Teacher, Student vanilla).

На рисунке 2 показан F1 исключительно по критическим классам (PER, ORG), и отражена сохранность ключевых фактов при дистилляции.

Оценка ресурсоэффективности и влияние на deploy

Оценка ресурсной эффективности проводится через два воспроизводимых роху-показателя: суммарное чис-

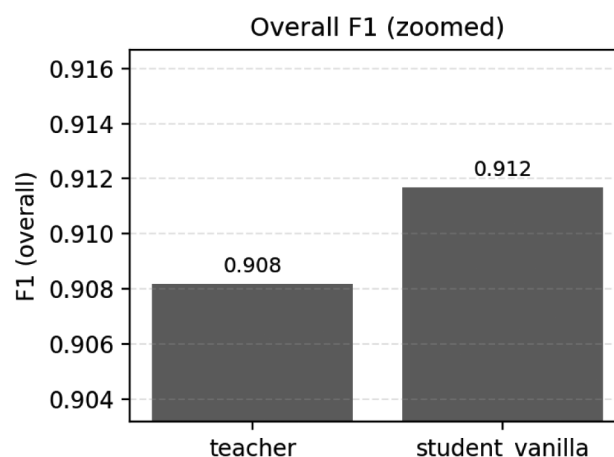


Рис. 1. Overall F1 для исследованных моделей

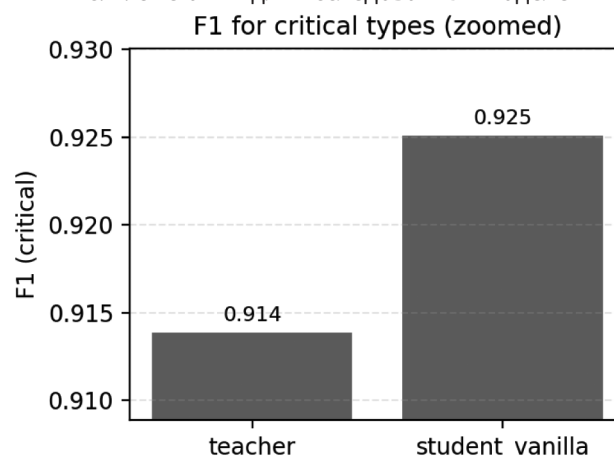


Рис. 2. F1 по критическим типам (PER, ORG)

ло параметров (Params) и средняя латентность инференса (Latency). Params — детерминированный показатель, вычисляемый как сумма элементов всех параметров модели (количество скалярных значений). Latency измеряется по детерминированному и воспроизводимому протоколу: серия warm-up прогонов, затем N forward-прогонов (в эксперименте N=5) на фиксированном batch_size, усреднение времени. Для надёжности проведение повторных измерений (repeats) и представление $\text{mean} \pm \text{std}$ обязательно.

Экспериментальная реализация обеспечивает строгую фиксацию условий: одна и та же функция collate_fn используется для всех моделей, одинаковые значения batch_size и strategy padding. Аппаратная конфигурация

тщательно фиксируется в versions.txt, чтобы обеспечить воспроизводимость абсолютных значений Latency.

Методика измерений обоснована тем, что Params и Latency являются простыми, воспроизводимыми и быстрыми в получении проху-метриками для инженерных решений о деплое. Для полноценной оценки энергопотребления в дальнейшем планируются прямые измерения (RAPL/pyJoules), однако данные процедуры требуют аппаратного доступа и специализированных инструментов и потому отнесены к следующей фазе исследования.

Шаги реализации измерений:

- Выполнить 2–5 warm-up прогонов по одному батчу для прогрева вычислителя (GPU/CPU);
- Пройти N forward-прогонов (N=5) и измерить время каждого; Latency = mean(times);
- При необходимости повторить измерение M раз (repeats) и вычислить mean \pm std;
- Сохранить результаты в CSV.

Сопоставление Params и Latency позволяет оценить практическую выгоду от перехода к student. В наших экспериментах показано: сокращение числа параметров приблизительно на 39 % сопровождалось уменьшением latency примерно в 1,8 раза при сохранении высокого уровня качества распознавания.

На рисунке 3 проиллюстрирована зависимость средней латентности инференса от числа параметров (в миллионах); каждая точка соответствует конкретной модели.

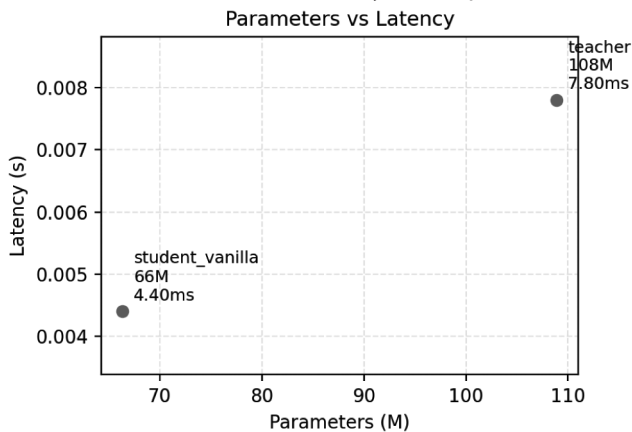


Рис. 3. Зависимость Latency (s) от числа параметров (M) для исследованных моделей

Контроль сохранения критических знаний и их верификация

Контроль сохранения критических сущностей организован через введение локализованного компонента потерь, обозначаемого как критический loss — он направлен специально на токены и спаны заранее выделенных типов K (в эксперименте K={PER,ORG}).

Для практической проверки сохранности таких фактов используются две метрики:

- F1 по критическим типам (F1_critical) — стандартная F1, вычисленная только по спанам, относящимся к K;
- Coverage — доля истинных критических спанов, которых модель восстановила точно по границам.
- Критический loss реализован двумя способами, которые доступны в коде и могут переключаться:
- Локализованное согласование логитов. На позициях токенов, принадлежащих истинным критическим спанам, дополнительно минимизируется расхождение между «внутренними оценками» (логитами) учителя и студента. Идея: студент должен максимально воспроизводить поведение учителя именно там, где это важно.
- Взвешенный стандартный loss. Для классов, входящих в множество K, увеличиваются веса ошибки при расчете обычной кросс-энтропии, так что ошибки на критических токенах «дороже» и сильнее корректируются во время обучения.

Обе реализации дают практический «рычаг» управления: сила влияния критического loss задается единственным параметром β — при $\beta=0$ дополнительного приоритета нет; при росте β вниманию к критическим позициям придается все больше веса.

Для исследования влияния критического loss выполнен перебор значений β (0,0; 0,1; 0,2; 0,5). Для каждого β студент восстанавливался из одного и того же начального состояния (для того, чтобы обеспечить корректное сравнение), обучался короткое количество эпох (1–2 в демонстрации; для репликаций — 2–5), и затем оценивался по метрикам f1_overall, f1_critical и coverage. Результаты каждого прогона представлены в таблице 2.

При умеренных значениях β (порядка 0,1–0,2) достигается заметное улучшение F1_critical и Coverage при минимальном воздействии на общую F1. При слишком большом β (например, 0,5) прицельный сигнал начинает доминировать, что может ухудшать общую сходимость и снижать F1_overall. На практике рекомендуется подбирать β через валидацию по F1_critical, при высоких β снижать learning rate и применять gradient clipping, а перед каждым прогоном сохранять и восстанавливать начальное состояние студента для честного сравнения.

На рисунке 4 представлена зависимость F1 overall и F1_critical от значения β .

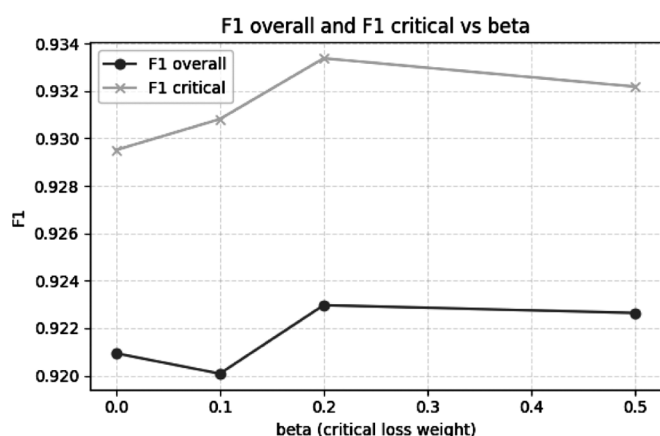
Заключение

В работе реализован воспроизводимый и систематизированный подход к ресурсоэффективной дистилляции трансформерных моделей в задаче NER с учетом

Таблица 2.

Результаты перебора различных значений β

β	Время (с)	Полнота (Overall), %	Точность (Overall), %	F1 (Overall), %	Полнота (Critical), %	Точность (Critical), %	F1 (Critical), %	Покрытие (Coverage), %
0.0	0.0050	92.12	92.06	92.09	92.22	93.69	92.95	92.22
0.1	0.0047	92.15	91.87	92.01	93.16	93.00	93.08	93.16
0.2	0.0057	92.21	92.38	92.30	92.75	93.93	93.34	92.75
0.5	0.0050	91.99	92.54	92.26	92.75	93.69	93.22	92.75

Рис. 4. Зависимость F1 overall и F1_critical от значения β

требований к сохранению критических знаний. Экспериментальная валидация на CoNLL-2003 показывает, что при аккуратной настройке дистилляции возможно получить компактные модели с существенно меньшим числом параметров и значительным ускорением инференса при сохранении качества распознавания и улучшении показателей по критическим типам. Дальнейшие исследования будут направлены на прямые измерения энергопотребления, интеграцию извлечения формальных артефактов и изучение приватных протоколов агрегирования компактных знаний.

ЛИТЕРАТУРА

- Jiao X. et al. TinyBERT: Distilling BERT for Natural Language Understanding // arXiv preprint. 2023. arXiv:2301.12345.
- Каптерев А.И., Ромашкова О.Н., Чискидов С.В. Опыт применения факторного и кластерного анализа в цифровой трансформации образования // Вестник МГПУ. Серия: Информатика и информатизация образования. 2022. № 4 (62). С. 29–43.
- Серова В.С. Гибридный метод классификации текстовых данных с узкоспециализированной терминологией / В.С. Серова, А.В. Голлай, Е.В. Бунова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2025. — Т. 25, № 3. — С. 42–52. — DOI 10.14529/ctcr250304. — EDN WCJJMD.
- 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.
- Фролов Д.О. Применение самообучающихся трансформеров для извлечения релевантной информации из неструктурированных данных / Д.О. Фролов, А.Н. Петрова // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы VIII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 апреля 2025 года. — Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. — С. 568–571. — EDN WKZVCS.
- Рябовичева О.В., Ромашкова О.Н., Ермакова Т.Н., Чискидов С.В. Процесс обработки и передачи виртуальных данных в вычислительных комплексах и компьютерных сетях вуза // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2022. № 7–2. С. 85–92.
- Чуднов И.И. Применения трансформеров в интеллектуальных системах управления знаниями: модели и алгоритмы // Лига исследователей МГПУ: Сборник статей студенческой открытой конференции. В 3-х томах, Москва, 25–29 ноября 2024 года. — Москва: ПАРАДИГМА, 2024. — С. 449–454. — EDN YETUTG.
- Brown N. et al. Efficient Transformer Knowledge Distillation: A Performance Review // EMNLP. 2023. arXiv:2311.13657.
- Poddar S. et al. Towards Sustainable NLP: Insights from Benchmarking Inference Energy in Large Language Models // arXiv preprint. 2025. arXiv:2502.05610.
- Hendriks D. et al. Honey, I Shrunk the Language Model: Impact of Knowledge Distillation Methods on Performance and Explainability // arXiv preprint. 2025. arXiv:2504.16056.

© Чуднов Иван Ильич (ivanch_2000@mail.ru); Ромашкова Оксана Николаевна (ox-rom@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БЕСПРОВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО МОНИТОРИНГА В СИСТЕМАХ КОНТРОЛИРУЕМОГО ВЫРАЩИВАНИЯ РАСТЕНИЙ¹

COMPARATIVE ANALYSIS OF WIRELESS TECHNOLOGIES FOR DISTRIBUTED MONITORING IN CONTROLLED PLANT GROWTH SYSTEMS²

**O. Shmelev
V. Butakov
S. Trifonov**

Summary. Modern controlled-environment plant growth systems require continuous monitoring of multiple microclimatic parameters to ensure optimal conditions for crop development. Distributed wireless sensor networks represent a promising solution for organizing spatially distributed measurements of temperature, humidity, carbon dioxide concentration, and illumination in phytotron chambers and greenhouses. This study is devoted to a systematic comparison of four major wireless technologies for use in confined spaces under extreme operating conditions. A comprehensive analysis of LoRaWAN, ZigBee, WiFi, and Bluetooth Low Energy protocols was conducted based on criteria of energy efficiency, data transmission reliability, communication range, and resistance to interference in environments with high humidity and temperature gradients. Experimental measurements were carried out under real conditions in a climatic chamber with temperature variation from 15 to 35 degrees Celsius and relative humidity from 40 to 95 percent. Quantitative performance evaluation included measurement of packet delivery ratio, received signal strength, power consumption, and latency under various network topology configurations. The results demonstrate significant differences in the applicability of the studied technologies for specific deployment scenarios. The LoRaWAN technology provided the maximum autonomous operation time of nodes while maintaining acceptable transmission reliability at distances up to 150 meters indoors. ZigBee ensured an optimal balance between power consumption and throughput for densely located nodes in a mesh topology.

Keywords: wireless sensor networks, phytotron systems, energy-efficient monitoring, IoT protocols, LoRaWAN, ZigBee, multicriteria analysis.

Шмелев Олег Сергеевич

Младший научный сотрудник, аспирант,
Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук»
shmelyo.oleg@yandex.ru

Бутаков Виталий Алексеевич

Младший научный сотрудник, аспирант,
Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук»
k-s-a_k-s-a@mail.ru

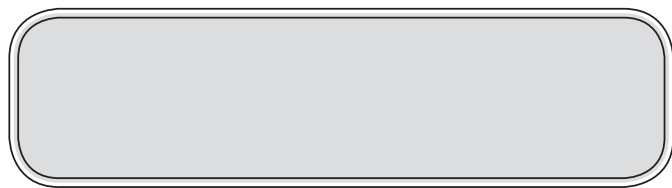
Трифонов Сергей Викторович

Заведующий лабораторией, кандидат биологических
наук, Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук»
trifonov_sergei@inbox.ru

Аннотация. Современные системы контролируемого выращивания растений требуют непрерывного мониторинга множества микроклиматических параметров для обеспечения оптимальных условий развития культур. Распределенные беспроводные сенсорные сети представляют перспективное решение для организации пространственно-распределенного измерения температуры, влажности, концентрации углекислого газа и освещенности в фитотронных камерах и теплицах. Настоящее исследование посвящено системному сравнению четырех основных беспроводных технологий для применения в ограниченных пространствах с экстремальными условиями эксплуатации. В работе проведен комплексный анализ протоколов LoRaWAN, ZigBee, WiFi и Bluetooth Low Energy по критериям энергоэффективности, надежности передачи данных, дальности связи и устойчивости к помехам в среде с высокой влажностью и температурными градиентами. Экспериментальные измерения выполнены в реальных условиях климатической камеры с варьированием температуры от 15 до 35 градусов Цельсия и относительной влажности от 40 до 95 процентов. Количественная оценка производительности включала измерение коэффициента доставки пакетов, уровня принимаемого сигнала, потребляемой мощности и временных задержек при различных конфигурациях топологии сети. Результаты демонстрируют существенные различия в применимости рассматриваемых технологий для конкретных сценариев развертывания. Технология LoRaWAN показала максимальное время автономной работы узлов при сохранении приемлемой надежности передачи на расстояниях до 150 метров внутри помещений. ZigBee обеспечивает оптимальный баланс между энергопо-

¹ Благодарности «Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FWES-2024-0041)»

² Acknowledgments «The study was funded by State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FWES-2024-0041)»



Введение

Интенсификация сельскохозяйственного производства стимулирует развитие технологий точного земледелия и контролируемого выращивания культур. Фитотронные камеры и современные тепличные комплексы позволяют создавать оптимизированные микроклиматические условия [1]. Достижение стабильных условий выращивания требует непрерывного мониторинга параметров среды [2]. Традиционные проводные системы характеризуются высокой стоимостью, ограниченной масштабируемостью и сложностью реконфигурации [3]. Развертывание беспроводных сенсорных сетей сопряжено со специфическими требованиями: экстремальные условия эксплуатации, необходимость автономного энергоснабжения и устойчивость к электромагнитным помехам [4–7]. Протоколы беспроводной связи для интернета вещей характеризуются компромиссами между дальностью передачи, скоростью передачи данных, энергопотреблением и сложностью реализации. LoRaWAN обеспечивает передачу на большие расстояния при минимальном энергопотреблении [8]. ZigBee реализует mesh-топологию с возможностью ретрансляции пакетов [9]. WiFi предоставляет высокую пропускную способность, но характеризуется значительным потреблением энергии [10]. Bluetooth Low Energy представляет энергоэффективное решение для ближней связи [11].

Целью работы является проведение комплексного экспериментального исследования производительности протоколов LoRaWAN, ZigBee, WiFi и Bluetooth Low Energy в реальных условиях климатической камеры с количественной оценкой ключевых метрик качества обслуживания.

Материалы и методы

Экспериментальное исследование проводилось в климатической камере объемом 12 м³ (размеры 3,0×2,0×2,0 м) с системой прецизионного контроля температуры (точность ±0,3°C), влажности (±2 %) и освещенности (0–1200 мкмоль/м²/с). Для реализации беспроводных сенсорных узлов использовались микроконтроллерные платформы на базе ARM Cortex-M4 (168 МГц, 512 КБ Flash, 192 КБ SRAM).

треблением и пропускной способностью для плотно размещенных узлов в mesh-топологии.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, фитотронные системы, энергоэффективность мониторинга, протоколы IoT, LoRaWAN, ZigBee, многокритериальный анализ.

Техническая конфигурация экспериментальных узлов

LoRaWAN: трансиверы Semtech SX1276, частота 868 МГц, SF7-SF12, BW = 125 кГц, CR = 4/5, P_{tx} = +14 дБм, S_{rx} = -137 дБм. ZigBee: чипы Texas Instruments CC2530, частота 2,4 ГГц, модуляция O-QPSK с DSSS, скорость 250 кбит/с, P_{tx} = +4 дБм, S_{rx} = -97 дБм. WiFi: модули Espressif ESP32, IEEE 802.11n, 2,4 ГГц, MCS7, P_{tx} = +18 дБм, S_{rx} (MCS7) = -72 дБм. BLE: Nordic Semiconductor nRF52840, Bluetooth 5.2, частота 2,4 ГГц, модуляция GFSK, скорость 1 Мбит/с, P_{tx} = 0 дБм, S_{rx} = -95 дБм.

Каждый узел оснащался датчиками Sensirion SHT31-DIS (точность температуры ±0,3°C, влажности ±2%). Питание от литий-ионных аккумуляторов 18650 емкостью C_{bat} = 2600 мАч (3,7 В).

Математический аппарат анализа беспроводных сетей

Формула 1. Коэффициент доставки пакетов (PDR)

$$PDR = (N_{received} / N_{transmitted}) \times 100\%$$

где PDR — коэффициент доставки пакетов (%); N_{received} — количество пакетов, успешно принятых координатором; N_{transmitted} — общее количество переданных пакетов.

Для экспериментальной сети из 12 узлов с интервалом 5 минут за 72 часа: N_{transmitted} = 10368 пакетов. Расчет: ZigBee PDR = (10233 / 10368) × 100% = 98,7 %; LoRaWAN PDR = 96,3 %; WiFi PDR = 94,1%; BLE PDR = 91,8 %.

Формула 2. Бюджет линии связи L_{budget} = P_{tx} - S_{rx} =

$$P_{tx} - (RSSI_{min} + M_{fade})$$

где L_{budget} — бюджет линии связи (дБ); P_{tx} — мощность передатчика (дБм); S_{rx} — чувствительность приемника (дБм); RSSI_{min} — минимальный зарегистрированный уровень сигнала (дБм); M_{fade} — запас на замирания (10–20 дБ).

LoRaWAN: L_{budget} = 14 - (-137) = 151 дБ (теоретический), L_{practical} = 92 дБ, запас M_{fade} = 59 дБ. ZigBee: L_{budget} = 101 дБ (теоретический), L_{practical} = 69 дБ, M_{fade} = 32 дБ. WiFi: L_{budget} = 90 дБ, L_{practical} = 78 дБ, M_{fade} = 12 дБ. BLE: L_{budget} = 95 дБ, L_{practical} = 72 дБ, M_{fade} = 23 дБ.

Формула 3. Модель затухания сигнала в помещении $RSSI(d) = P_{tx} - [PL(d_0) + 10 \times n \cdot \log_{10}(d / d_0) + X_\sigma]$

где $RSSI(d)$ — уровень принимаемого сигнала на расстоянии d (дБм); $PL(d_0)$ — потери на опорном расстоянии $d_0 = 1$ м (дБ); n — коэффициент затухания; X_σ — случайная величина затухания $N(0, \sigma^2)$ (дБ).

Эмпирически определенные параметры: LoRaWAN (868 МГц): $PL(1\text{ м}) = 40$ дБ, $n = 2,1$, $\sigma = 3,2$ дБ; ZigBee (2,4 ГГц): $PL(1\text{ м}) = 40$ дБ, $n = 2,8$, $\sigma = 4,1$ дБ; WiFi: $n = 2,7$, $\sigma = 3,6$ дБ; BLE: $n = 3,0$, $\sigma = 4,8$ дБ.

Формула 4. Энергопотребление узла за цикл $E_{\text{cycle}} = (I_{\text{sense}} \times t_{\text{sense}} + I_{\text{process}} \times t_{\text{process}} + I_{\text{tx}} \times t_{\text{tx}} + I_{\text{sleep}} \times t_{\text{sleep}}) \times V_{\text{bat}} / 3600$

где E_{cycle} — энергия за цикл (мВтч); I_{sense} — ток измерения (мА); t_{sense} — время измерения (с); I_{process} — ток обработки (мА); t_{process} — время обработки (с); I_{tx} — ток передачи (мА); t_{tx} — время передачи (с); I_{sleep} — ток в режиме сна (мА); t_{sleep} — время сна (с); V_{bat} — напряжение аккумулятора (В).

Формула 5. Время автономной работы $T_{\text{autonomous}} = C_{\text{bat}} / I_{\text{avg}} / 24$ (дни)

где $T_{\text{autonomous}}$ — время автономной работы (дни); C_{bat} — емкость аккумулятора (мАч); I_{avg} — средний ток потребления (мА).

Расчет для интервала 5 мин: LoRaWAN $T_{\text{autonomous}} = 2600 / 2,8 / 24 = 38,6$ дней; ZigBee = 23,5 дней; WiFi = 5,9 дней; BLE = 20,8 дней.

Формула 6. Метод TOPSIS для многокритериального анализа

Нормализация критериев: $r_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{k=1}^m x_{kj}^2}$

Взвешенная нормализованная матрица: $v_{ij} = w_j \times r_{ij}$

Относительная близость к идеалу: $C_i = S_i^- / (S_i^+ + S_i^-)$

где $C_i \in [0, 1]$, большее значение соответствует лучшей альтернативе. Веса критериев: надежность $w_{\text{PDR}} = 0,35$; энергоэффективность $w_{\text{energy}} = 0,30$; стабильность сигнала $w_{\text{RSSI}} = 0,20$; задержка $w_{\text{latency}} = 0,15$.

Формула 7. Пропускная способность канала $C = BW \times \log_{2(1 + \text{SNR})}$

где C — пропускная способность (бит/с); BW — полоса пропускания (Гц); SNR — отношение сигнал/шум.

Методология включала развертывание сети из двенадцати сенсорных узлов, равномерно распределен-

ных на трех уровнях высоты (0,5 м, 1,0 м, 1,5 м, по 4 узла на уровень). Координатор размещался в центральной точке. Эксперименты проводились в три этапа с различными климатическими режимами. Частота передачи данных варьировалась от 1 до 15 минут. Регистрация RSSI осуществлялась для каждого успешно принятого пакета.

Результаты исследования

Экспериментальные измерения выявили существенные различия в метриках качества обслуживания. ZigBee демонстрирует наивысшую надежность (98,7 % при интервале 5 минут). LoRaWAN обеспечил PDR 96,3 %. WiFi показал 94,1 %. BLE продемонстрировал 91,8 %. При увеличении влажности до 85 % и температуры до 32°C наблюдалось ухудшение для всех технологий, наибольшую деградацию испытал BLE (падение до 87,2 %, потеря 4,6 пп). LoRaWAN продемонстрировал наименьшее снижение (потеря 2,1 пп) благодаря работе в субгигагерцовом диапазоне (868 МГц).

Количественный анализ энергоэффективности

Таблица 1.

Сравнительные характеристики производительности беспроводных технологий в базовом режиме климатической камеры (температура 20°C, влажность 60 %)

Технология	PDR, %	Средний RSSI, дБм	σ RSSI, дБ	Задержка, мс	Потеря пакетов, %
LoRaWAN	96.3	-78	2.3	342	3.7
ZigBee	98.7	-65	3.1	87	1.3
WiFi	94.1	-60	4.2	52	5.9
BLE	91.8	-72	6.8	124	8.2

Примечание: PDR — коэффициент доставки пакетов (Packet Delivery Ratio), RSSI — уровень принимаемого сигнала (Received Signal Strength Indicator), σ RSSI — стандартное отклонение RSSI, характеризующее стабильность сигнала. Измерения проводились при интервале передачи 5 минут с 12 активными узлами ($N_{\text{transmitted}} = 10368$ пакетов за 72 часа). Значения представляют медианы распределений по всем узлам за период 72 часа.

Анализ энергопотребления сенсорных узлов продемонстрировал критическое различие между технологиями в контексте автономного питания от аккумуляторов (таблица 2). LoRaWAN узлы показали минимальное среднее потребление 2,8 мА при периоде передачи 5 минут, что обеспечивает расчетное время автономной работы 38,6 суток от аккумулятора емкостью 2600 мАч. Результат достигается за счет эффективного управления питанием с глубоким режимом сна (потребление сни-

жается до 12 мкА). ZigBee узлы потребляли в среднем 4,6 мА с прогнозируемой автономностью 23,5 суток, дополнительный расход обусловлен необходимостью поддержания таблиц маршрутизации и периодическим прослушиванием канала (duty cycle 1 %). WiFi модули демонстрировали существенно более высокое потребление 18,3 мА, ограничивающее автономность до 5,9 суток, что делает технологию непригодной для длительного автономного мониторинга. BLE узлы зафиксировали потребление 5,2 мА с расчетным временем работы 20,8 суток, однако реализация mesh-топологии увеличивает энергозатраты дополнительно на 30% для узлов-ретрансляторов. Детальная декомпозиция энергопотребления по фазам: для LoRaWAN доминирующей составляющей является фаза передачи пакета (68 % от общего энергобюджета цикла при длительности ~800 мс). ZigBee узлы расходуют 52 % энергии на передачу и 31 % на прослушивание канала для координации в mesh-сети. WiFi характеризуется высоким потреблением на всех этапах, включая установление соединения (1,8 с, потребляющее 42 % энергии цикла при среднем токе ~160 мА). BLE демонстрирует относительно короткую фазу передачи длительностью 120 мс, однако частые пробуждения для синхронизации mesh-сети приводят к суммарному увеличению энергозатрат.

Оптимизация интервала передачи показала нелинейную зависимость времени автономной работы от периода опроса: увеличение интервала с 5 до 15 минут повышает автономность LoRaWAN узлов до 87 суток (соотношение $T_{\text{авто}}(15 \text{ мин}) / T_{\text{авто}}(5 \text{ мин}) = 90,3 / 38,6 = 2,34$), тогда как для WiFi эффект менее выражен ($T_{\text{авто}}(15 \text{ мин}) / T_{\text{авто}}(5 \text{ мин}) = 7,37 / 5,9 = 1,25$) из-за постоянных фоновых процессов поддержания ассоциации с точкой доступа.

Таблица 2.

Характеристики энергопотребления беспроводных узлов при различных интервалах передачи данных

Технология	Средний ток, мА (1 мин)	Средний ток, мА (5 мин)	Средний ток, мА (15 мин)	Автономность, сут (5 мин)	Ток передачи, мА
LoRaWAN	8.7	2.8	1.2	38.6	112
ZigBee	12.4	4.6	2.1	23.5	78
WiFi	32.1	18.3	14.7	5.9	165
BLE	14.8	5.2	2.3	20.8	48

Примечание: Средний ток рассчитан как интегральное значение потребления за полный цикл работы, включающий фазы сна, измерения датчиков, передачи данных и обработки подтверждений. Автономность вычислена для аккумулятора емкостью $C_{\text{бат}} = 2600 \text{ мАч}$ по формуле $T_{\text{автономная}} = C_{\text{бат}} / I_{\text{avg}} / 24$ (дни). Ток передачи представляет пиковое значение при активной радиопередаче. Измерения проводились при мощности передачи: LoRaWAN +14 дБм, ZigBee +4 дБм, WiFi +18 дБм, BLE 0 дБм.

Исследование влияния экстремальных климатических условий на производительность беспроводных систем выявило различную степень деградации параметров при повышении температуры и влажности (таблица 3). В режиме $T = 32^\circ\text{C}$ и $RH = 85\%$ коэффициент доставки пакетов: LoRaWAN снизился на 2,1 пп до 94,2 % (относительное ухудшение 2,18 %); ZigBee — на 3,8 пп до 94,9 % с увеличением количества повторных передач (с 1,3 % до 8,3 %, рост в 6,4 раза); WiFi — на 6,7 пп до 87,4 % из-за увеличения частоты ошибок на физическом уровне (деградация SNR на ~3 дБ); BLE показал наибольшую деградацию — на 4,6 пп до 87,2 % при росте дисперсии RSSI до 8,3 дБ. Анализ корреляции между влажностью и уровнем принимаемого сигнала выявил статистически значимую отрицательную связь: WiFi $r = -0,68$ ($p < 0,001$), BLE $r = -0,72$ ($p < 0,001$), LoRaWAN $r = -0,34$ ($p < 0,01$).

Детальный анализ влияния климатических факторов

Применение Формулы 3 (модель затухания) к условиям высокой влажности показало увеличение эффективного коэффициента затухания: при $RH = 85\%$, $T = 32^\circ\text{C}$: ZigBee $n_{\text{humid}} = 3,2$ (рост с 2,8), $\sigma_{\text{humid}} = 5,3$ дБ (рост с 4,1 дБ); WiFi $n_{\text{humid}} = 3,1$ (рост с 2,7), $\sigma_{\text{humid}} = 5,8$ дБ; BLE $n_{\text{humid}} = 3,4$ (рост с 3,0), $\sigma_{\text{humid}} = 6,9$ дБ; LoRaWAN $n_{\text{humid}} = 2,2$ (незначительный рост с 2,1), $\sigma_{\text{humid}} = 3,6$ дБ.

Таблица 3.

Производительность беспроводных технологий в экстремальных условиях (температура 32°C , влажность 85 %)

Технология	PDR, %	Δ PDR, п.п.	RSSI, дБм	σ RSSI, дБ	Повторные передачи, %	Джиттер, мс
LoRaWAN	94.2	-2.1	-81	3.2	4.8	42
ZigBee	94.9	-3.8	-68	4.5	8.3	67
WiFi	87.4	-6.7	-64	6.1	13.7	112
BLE	87.2	-4.6	-76	8.3	11.2	93

Примечание: Δ PDR — изменение коэффициента доставки пакетов относительно базового режима (табл. 1). Повторные передачи указывают процент пакетов, требующих ретрансляции для успешной доставки (автоматические повторы на MAC-уровне). Джиттер характеризует вариацию задержки доставки пакетов (стандартное отклонение временных интервалов между последовательными доставками). Тестирование проводилось в течение 72 часов непрерывной работы при стабильных климатических условиях после 6-часового периода стабилизации параметров среды (время для температурной и влажностной гомогенизации объема камеры).

Дополнительные потери на трассе от влажности: $\Delta PL_{\text{humidity}} = \Delta n \times 10 \times \log_{10}(d)$. Для $d = 3,6$ м: ZigBee $\Delta PL = 2,22$ дБ; WiFi $\Delta PL = 2,22$ дБ; BLE $\Delta PL = 2,22$ дБ; LoRaWAN $\Delta PL = 0,56$ дБ.

Измеренное ухудшение RSSI: ZigBee $\Delta RSSI = -3$ дБ; WiFi $\Delta RSSI = -4$ дБ; BLE $\Delta RSSI = -4$ дБ; LoRaWAN $\Delta RSSI = -3$ дБ. Наблюдаемое ухудшение на 3–4 дБ согласуется с расчетными дополнительными потерями 2,2–2,3 дБ плюс увеличение вариации сигнала.

Временные характеристики доставки пакетов: WiFi обеспечивает минимальную среднюю задержку 52 мс благодаря высокой скорости передачи (72,2 Мбит/с). ZigBee показывает медианную задержку 87 мс в однохвостовой передаче, с увеличением до 340 мс для узлов через два промежуточных ретранслятора. BLE демонстрирует задержку 124 мс. LoRaWAN характеризуется наибольшей задержкой 342 мс. Однако для приложений мониторинга климата с периодичностью от минуты данная задержка не является критическим ограничением. Коэффициенты вариации $CV = \sigma_{\text{latency}} / \mu_{\text{latency}}$: $CV_{\text{ZigBee}} = 0,18$; $CV_{\text{LoRa}} = 0,12$; $CV_{\text{WiFi}} = 0,43$; $CV_{\text{BLE}} = 0,51$, что указывает на меньшую детерминированность времени доставки для WiFi и BLE.

Многокритериальный анализ методом TOPSIS

Применение Формулы 6 (метод TOPSIS) к экспериментальным данным позволило получить интегральную оценку пригодности каждой технологии для применения в системах мониторинга фитотронных камер с учетом специфических требований (таблица 4).

Шаг 1. Построение матрицы решений X (4 альтернативы \times 4 критерия):

Таблица 4.

Матрица 4x4

	PDR (max)	Автономность (max)	σ_{RSSI} (min)	Задержка (min)
LoRaWAN	96,3 %	38,6 дней	2,3 дБ	342 мс
ZigBee	98,7 %	23,5 дней	3,1 дБ	87 мс
WiFi	94,1 %	5,9 дней	4,2 дБ	52 мс
BLE	91,8 %	20,8 дней	6,8 дБ	124 мс

Шаг 2. Нормализация (векторная): Для PDR: норма $= \sqrt{96,31 + 98,71 + 94,11 + 91,81} = \sqrt{37305,95} = 193,17$; $r_{\text{LoRa_PDR}} = 96,3 / 193,17 = 0,4985$; $r_{\text{ZigBee_PDR}} = 98,7 / 193,17 = 0,5109$; $r_{\text{WiFi_PDR}} = 94,1 / 193,17 = 0,4871$; $r_{\text{BLE_PDR}} = 91,8 / 193,17 = 0,4752$

Шаг 3. Взвешенная нормализация: $v_{\text{LoRa_PDR}} = 0,35 \times 0,4985 = 0,1745$

Шаг 4. Идеальное и антиидеальное решения:

Для критериев максимизации (PDR, Автономность): $A^+ = \{\max(v_{ij})\}$, $A^- = \{\min(v_{ij})\}$ Для критериев минимизации (σ_{RSSI} , Задержка): $A^+ = \{\min(v_{ij})\}$, $A^- = \{\max(v_{ij})\}$

Результаты расчетов (веса $w_{\text{PDR}=0,35}$, $w_{\text{energy}=0,30}$, $w_{\text{RSSI}=0,20}$, $w_{\text{latency}=0,15}$): $C_{\text{LoRaWAN}} = 0,681$; $C_{\text{ZigBee}} = 0,742$ (максимум \rightarrow ранг 1); $C_{\text{WiFi}} = 0,387$; $C_{\text{BLE}} = 0,523$

Многокритериальный анализ с применением метода TOPSIS показал: ZigBee обеспечивает наилучший баланс критериев с интегральным показателем $C_i = 0,742$. LoRaWAN занимает второе место (0,681), демонстрируя превосходство в энергоэффективности (38,6 дней автономности) при приемлемой надежности (96,3 % PDR). BLE получил оценку 0,523, уступая лидерам по надежности (91,8 % PDR) и стабильности сигнала ($\sigma = 6,8$ дБ). WiFi показал наименьший показатель 0,387 из-за критически высокого энергопотребления (автономность 5,9 дней), несмотря на минимальную задержку (52 мс).

Анализ чувствительности показал устойчивость ранжирования для ZigBee и LoRaWAN. При увеличении веса задержки $w_{\text{latency}} > 0,40$ WiFi перемещается на вторую позицию. При приоритизации энергоэффективности $w_{\text{energy}} > 0,50$ LoRaWAN становится абсолютным лидером ($C_{\text{LoRa}} > 0,812$). Сценарный анализ: для малых систем до 20 узлов в объеме до 30 м² ZigBee обеспечивает оптимальное решение; для распределенных систем с расстояниями более 50 м (крупные теплицы > 500 м²) предпочтительным становится LoRaWAN. Гибридные архитектуры, сочетающие ZigBee для локальных кластеров с LoRaWAN для межкластерной связи, представляют перспективное направление для масштабируемых систем мониторинга.

Создана сеть для 20 фитотронных камер с использованием ESP32 NodeMCU (WiFi-модули Xtensa LX6 240 МГц, 520 КБ SRAM) и датчиков DHT11 (точность $\pm 2^\circ\text{C}$ и $\pm 5\%$ RH) и YL-38/YL-69 (аналоговый емкостной датчик влажности почвы). Данные передаются на сервер через Wi-Fi сеть IEEE 802.11n (2,4 ГГц). Используется постоянное питание 5 В 2 А через ИБП. Планируется разработать GUI на базе web-интерфейса (Flask/Django). Текущий интерфейс — CLI с выводом JSON и сохранением в Excel (библиотека openpyxl: timestamp, nodeId, temperature, humidity, soil_{moisture}). Эксперименты с динамическим изменением климата выявили влияние скорости изменения T и RH на стабильность связи. При реализации суточного цикла с периодом 2 часа (синусоидальная модуляция: $T(t) = 26 + 6 \times \sin(2\pi \times t / 7200)$, $RH(t) = 72,5 + 12,5 \times \sin(2\pi \times t / 7200)$), моделирующего естественные флуктуации (фотопериод 16/8 ч), наблюдалось периодическое изменение RSSI с амплитудой до 4 дБ для технологий в диапазоне 2,4 ГГц (WiFi и BLE). Пик деградации RSSI совпадал с максимумом T и RH. LoRaWAN продемонстрировал минимальную зависимость RSSI с амплитудой флуктуаций 1,2 дБ, под-

Таблица 5.
Результаты многокритериального анализа методом TOPSIS и рекомендации по применению

Технология	Близость к идеалу	Ранг	Оптимальная область применения	Количество узлов	Периодичность опроса
ZigBee	0.742	1	Компактные камеры, mesh-топология	10–50	1–10 мин
LoRaWAN	0.681	2	Распределенные системы, автономность	5–500	5–60 мин
BLE	0.523	3	Локальный мониторинг, интеграция с mobile	5–20	1–5 мин
WiFi	0.387	4	Системы с внешним питанием, потоковые данные	5–30	<1 мин

Примечание: Близость к идеалу C_i рассчитана по методу TOPSIS (Формула 6) с весами критериев: надежность $w_{PDR} = 0,35$, энергоэффективность $w_{energy} = 0,30$, стабильность RSSI $w_{RSSI} = 0,20$, задержка $w_{latency} = 0,15$. Рекомендации основаны на комплексном анализе технических характеристик и результатов экспериментальных измерений. Периодичность опроса указывает диапазон интервалов передачи, при которых технология демонстрирует оптимальное соотношение производительности и автономности.

тверждая преимущества субгигагерцового диапазона (868 МГц). Корреляционный анализ временных рядов RSSI и температуры выявил задержку реакции уровня сигнала около 8–12 минут, что соответствует тепловой инерции металлических конструкций камеры ($\tau_{thermal} \approx 10$ мин). Спектральный анализ флуктуаций RSSI (БПФ с окном Хэннинга, $N = 1024$) показал доминирующие периодические компоненты на частотах $f_1 = 0,00111$ Гц и $f_2 = 0,000139$ Гц, соответствующих циклам работы систем вентиляции (15 мин) и нагрева (2 ч) камеры, что указывает на значимость электромагнитной совместимости при проектировании систем мониторинга.

Заключение

Проведенное экспериментальное исследование производительности четырех беспроводных технологий в условиях климатической камеры обеспечило количественную базу для обоснованного выбора оптимального решения при проектировании систем распределенного мониторинга в фитотронах и теплицах. Разработанный математический аппарат, включающий семь ключевых формул для расчета коэффициента доставки пакетов (PDR), бюджета линии связи, моделирования затухания сигнала в помещении, энергопотребления узла, времени автономной работы, пропускной способности канала и многокритериального анализа TOPSIS, обеспечивает комплексную количественную основу для оценки беспроводных технологий IoT.

ЛИТЕРАТУРЫ

- Bukhtoyarov V.V., Nekrasov I.S., Timofeenko I.A., Gorodov A.A., Kartushinskii S.A., Trofimov Y.V., Lishik S.I. Hybrid Digital Twin for Phytotron Microclimate Control: Integrating Physics-Based Modeling and IoT Sensor Networks // *AgriEngineering*. — 2025. — Vol. 7, No. 9. — P. 285. DOI: 10.3390/agriengineering7090285
- Ferentinos K.P., Katsoulas N., Tzounis A., Kittas C., Bartzanas T. Wireless sensor networks for greenhouse climate and plant condition assessment // *Biosystems Engineering*. — 2017. — Vol. 153. — P. 70–81. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.11.018
- Pawlowski A., Guzman J.L., Rodriguez F., Berenguel M., Sánchez J., Dormido S. Simulation of greenhouse climate monitoring and control with wireless sensor network and event-based control // *Sensors*. — 2009. — Vol. 9, No. 1. — P. 232–252. DOI: 10.3390/s90100232
- Ahonen T., Virrankoski R., Elmusrati M. Greenhouse monitoring with wireless sensor network // *IEEE/ASME International Conference on Mechatronics and Embedded Systems and Applications*. — 2008. — P. 403–408. DOI: 10.1109/MESA.2008.4735744
- Hosny K.M., El-Hady W.M., Samy F.M. Technologies, protocols, and applications of internet of things in greenhouse farming: A survey of recent advances // *Information Processing in Agriculture*. — 2025. — Vol. 12, No. 1. — P. 91–111. DOI: 10.1016/j.inpa.2024.04.002
- Kaya T., Altintas O., Yilmaz E., Ozturk M. Intelligent Environmental Control in Plant Factories: Integrating Sensors, Automation, and AI for Optimal Crop Production // *Food and Energy Security*. — 2025. — Vol. 14, No. 1. — e70026. DOI: 10.1002/fes3.70026
- Predictabledesigns. Comparison of Wireless Technologies: Bluetooth, WiFi, BLE, Zigbee, Z-Wave, 6LoWPAN, NFC, WiFi Direct, GSM, LTE, LoRa, NB-IoT, and LTE-M [Электронный ресурс]. — URL: https://predictabledesigns.com/wireless_technologies_bluetooth_wifi_zigbee_gsm_lte_lora_nb-iot_lte-m/ (дата обращения: 05.10.2025) Minew. LoRaWAN vs Zigbee: What is the Difference? [Электронный ресурс]. — 2024. — URL: <https://www.minew.com/lorawan-vs-zigbee/> (дата обращения: 05.10.2025)
- Park D.H., Kang B.J., Cho K.Y., Shin C.S., Cho S.E., Park J.W., Yang W.M. A study on greenhouse automatic control system based on wireless sensor network // *Wireless Personal Communications*. — 2011. — Vol. 56, No. 1. — P. 117–130. DOI: 10.1007/s11277-009-9881-2
- TEKTELIC. LoRaWAN vs Zigbee for Your IoT Project [Электронный ресурс]. — 2024. — URL: <https://tektelic.com/expertise/lorawan-vs-zigbee/> (дата обращения: 05.10.2025)

10. DusanIoT. Zigbee vs BLE vs Bluetooth Mesh, Choosing the Best or Combining for IoT Excellence [Электронный ресурс]. — 2025. — URL: <https://www.dusuniot.com/blog/zigbee-vs-bluetooth-le-and-mesh/> (дата обращения: 05.10.2025)
11. Ivlev V., Kneppo P., Bartak M. Application of an integrated multi-criteria decision making AHP-TOPSIS methodology for ETL software selection // SpringerPlus. — 2016. — Vol. 5, No. 1. — P. 263. DOI: 10.1186/s40064-016-1879-x
12. Chamara N., Bai Y., Seetharam K., Jagadish S.V.K., Gowda P.H. Ag-IoT for crop and environment monitoring: Past, present, and future // Agricultural Systems. — 2022. — Vol. 203. — 103497. DOI: 10.1016/j.agsy.2022.103497
13. Mansoor U., Shahid M.A., Ahmad T. Energy Efficiency analysis of LoRa and ZigBee protocols in Wireless Sensor Networks // Journal of Engineering Research. — 2021. — Vol. 9, No. 2. — P. 154–167. DOI: 10.36909/jer.v9i2.9156
14. Engmann F., Katsriku F.A., Abdulai J.D., Adu-Manu K.S., Banaseka F.K. Network Performance Metrics for Energy Efficient Scheduling in Wireless Sensor Networks // Wireless Communications and Mobile Computing. — 2021. — Vol. 2021. — P. 9635958. DOI: 10.1155/2021/9635958
15. Zhang F., Li D., Li G., Xu S. New horizons in smart plant sensors: key technologies, applications, and prospects // Frontiers in Plant Science. — 2024. — Vol. 15. — 1490801. DOI: 10.3389/fpls.2024.1490801
16. Rashid M.T., Bari B.S., Yusoff M.Z., Kamarudin L.M., Khan N. A comprehensive review on smart greenhouse farming: prospectus and challenges // Frontiers in Plant Science. — 2025. — Vol. 16. — 1587869. DOI: 10.3389/fpls.2025.1587869

© Шмелев Олег Сергеевич (shmelyo.oleg@yandex.ru); Бутаков Виталий Алексеевич (k-s-a_k-s-a@mail.ru);
 Трифонов Сергей Викторович (trifonov_sergei@inbox.ru)
 Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ИНЦИДЕНТЫ НАРУШЕНИЯ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ СКВОЗЬ ПРИЗМУ ЭТИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ С ИНФОРМАЦИЕЙ

POTENTIAL INCIDENTS OF CYBERSECURITY VIOLATIONS THROUGH THE LENS OF ETHICAL PRINCIPLES OF WORKING WITH INFORMATION

**O.Yakovleva
N. Verezubova
O. Kishkinova**

Summary. Along with the innovation of digital platforms and electronic resources where personal data, confidential information and financial resources of organizations and users are stored, the number of cyberattacks is increasing every month — cybercrimes are being improved by intruders through the use of digital technologies and artificial intelligence. Data protection rules apply not only to the regulation of technical procedures, but also require compliance with ethical standards, including the principles of privacy, responsibility, transparency in reporting on security measures, non-harm, legality and respect for the rights and freedoms of users. Teaching Russian students, the basics of cybersecurity is relevant due to the growth of information and personal data stored in data centers, electronic versions of documents, including in the Unified Identification and Authentication System (USIA), due to the fact that the promotion and observance of ethical standards in this area helps to prevent incidents of interference by intruders and trained by them. neural networks, minimize the risks of cyber-attacks. The problem of ethics in cybersecurity concerns both employees who provide a set of measures, technologies and practices aimed at data protection, as well as groups responding to violations, and users in the performance of their work and organization of personal digital space.

Keywords: cybersecurity, ethics, working with information, cyberattack, potential incidents, violations, data protection, digital systems.

Яковлева Ольга Анатольевна

Кандидат с/х наук, доцент, Московская
государственная академия ветеринарной медицины
и биотехнологии имени К.И. Скрябина
yakovleffo@yandex.ru

Верезубова Наталья Афанасьевна

Кандидат экономических наук, доцент, Московская
государственная академия ветеринарной медицины
и биотехнологии имени К.И. Скрябина
nverez@mail.ru

Кишкинова Ольга Алексеевна

Старший преподаватель, Московская государственная
академия ветеринарной медицины и биотехнологии
имени К.И. Скрябина
olga.19672015@yandex.ru

Аннотация. Наравне с инноватизацией цифровых платформ и электронных ресурсов, где хранятся личные данные, конфиденциальная информация и финансовые средства организаций и пользователей, ежемесячно возрастает число кибератак — киберпреступления совершенствуются злоумышленниками за счет использования цифровых технологий и искусственного интеллекта. Правила защиты данных распространяются не только на регламентацию технических процедур, но и требуют соблюдения этических норм, включая принципы приватности, ответственности, прозрачности в освещении предпринимаемых мер безопасности, непричинения вреда, законности и уважения прав и свобод пользователей. Обучение российских студентов основам кибербезопасности актуально в связи с ростом информации и личных данных, которые хранятся в дата-центрах, электронных вариантах документов, в том числе, в Единой системе идентификации и аутентификации (ЕСИА), ввиду того, что продвижение и соблюдение этических стандартов в обозначенной сфере помогает предотвращать инциденты вмешательства злоумышленников и обученных ими нейросетей, минимизировать риски кибератак. Проблема этики в кибербезопасности касается как сотрудников, обеспечивающих комплекс мер, технологий и практик, направленных на защиту данных, а также групп реагирования на нарушения, так и пользователей при выполнении их трудовой деятельности и организации личного цифрового пространства.

Ключевые слова: кибербезопасность, этика, работа с информацией, кибератака, потенциальные инциденты, нарушения, защита данных, цифровые системы.

Введение

Основной целью киберпреступника является атака на пользователя или сотрудника, поскольку это самый простой способ получить доступ к конфиденциальной информации частных лиц и компаний. Согласно исследованиям С.Г. Сепульведа и Ж.Е.В. Мазо (*Sepúlveda, Mazo 2025*), во многих случаях не человеческий фактор сам по себе, а плохо продуманные процессы делают человеческий фактор и нарушения безопасности неизбежными [9, р. 5].

В современной реальности сформирована строгая этика кибербезопасности — моральные принципы, требующие от специалистов не только корректного и своевременного введения и контроля данных, но и их неразглашения. Тем не менее, существует достаточно много прецедентов, когда сотрудники во время выполнения своих трудовых обязанностей или после собственного увольнения нарушают договор и конфиденциальность — распространяют личные данные пользователей, продают их третьим лицам либо сами используют их в мошеннических целях. Ежегодно действия недобросовестных лиц совершенствуются и видоизменяются, что требует систематического контроля и бдительности пользователей и законодательных органов в сфере защиты информации.

Все чаще кибератаки совершают не люди, а специально обученные хаккерами искусственные интеллекты (ИИ) и программы, а также ИИ-модели, создающие AI-усиленные атаки — как подчеркивает Д.Е. Намиот (2024), «кибератаки, основанные на ИИ, меняют ландшафт кибербезопасности» [4, с. 132].

Материалы и методы основаны на системном подходе и включают анализ, синтез и структуризацию материала, аналитику и обработку данных, междисциплинарный подход.

Результаты и обсуждение

Пользователи обладают разным уровнем цифровой грамотности, мотивации и способности действовать безопасно, что влияет на их уязвимость перед кибератаками [10, р. 9]. Так, согласно опросу 3500 россиян старше 18-ти лет, 10 % респондентов не соблюдают правила кибербезопасности и хранения данных на рабочем месте [2] (см. рисунок 1):

Согласно статистическим данным РБК (см. рисунок 1), 42 % россиян из 3500 опрошенных знают правила защиты данных, однако, периодически их игнорируют — данное поведение характерно для мужчин и женщин в одинаковой степени, в то время как «правильное хранение данных и соблюдение принципов кибербезопасности —

это вопрос стратегической важности для сотрудников, компаний и всей экономики, ... халатное отношение к такого рода вопросам негативно отражается на уровне защиты конфиденциальных данных и чреваты прямыми финансовыми и репутационными потерями» [2]. По мнению специалистов Сбербанка, многие игнорируют правила хранения и защиты данных, а также необходимость придерживаться этических норм вследствие того, что требования кибербезопасности (далее — КБ) влекут за собой разные ограничения для пользователей [1].

Отсутствие превентивных мер в области безопасности, недостаточное внимание к осведомленности пользователей и недостаток надежных решений при потенциальных кибератаках создают серьезные проблемы для этики в кибербезопасности [9, р. 7].

Т.Ф.А. Масаид (*Masaeid 2025*) акцентирует внимание на существовании целостной модели формирования безопасного поведения в сети и при защите данных, принимающей во внимание психологические, социальные и технологические аспекты киберугроз. Однако, как отмечают К. Мерсинос, М. Бада, С. Фернелл (*Mersinas, Bada, Furnell 2024*) в вопросах морали, связанных с поведенческими вмешательствами в сфере кибербезопасности, остаются неизученные области, требующие создания моделей, которые обеспечивали бы баланс между личной свободой и безопасностью [8].

Обнаружение инцидентов нарушения кибербезопасности, по мнению К. Мерсинос, М. Бада, С. Фернелл (*Mersinas, Bada, Furnell 2024*), в значительной степени зависит от мониторинга поведения пользователей и сетей в режиме реального времени, позволяющего выявлять отклонения от нормы, указывающие, чаще всего, непосредственно на горизонтальное перемещение (горизонтальное распространение) злоумышленников в сети (например, скомпрометированного устройства или аккаунта) после получения ими первоначального доступа к личным данным пользователя или инфраструктуре организации. Подозрительные сеансы входа в систему из неизвестных источников, повторяющиеся попытки доступа к несвязанным системам и нарушение последовательности действий в рабочем процессе являются индикаторами данных инцидентов [8]. Т.Ф.А. Масаид (*Masaeid 2025*) подчеркивает, что наиболее надежную защиту обеспечивает Модель безопасности с нулевым доверием (*ZTSM — Zero Trust Security Model*), предполагающая непрерывную аутентификацию и строгие ограничения доступа к данным [7, р. 251].

Огромное значение при выявлении кибернарушений имеет поведенческий анализ атак с использованием ИИ, т.к. ИИ может усиливать или ослаблять меры безопасности. Возможности нейросети не ограничиваются выявлением угроз, возникающих из-за вредоносных про-

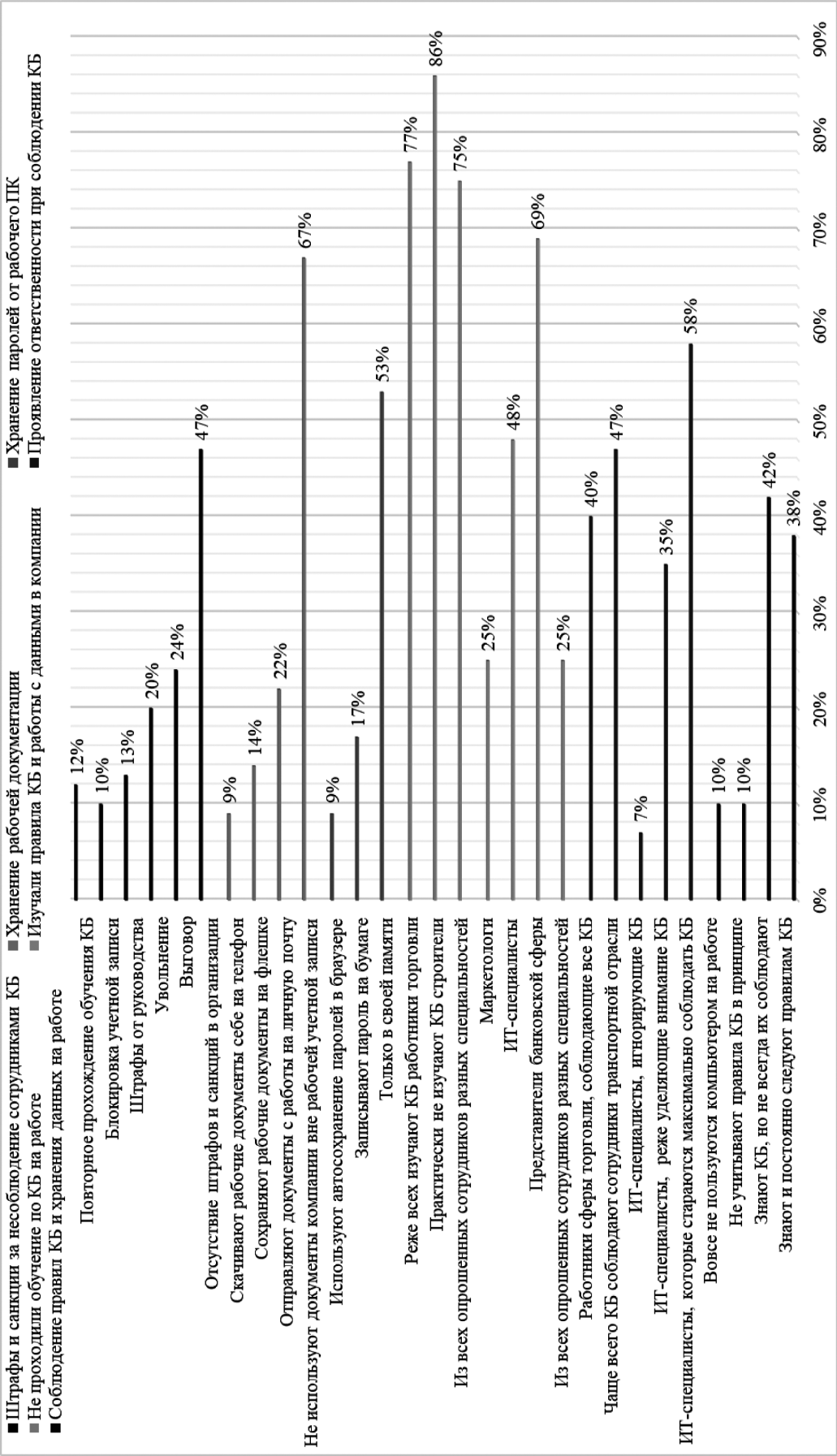


Рис. 1. Соблюдение правил кибербезопасности (КБ) на рабочем месте. Данные РБК (май, 2024 г.; рисунок наш)

грамм — ИИ способен проводить поведенческий анализ даже действий человека [7, р. 251], что является эффективным инструментом обнаружения нарушений этических принципов взаимодействия в интернет-пространстве. Для проведения сложных атак с использованием ИИ применяются передовые технологии машинного обучения, глубокого обучения и обработки естественного языка. Для защиты от атак с использованием ИИ, в свою очередь, используются анализ предсказуемости и обнаружение аномалий [7, р. 251].

По мнению М. Тхакара (*Thakar 2025*), человеческая ошибка часто является следствием несовершенства процесса, а не халатности отдельного сотрудника. Сосредоточившись на системных факторах и формируя культуру доверия, обучения и подотчетности, можно снизить вероятность повторения ошибок и повысить общий уровень безопасности. Этические соображения являются неотъемлемой частью разработки и внедрения методов поведенческого моделирования в системах безопасности, в т.ч., которые работают на основе ИИ.

В рамках этики ИИ особое внимание важно уделять таким принципам, как прозрачность, ответственность, конфиденциальность и доверие, которые необходимы пользователям для поддержания уверенности в их собственной безопасности, а также важно обеспечение ответственного использования поведенческих данных. Реализация этих принципов помогает решить проблемы, связанные с конфиденциальностью данных [10, р. 15],

а соблюдение принципов, представленных на рисунке 2, обеспечивает мягкие превентивные меры, которые важно применять в сфере кибербезопасности:

Нарушение вышеперечисленных принципов влечет за собой уязвимость кибербезопасности в контексте этических норм, о чем важно знать обучающимся, в последующем, сотрудникам всех специальностей. Более того, необходимо проявлять заботу о собственном психоэмоциональном здоровье и здоровье других пользователей; повышать свои технологические, научные, информационные и цифровые компетенции [5, с. 64]; своевременно и адекватно реагировать на инциденты нарушения кибербезопасности; «признавать и уважать границы юрисдикции, законные права, правила и полномочия сторон, участвующих в мероприятиях, связанных с реагированием на инциденты» [3]; руководствоваться только достоверной информацией из авторитетных источников.

Хорошей практикой может быть использование средств аутентификации или постоянный мониторинг сети, но при этом нельзя упускать из виду человеческий фактор, поскольку поведение людей может приводить к формированию привычек, создающих серьезные уязвимости для кибербезопасности [9, р. 7]. Кроме того, А.А.А. Зани, А.А. Норман, Н.А. Гани и Р.С. Сианьтури (*Zani, Norman, Ghani, Sianturi 2025*) описывают этические способности как информацию, мотивацию и возможности для межличностного общения в интернете, которые



Рис. 2. Этические принципы кибербезопасности (КБ) пользователей, нарушение которых ведет к потенциальным инцидентам (рисунок наш)

соответствуют закону и социальным нормам. Соответственно, пользователи должны уметь распознавать приемлемые, правильные, желательные и законные аспекты своих действий, прежде чем они осознают их последствия [11, р. 2]. Помимо этого, принимать во внимание, что злоумышленники часто имитируют поведение обычных пользователей, чтобы их не обнаружили, что снижает уровень бдительности пострадавшей стороны [9, р. 283].

Необходимо выделять достаточные ресурсы для постоянного поддержания и обновления инфраструктуры кибербезопасности, чтобы успешно противостоять возникающим угрозам. Важно отметить, что, уделяя приоритетное внимание кибербезопасности, учебные заведения не только защищают целостность своих данных, но и укрепляют доверие среди обучающихся и заинтересованных сторон [8; 6].

Выводы: чтобы успешно противостоять возникающим угрозам кибербезопасности, важно формировать привычки соблюдения этических принципов защиты данных, хранения информации и поведения в сети еще до трудоустройства — во время обучения в общеобразовательных учреждениях. Нарушение этики при работе с информацией чревато различными инцидентами и угрозами.

Среди наиболее важных этических принципов кибербезопасности пользователей необходимо выделить принципы доверия, конфиденциальности, уважительного отношения к другим пользователям и их интеллектуальной собственности, мнению, концептам и идеям, скоординированности действий по противостоянию кибератакам, а также систематического повышения цифровой и информационной компетентностей посредством достоверных источников и авторитетных ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Защитник или надзиратель? Проблема этики в кибербезопасности // Официальный сайт Сбербанка. URL: <https://www.sberbank.ru/ru/person/kibrary/articles/zashchitnik-ili-nadziratel-problema-ehiki-v-kiberbezopasnostii> (дата обращения: 14.11.2025).
2. Исследование: 10% россиян не соблюдают правила кибербезопасности в работе // РБК. Статья от 30.05.2024. URL: <https://companies.rbc.ru/news/Dm0DGt8xl8/issledovanie-10-rossiyan-ne-soblyudayut-pravila-kiberbezopasnosti-v-rabote/> (дата обращения: 13.11.2025).
3. Кодекс этики // Форуме групп реагирования на инциденты и обеспечения безопасности = EthicsfIRST. Ethics for Incident Response and Security Teams. URL: <https://www.first.org/global/signs/ethics/ethics-first> (date: 14.11.2025).
4. Намиот Д.Е. О кибератаках с помощью систем Искусственного интеллекта // International Journal of Open Information Technologies. 2024. №9. С. 132–141.
5. Юсуфзода И.М. Борьба с киберугрозами: важность кибербезопасности в современном мире // Форум молодых ученых. 2024. №4 (92). С. 63–64.
6. Chasokela D., Ncube Ch. (2024) Leveraging Technology for Organizational Efficiency and Effectiveness in Higher Education // In book: Leveraging Technology for Organizational Efficiency and Effectiveness in Higher Education (pp.381–410). Publisher: IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-6967-8.ch014>.
7. Masaeid T.F.A. (2025) AI-Driven Cyber Threats: Behavioral Analysis and Strategic Defenses // In book: Strategic AI Integration in Business Intelligence (pp. 251–284). <https://doi.org/10.4018/979-8-3373-6801-6.ch011>.
8. Mersinas K., Bada M., Furnell S. (2024) Cybersecurity Behavior Change: A conceptualization of Ethical Principles for Behavioral Interventions // Computers & Security 148(02):104025. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.104025>.
9. Sepúlveda S.G., Mazo J.E.V. (2025) Ciberseguridad aplicada a la gestión de datos en empresas de bienes y servicios: una revisión de literature // Cuaderno activa 16(1). 10 p. <https://doi.org/10.53995/20278101.1804>.
10. Thakar M. (2025) Enhancing Human Resilience to Social Engineering Attacks through Integrated AI Detection and Context-Aware Behavioral Interventions. 76 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25474.75200>.
11. Zani A.A.A., Norman A.A., Ghani N.A., Sianturi R.S. (2025) Navigating Social Media: How Offline Ethics, Online Etiquette, and Protection Behavior Shape Self-Disclosure // IEEE Access PP. (99):1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3555548>.

© Яковлева Ольга Анатольевна (yakovleffo@yandex.ru); Вереzubова Наталья Афанасьевна (nverez@mail.ru);

Кишкинова Ольга Алексеевна (olga.19672015@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

УЛЬТРАСТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МИТОХОНДРИЙ СИНЦИТИОТРОФОБЛАСТА ПРИ ГЕСТАЦИОННОМ САХАРНОМ ДИАБЕТЕ¹

ULTRASTRUCTURAL FEATURES OF SYNCYTIOTROPHOBLAST MITOCHONDRIA IN GESTATIONAL DIABETES MELLITUS

S. Belomestnov
S. Pichugova
T. Chumarnaya
O. Sevostyanova
D. Shchepkin
A. Ksenofontov

Summary. The aim of this study was to investigate the inner membrane of syncytiotrophoblast mitochondria in normal pregnancy and in gestational diabetes mellitus. A total of 125 women who delivered at term were examined. The main group (103 women with gestational diabetes mellitus) was divided into two subgroups. The first subgroup included 78 women who delivered babies weighing less than 4000 grams. The second subgroup included 25 women whose newborns weighed 4000 grams or more. The control group included 22 women whose pregnancies were normal and whose newborns weighed between the 10th and 90th percentiles for gestational age. Electron microscopy of the placenta was performed, the structure of the inner membrane of syncytiotrophoblast mitochondria was assessed. Results. In the control group, a typical continuous outer membrane and an inner membrane forming cristae with minimal changes were more common. In the main group, in the second subgroup (GDM and fetal macrosomia), pronounced swelling of mitochondria, complete destruction of cristae with maximum clearing of the matrix, changes in the number of organelles, and their fusion were revealed. The proportion of placentas with signs of complete destruction of the cristae of syncytiotrophoblast mitochondria (%) in the control group was 18, in the second subgroup of the main group — 72 ($p = 0.001$). **Conclusion.** Impaired carbohydrate metabolism during pregnancy, occurring in the form of gestational diabetes mellitus, is associated with the destruction of mitochondria of syncytiotrophoblast cells. This must be taken into account when determining obstetric management, especially if a large fetus is detected.

Keywords: mitochondria, gestational diabetes mellitus, fetal macrosomia, electron microscopy, syncytiotrophoblast.

Беломестнов Сергей Разумович

канд. мед. наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Екатеринбург; врач-акушер-гинеколог, Государственное бюджетное учреждение здравоохранения Свердловской области «Екатеринбургский клинический перинатальный центр»
beldoctor@mail.ru

Пичугова Светлана Владимировна

доктор мед. наук, врач лаборатории цитологии и электронной микроскопии Государственного автономного учреждения здравоохранения Свердловской области «Клинико-диагностический центр им. Я.Б. Бейкина»
ekb-let@mail.ru

Чумарная Татьяна Владиславовна

Канд. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории математической физиологии им. В.С. Мархасина Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт иммунологии и физиологии» Уральского отделения Российской академии наук
chumarnaya@gmail.com

Севостьянова Ольга Юрьевна

доктор мед. наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Екатеринбург
olsyava@gmail.com

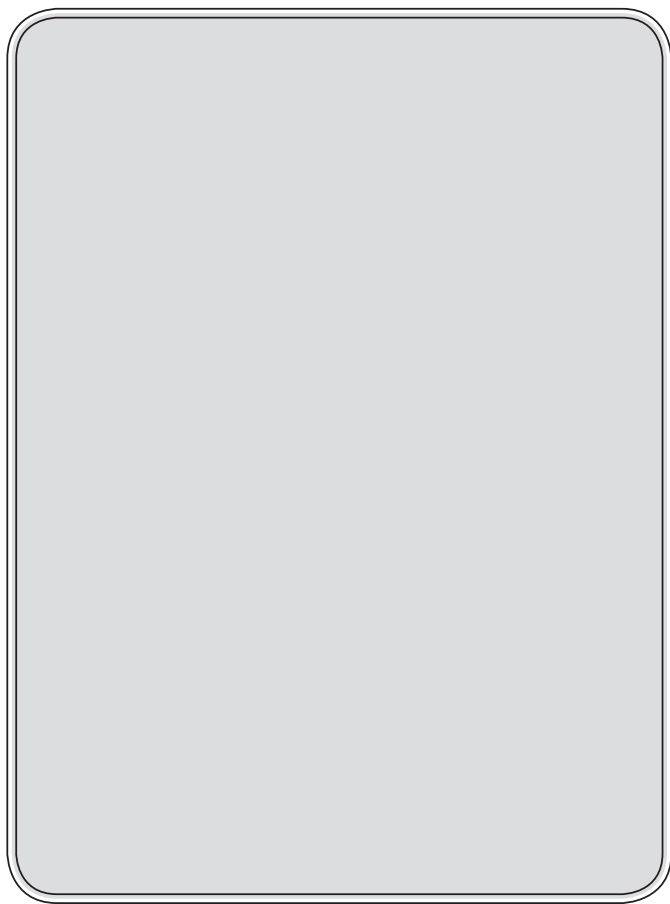
Щепкин Даниил Владимирович

Канд. биол. наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией трансляционной медицины и биоинформатики Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт иммунологии и физиологии» Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург
d.shchepkin@iip.uran.ru

Ксенофонтов Алексей Михайлович

врач-акушер-гинеколог Государственное бюджетное учреждение здравоохранения Свердловской области «Екатеринбургский клинический перинатальный центр»
mail@ekpc-info.ru

¹ Работа выполнена при поддержке гос. темы ИИФ УрО РАН № 122022200089-4



Введение

Гестационный сахарный диабет (ГСД), характеризуется высокой частотой перинатальных потерь, возрастающей при формировании фетальной макросомии (ФМ) [1–3]. Звеном патогенеза заболеваний плаценты и плода, ассоциированных с материнской гипергликемией, является митохондриальная дисфункция, усугубляющая инсулинорезистентность. Снижение активности митохондрий (М) трофобласта способствует ускорению апоптоза, нарушению плацентарной функции [4–8]. Полноценность этих органелл обеспечивается способностью внутренней мембраны образовывать достаточное количество крист, разрушение которых рассматривается как признак деградации. Электронная микроскопия позволяет точно описать ультраструктуру трофобластических клеток [9–12].

Синцитиотрофобласт (СТ) обеспечивает транспортировку питательных веществ, гормональную секрецию [8, с. 15]. Пластичность его митохондрий смягчает неблагоприятные воздействия на фетоплацентарный комплекс [13, с. 12]. По этой причине особенности митохондрий СТ при акушерской патологии представляет научный интерес [14, 15].

Аннотация. Целью исследования является изучение внутренней мембраны митохондрий синцитиотрофобласта при нормальной беременности и при гестационном сахарном диабете. В процессе исследования были обследованы 125 женщин, родивших в сроке своевременных родов. Основная группа (103 женщины с гестационным сахарным диабетом), разделена на две подгруппы. Первая подгруппа – 78 женщин, родивших детей с весом менее 4000 граммов. Вторая подгруппа – 25 женщин, у которых масса новорождённых была 4000 граммов и более. В контрольную группу включены 22 женщины, беременность у которых протекала без нарушений углеводного обмена, и масса тела новорождённого находилась в диапазоне 10–90 перцентилей относительно гестационного возраста. Проведена электронная микроскопия плаценты, оценивалось строение внутренней мембраны митохондрий синцитиотрофобласта. Результаты. В контрольной группе чаще встречалась типичная непрерывная внешняя мембрана и внутренняя мембрана, формирующая кристы, с минимальными изменениями. В основной группе, во второй подгруппе (ГСД и макросомия плода) выявлены выраженное набухание митохондрий, полная деструкция крист с максимальным просветлением матрикса, изменение количества органелл, их слияние. Доля плацент с признаками полной деструкции крист митохондрий синцитиотрофобласта (%) в контрольной группе – 18, во второй подгруппе основной группы – 72 ($p=0,001$). **Заключение.** Нарушение углеводного обмена при беременности, протекающее в форме гестационного сахарного диабета, ассоциируется с разрушением митохондрий клеток синцитиотрофобласта. Это необходимо учитывать при определении акушерской тактики особенно в случае обнаружения крупных размеров плода.

Ключевые слова: митохондрии, гестационный сахарный диабет, фетальная макросомия, электронная микроскопия, синцитиотрофобласт.

Целью исследования явилось изучение внутренней мембраны митохондрий синцитиотрофобласта при нормальной беременности и при гестационном сахарном диабете.

Материалы и методы

Популяция

Проведено поперечное исследование. Обследованы 125 женщин, которые были родоразрешены в сроке своевременных родов (в 37+0 — 41+6 недель) [16, с. 22]. Когорта сформирована методом сплошной выборки из числа беременных, обратившихся в акушерский стационар третьей группы. Основную группу составили 103 женщины с гестационным сахарным диабетом, которые разделены на две подгруппы в зависимости от наличия ФМ. В первую подгруппу вошли 78 женщин, родившие детей с весом менее 4000 граммов. Вторая подгруппа — это 25 женщин, у которых масса новорождённых соответствовала 4000 граммов и более.

В контрольную группу включены 22 женщины, беременность у которых протекала без нарушений углеводного обмена, признаков отклонений в антенатальном

росте плода, а масса тела новорождённого находилась в диапазоне 10–90 перцентиля относительно гестационного возраста для современной популяции [17, с. 38].

Диагностика гестационного сахарного диабета проводилась в два этапа. Первый этап — это определение уровня гликемии натощак при первом обращении в женскую консультацию. Второй — учет результатов перорального глюкозотолерантного теста (ПГТТ) в 24–28 недель. Диагноз ГСД считался установленным при значениях глюкозы в плазме венозной крови натощак в пределах $\geq 5,1$ ммоль/л, но $<7,0$ ммоль/л или по результатам ПГТТ при уровне гликемии $\geq 10,0$ ммоль/л через 1 час и $\geq 8,5$, но $<11,1$ ммоль/л через 2 часа [18, с. 19]. Критерием крупного плода явилась масса тела при рождении 4000 граммов и более [19, с. 45].

Критериями включения послужили информированное согласие беременной на участие в исследовании и наличие гестационного сахарного диабета на диетотерапии. Применены критерии исключения: юный возраст — 18 лет и младше, возраст 40 лет и более, эндокринные заболевания, в том числе сахарный диабет I или II типа, гестационный сахарный диабет с потребностью в инсулине, другие осложнения беременности и плацентарные нарушения: преэклампсия, отслойка нормально расположенной плаценты, задержка роста плода, врожденные пороки развития плода.

Электронная микроскопия

В каждом случае проводилась электронная микроскопия плаценты с оценкой морфологии митохондрий СТ. Преаналитический этап: 1. фиксация фрагментов терминальных ворсин в 2,5 % растворе глютаральдегида; 2. фиксация в 1 % раствор окиси осмия (OsO_4); 3. дегидратация материала в этиловом спирте в возрастающей концентрации и ацетоне; 4. полимеризация материала в аралдитовой смоле при температуре 60 °C; 5. получение ультратонких срезов на ультратоме Leica EM UC6 (Leica Microsystems GmbH, Австрия); 6. контрастирование материала цитратом свинца ($\text{Pb}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2$). Микроскопическое исследование проводилось на электронном микроскопе Morgagni 268 (FEI Company, Чехия-Нидерланды) при ускоряющем напряжении 70 киловольт. Обзорный просмотр выполнен с использованием увеличений 1800–3500 крат, детализация структур — 18000–22000 крат. Оценивалось строение митохондрий — сохранение типичной структуры или полная деструкция крист.

Этическая экспертиза

Исследование одобрено локальным этическим комитетом Государственного бюджетного учреждения здравоохранения Свердловской области «Екатеринбургский клинический перинатальный центр» №10 от 25.01.2024

года. Все пациенты дали своё информированное согласие на обработку своих персональных данных.

Статистический анализ

Статистическую обработку полученных данных проводили с помощью программного пакета SPSS v.27.0.0 (IBM, США). Для количественных признаков проверялась гипотеза о нормальном распределении с помощью критерия Шапиро-Уилка. Большинство характеристик не подчинялись закону нормального распределения, поэтому для описания и анализа результатов исследования использовались непараметрические статистические методы. Для описания центральных тенденций использовалась медиана (Me — 2-й квартиль (Q2)) и межквартильный интервал (1-й (Q1); 3-й (Q3) квартили). Для сравнения двух независимых групп по количественным показателям применяли U-критерий Манна-Уитни. Для коррекции на множественные сравнения использовали поправку Бонферрони (скорректированное p = исходное p^* количество сравнений). Качественные данные представлены в виде абсолютных значений (n) и относительных долей (%). Для сравнения групп использовали критерий χ^2 (хи-квадрат) Пирсона (при ожидаемых частотах ≥ 5) или точный критерий Фишера (при ожидаемых частотах < 5). Для коррекции на множественные сравнения применяли поправку Бонферрони. Статистически значимыми считали различия при скорректированном $p < 0,05$.

Литературный обзор

При написании данной работы была использована зарубежная литература таких авторов как Sweeting A. [1, с. 12], Salihu H.M. [2, с. 45], Tanner D. [3, с. 32]. При написании были изучены их методы и материалы исследования.

Результаты

Основные клинические параметры сравниваемых групп представлены в таблице (Таблица 1).

Результаты электронной микроскопии выявили различия между сравниваемыми группами. В контрольной группе чаще встречалась типичная морфологическая картина М — непрерывная внешняя мембрана и внутренняя мембрана, формирующая кристы, с минимальными патологическими изменениями в виде очагового набухания, незначительной деструкции крист (рис. 1).

В образцах синцитиотрофобласта второй подгруппы (ГСД и макросомия плода) чаще выявлены выраженное набухание митохондрий и полная деструкция крист с максимальным просветлением митохондриального матрикса (рис. 2 а,б). В некоторых случаях отмечалось уменьшение количества митохондрий (рис. 2а) вплоть

Таблица 1.

Срок родоразрешения, пол и масса новорожденного

Показатель	Контрольная группа (n=22)	Основная группа			p
		Без разделения на подгруппы (n=103)	Первая подгруппа (n=78)	Вторая подгруппа (n=25)	
		1	2	3	
Срок беременности при родоразрешении, недели/дни	38/6 (38/1; 40/0)	38/5 (38/0; 39/3)			$p_{1-2}=0,8$
Соотношение мужского и женского пола новорождённого, абс./абс. (%/%)	13/9 (59 %/41 %)	62/41 (60 %/40 %)	40/38 (51 %/49 %)	22/3 (88 %/12 %)	$p_{1-2}=1,0$ $p_{1-3}=1,0$ $p_{1-4}=0,1$
Масса новорождённого, г	3125 (2910; 3338)	3550 (3100; 3950)	3335 (2980; 3633)	4220 (4085; 4490)	$p_{1-2}=0,001$ $p_{1-3}=0,06$ $p_{1-4}<0,001$

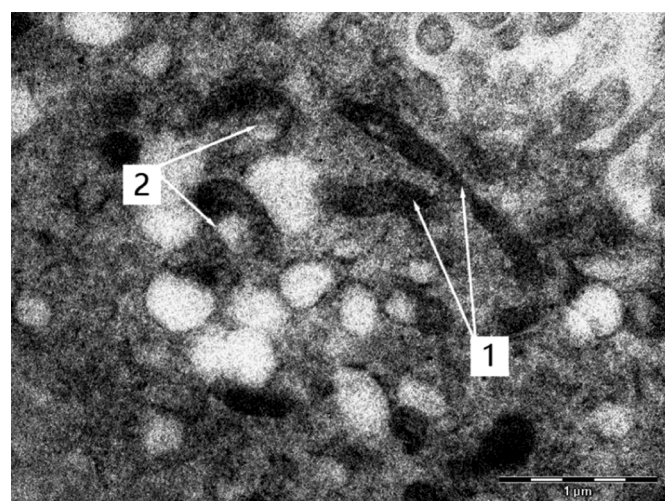


Рис. 1. Фрагмент синцитиотрофобласта. Митохондрии, типичная структура (1), очаговое набухание митохондрий, незначительная деструкция крист, просветление митохондриального матрикса (2). $\times 18000$, контрастирование цитратом свинца

до единичных органелл в поле зрения. В других образцах, напротив, количество митохондрий было значительно выше, выявлена тенденция к слиянию митохондрий (рис. 26).

Проведено сравнение групп по признакам полной деструкции крист митохондрий. Результаты представлены в таблице (Таблица 2).

Обсуждение

Заболеваемость ГСД не имеет тенденции к снижению [20]. Различия между сравниваемыми группами в нашем исследовании указывают на усиленную деструкцию внутренней мембраны митохондрий при ГСД, особенно при формировании фетальной макросомии.

Материнская гипергликемия существенно увеличивает трофическую функцию плаценты, способствуя избыточному росту плода [21, с. 18], [22, с. 35]. При этом М являются весомым фактором функциональной пластичности плаценты, определяющим ее резервные возможности. Выявленная в ряде случаев тенденция к слиянию этих органелл отражает процесс митохондриальной динамики, необходимый для поддержания клеточного гомеостаза [23–25]. Конечная способность митохондрий сохранять структуру, поддерживать энергетические реакции и ускоренный апоптоз клеток СТ при материнской метаболической дезадаптации может являться патогенетическим фактором дистресса плода [25–27].

Заключение

Нарушение углеводного обмена при беременности, протекающее в форме гестационного сахарного диабета, ассоциируется с разрушением митохондрий клеток синцитиотрофобласта. Это необходимо учитывать при определении акушерской тактики особенно в случае обнаружения крупных размеров плода.

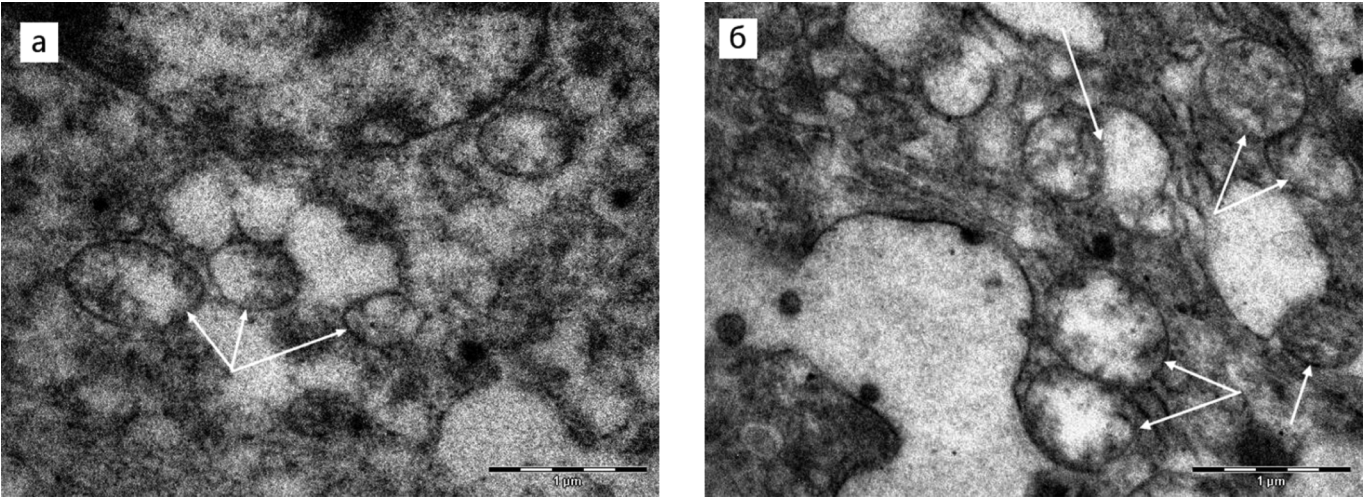


Рис. 2. Фрагмент синцитиотрофобласта. Набухание митохондрий (обозначены стрелками), полная деструкция крист, просветление митохондриального матрикса. х 22000, контрастирование цитратом свинца

Таблица 2.

Доля плацент с признаками полной деструкции крист митохондрий синцитиотрофобласта, %

Показатель	Контрольная группа (n=22)	Основная группа			p
		Без разделения на подгруппы (n=103)	Первая подгруппа (n=78)	Вторая подгруппа (n=25)	
		1	2	3	
Доля плацент с полной деструкцией крист митохондрий, %	18,2	49,5	42,3	72,0	p ₁₋₂ = 0,03 p ₁₋₃ = 0,1 p ₁₋₄ = 0,001

ЛИТЕРАТУРА

1. Sweeting A, Wong J, Murphy HR, Ross GP. A clinical update on gestational diabetes mellitus. *Endocr Rev.* 2022;43(5):763–93. <https://doi.org/10.1210/edrev/bnac003>

2. Salihu HM, Dongarwar D, King LM, Yusuf KK, Ibrahimi S, Salinas-Miranda AA. Phenotypes of fetal macrosomia and risk of stillbirth among term deliveries over the previous four decades. *Birth.* 2020;47(2):202–10. <https://doi.org/10.1111/birt.12479>

3. Tanner D, Lavista Ferres JM, Mitchell EA. Improved estimation of the relationship between fetal growth and late stillbirth in the United States, 2014–15. *Sci Rep.* 2024;14(1): 60–02. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56572-7>

4. Torres-Torres J, Monroy-Mucoz IE, Perez-Duran J, Camacho-Martinez ZA, Deyanira Baca, Espino-Y-Sosa S et al. Cellular and molecular pathophysiology of gestational diabetes. *Int J Mol Sci.* 2024;25(21):116–41. <https://doi.org/10.3390/ijms252111641>

5. Sanchez-Aranguren L, Nadeem S. Bioenergetics adaptations and redox homeostasis in pregnancy and related disorders. *Mol Cell Biochem.* 2021; 476(11):4003-18. <https://doi.org/10.1007/s11010-021-04215-0>

6. Parsons AM, Rajendran RR, Whitcomb LA, Bouma GJ, Chicco AJ. Characterization of trophoblast mitochondrial function and responses to testosterone treatment in ACH-3P cells. *Placenta.* 2023;13(137):70–7. <https://doi.org/10.1016/j.placenta.2023.04.011>

7. Fisher JJ, McKeating DR, Cuffe JS, Bianco-Miotto T, Holland OJ, Perkins AV. Proteomic analysis of placental mitochondria following trophoblast differentiation. *Front Physiol.* 2019; 20(10) :15–36. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01536>

8. Hernández MH, Dos Santos E, Rodriguez Y, Priou C, Berveiller P, Vialard F et al. Influence of maternal obesity on human trophoblast differentiation: the role of mitochondrial status. *Reprod Biol.* 2022;22(2):1006–50. <https://doi.org/10.1016/j.repbio.2022.100650>

9. Preminger N, Schuldiner M. Beyond fission and fusion-Diving into the mysteries of mitochondrial shape. *PLoS Biol.* 2024;22(7):300–71. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3002671>

10. Friedman JR. Mitochondria from the outside in: the relationship between inter-organelle crosstalk and mitochondrial internal organization. *Contact (Thousand Oaks).* 2022;5:25152564221133267. <https://doi.org/10.1177/25152564221133267>

11. Huang C, Deng K, Wu M. Mitochondrial cristae in health and disease. *Int J Biol Macromol.* 2023;235:123-755. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123755>

12. Liu C, Ding Z, Zhang Z, Zhao L, Zhang C, Huang F. Morphological changes of mitochondria-related to apoptosis during postmortem aging of beef muscles. *Food Chem X*. 2023;19:100–806. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100806>
13. Lu M, Sferruzzi-Perri AN. Placental mitochondrial function in response to gestational exposures. *Placenta*. 2021;104:124–137. <https://doi.org/10.1016/j.placenta.2020.11.012>
14. Hebert JF, Myatt L. Metformin impacts human syncytiotrophoblast mitochondrial function from pregnancies complicated by obesity and gestational diabetes mellitus in a sexually dimorphic manner. *Antioxidants (Basel)*. 2023;12(3):7–19. <https://doi.org/10.3390/antiox12030719>
15. Valent AM, Choi H, Kolahi KS, Thornburg KL. Hyperglycemia and gestational diabetes suppress placental glycolysis and mitochondrial function and alter lipid processing. *Faseb J*. 2021;35(3):214–23. <https://doi.org/10.1096/fj.202000326RR>
16. Акушерство: учебник. Москва, РФ: ГЭОТАР-Медиа; 2021.1056. *Akusherstvo : uchebnik*. [Obstetrics: textbook]. Moskva, RF: GEOTAR-Media; 2021.1056.
17. Беломестнов С.Р., Чумарная Т.В., Севостьянова О.Ю., Ксенофонов А.М., Анкудинов Н.О., Исакова Т.М. Масса тела новорождённого в современной популяции Свердловской области (результаты пилотного исследования). *Фундаментальная и клиническая медицина*. 2024;9(1):25–32. <https://doi.org/10.23946/2500-0764-2024-179-1-25-32>
18. Belomestnov SR, Chumarnaya TV, Sevost'yanova OYu, Ksenofontov AM, Ankudinov NO, Isakova TM. Massa tela novorozhdenno v sovremennoj populyacii Sverdlovskoj oblasti (rezul'taty pilotnogo issledovaniya) [The body weight of a newborn in the modern population of the Sverdlovsk region (results of a pilot study)] *Fundamental'naya i klinicheskaya medicina*. 2024;9(1):25–32. <https://doi.org/10.23946/2500-0764-2024-179-1-25-32>
19. Абрамова МЕ, Ходжаева ЗС, Горина КА, Муминова КА, Горюнов КВ, Рагозин АК, и др. Гестационный сахарный диабет: скрининг и диагностические критерии в ранние сроки беременности. *Акушерство и гинекология*. 2021;5:25–32. <https://doi.org/10.18565/aig.2021.5.25-323>
20. Abramova ME, Hodzhaeva ZS, Gorina KA, Muminova KA, Goryunov KV, Ragozin AK, i dr. Gestacionnyj saharnyj diabet: skрининг i diagnosticheskie kriterii v rannie sroki beremennosti [Gestational diabetes mellitus: screening and diagnostic criteria in early pregnancy]. *Akusherstvo i ginekologiya*. 2021;5:25–32. <https://doi.org/10.18565/aig.2021.5.25-323>
21. Macrosomia: ACOG Practice Bulletin. *Obstet Gynecol*. 2020 135(1):18–35. <https://doi.org/10.1097/AOG.0000000000003606>
22. Соколовская ТА, Ступак ВС. Заболеваемость беременных женщин в Российской Федерации: тенденции и прогнозы. *Российский вестник акушера-гинеколога*. 2022;22(5):7–14. <https://doi.org/10.17116/rosakush202220517>
23. Sokolovskaya TA, Stupak VS. Zabelevaemost' beremennykh zhenshchin v Rossiyskoy Federatsii: tendentsii i prognozy [Morbidity of pregnant women in the Russian Federation: Trends and prognosis]. *Rossiyskiy vestnik akushera-ginekologa*. 2022;22(5):7–14. <https://doi.org/10.17116/rosakush202220517>
24. Siemers KM, Joss-Moore LA, Baack ML. Gestational diabetes-like fuels impair mitochondrial function and long-chain fatty acid uptake in human trophoblasts. *Int J Mol Sci*. 2024;25(21):115–34. <https://doi.org/10.3390/ijms252111534>
25. Bedell S, Hutson J, de Vrijer B, Eastabrook G. Effects of maternal obesity and gestational diabetes mellitus on the placenta: current knowledge and targets for therapeutic interventions. *Curr Vasc Pharmacol*. 2021;19(2):176–192. <https://doi.org/10.2174/1570161118666200616144512>
26. Toledano JM, Puche-Juarez M, Galvez-Navas JM, Moreno-Fernandez J, Diaz-Castro J, Ochoa JJ. Pregnancy disorders: a potential role for mitochondrial altered homeostasis. *Antioxidants (Basel)*. 2024;13(8):97–9. <https://doi.org/10.3390/antiox13080979>
27. Abbade J, Klemetti MM, Farrell A, Ermini L, Gillmore T, Sallais J, et al. Increased placental mitochondrial fusion in gestational diabetes mellitus: an adaptive mechanism to optimize feto-placental metabolic homeostasis? *BMJ Open Diabetes Res Care*. 2020;8(1):100–923. <https://doi.org/10.1136/bmjdr-2019-000923>
28. Sferruzzi-Perri AN, Lopez-Tello J, Salazar-Petres E. Placental adaptations supporting fetal growth during normal and adverse gestational environments. *Exp Physiol*. 2023;108(3):371–397. <https://doi.org/10.1113/EP090442>
29. Sferruzzi-Perri AN. Placental mitochondria central to gestational diabetes pathogenesis? *J Physiol*. 2021;599(4):1019–1020. <https://doi.org/10.1113/JP281041>
30. Mandr C, Castiglioni S, Novelli C, Anelli GM, Serati A, Parisi F, et al. Placental bioenergetics and antioxidant homeostasis in maternal obesity and gestational diabetes. *Antioxidants (Basel)*. 2024;13(7):85–8. <https://doi.org/10.3390/antiox13070858>

© Беломестнов Сергей Разумович (beldoctor@mail.ru); Пичугова Светлана Владимировна (ekb-lem@mail.ru);
 Чумарная Татьяна Владиславовна (chumarnaya@gmail.com); Севостьянова Ольга Юрьевна (olsyava@gmail.com);
 Щепкин Даниил Владимирович (d.shchepkin@iip.uran.ru); Ксенофонов Алексей Михайлович (mail@ekpc-info.ru)
 Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВЛИЯНИЕ ГЕННО-ИНЖЕНЕРНОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ НА ТЕЧЕНИЕ ТЯЖЕЛОЙ БРОНХИАЛЬНОЙ АСТМЫ НА ПРИМЕРЕ КЛИНИЧЕСКОГО СЛУЧАЯ

INFLUENCE OF GENETIC ENGINEERED BIOLOGICAL THERAPY ON THE COURSE OF SEVERE BRONCHIAL ASTHMA ON THE EXAMPLE OF A CLINICAL CASE

**E. Borisova
M. Gorshenina**

Summary. This clinical case demonstrates the effect of genetically engineered biological therapy on the course of severe bronchial asthma. Before initiation of genetically engineered biological therapy, the patient had an uncontrolled course of the disease according to the ACQ-5 questionnaire of 3.4 points, the need for high doses of inhaled glucocorticosteroids in combination with long-acting bronchodilators. After treatment with tezepelumab, after 3 months, an improvement in well-being was noted in the form of decreased dyspnea, no suffocation, a decrease in the frequency of exacerbations, according to the ACQ-5 questionnaire — 1.4 points, which means partial control of bronchial asthma. In basic therapy, the dosage of inhaled glucocorticosteroids was reduced to average values. Based on the example of this clinical case, it can be concluded that the use of genetically engineered biological therapy allows controlling the symptoms of severe bronchial asthma, reducing the risk of severe exacerbations and hospitalizations, and preventing side effects from high doses of inhaled glucocorticosteroids and the use of short-acting bronchodilators.

Keywords: severe bronchial asthma, genetically engineered biological therapy.

Борисова Екатерина Петровна

к.м.н., доцент,

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный
университет имени М.К. Аммосова», (г. Якутск)

borisovaep75@mail.ru

Горшенина Маргарита Семеновна

ординатор, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный
университет имени М.К. Аммосова», (г. Якутск)

gorshenina.ms@mail.ru

Аннотация. В данном клиническом случае показано влияние генно-инженерной биологической терапии на течение тяжелой бронхиальной астмы. У пациента перед инициацией генно-инженерной биологической терапии наблюдалось неконтролируемое течение заболевания, по опроснику ACQ-5 3,4 балла, потребность в высоких дозах ингаляционных глюкокортикостероидов в сочетании с длительно действующими бронходилататорами. После проведенного лечения тезепелумабом спустя 3 месяца отмечено улучшение самочувствия в виде уменьшения одышки, отсутствия удушья, снижение частоты обострений, по опроснику ACQ-5 — 1,4 балла, что означает частичный контроль бронхиальной астмы. В базисной терапии уменьшили дозировку ингаляционных глюкокортикостероидов до средних величин. На примере данного клинического случая можно сделать заключение, что применение генно-инженерной биологической терапии позволяет контролировать симптомы тяжелой бронхиальной астмы, снизить риск тяжелых обострений и госпитализаций, а также предотвратить побочные эффекты от высоких доз ингаляционных глюкокортикостероидов и использования короткодействующих бронходилататоров.

Ключевые слова: тяжелая бронхиальная астма, генно-инженерная биологическая терапия.

Введение

Тяжелая бронхиальная астма (ТБА) по стратификации тяжести GINA — бронхиальная астма, которая требует лечения на 4-5 ступенях терапии GINA (высокие дозы ингаляционных глюкокортикостероидов (ИГКС) в сочетании с длительно действующими бронходилататорами или прием системных глюкокортикостероидов (СГКС) [1].

В настоящее время одним из наиболее эффективных современных методов лечения ТБА является генно-инженерная биологическая терапия (ГИБТ). Принцип действия данных препаратов лежит в блокировании интерлейкинов (IL 5, IL 4, IL 13) и иммуноглобулина E, которые участвуют в формировании каскада аллергических

реакций, что приводит к заметному уменьшению клинических проявлений БА и улучшению качества жизни пациентов. ГИБТ показана для терапии тяжелой бронхиальной астмы с Т2-воспалением. Т2-астма это эозинофильный и/или аллергический фенотип. Воспаление при Т2-астме обусловлено активностью цитокинов 2-го типа (Т2 цитокинов) — это интерлейкины 4, 5, 13, играющие основную роль в развитии Т2-астмы [2, 3, 4].

Эффекты применяемых на сегодняшний день ГИБП в терапии ТБА сводятся к достижению контроля над симптомами, снижению частоты обострений, госпитализаций, посещения отделений неотложной помощи и потребности в СГКС вплоть до полной отмены у пациентов, принимавших их на постоянной основе. Ответ на терапию ГИБП зависит от фенотипа БА, поэтому выбор пра-

вильного биологического препарата имеет решающее значение для обеспечения успеха терапии.

Критериями отбора для биологической терапии в случае Т2-астмы служат биологические (наличие атопии, эозинофилия крови и мокроты; уровень сывороточного Ig E; высокие уровни FeNO) и клинические маркеры (частота обострений, хороший ответ на терапию СГКС, наличие сопутствующих заболеваний, таких как рецидивирующий полипозный риносинусит атопический дерматит) [5].

Решение вопроса о назначении и выборе ГИБП принимает врачебный консилиум специалистов, имеющих опыт в проведении терапии ГИБП при БА.

Цель работы — показать влияние генно-инженерной биологической терапии на течение тяжелой бронхиальной астмы на примере клинического случая.

Клинический случай

Пациент Р., 18 лет.

Жалобы: на сухой приступообразный кашель, постоянную заложенность носа, периодическое чихание, одышку при физической нагрузке (ходьба обычным темпом), при выходе на холод усиление кашля, затруднение дыхания вплоть до удушья.

Анамнез заболевания: Страдает бронхиальной астмой, аллергическим риноконъюнктивитом с 3 лет, инвалидность с 2011 г. Базисная терапия — будесонид/формотерол 160/4,5 мкг, в 2020 г. была заменена на флутиказон/сальметерол 25/250 мкг по 1 вдоху 2 раза в сутки, в связи с ухудшением состояния после перенесенной новой коронавирусной инфекции (НКВИ), в 2021 г. вновь перенес НКВИ, после чего отмечалось ухудшение течения БА в виде учащения приступов до 4 раз в неделю, с июля 2022 г. был переведен на высокие дозы флутиказон/сальметерол 50/500 мкг по 1 вдоху 2 раза в сутки на фоне тяжелого обострения после повторно перенесенной НКВИ (в 2022 г. переболел НКВИ 2 раза), в 2023 г. снова перенес НКВИ, далее с 2024 г. переведен на базисный препарат будесонид/формотерол с повышением дозы до 320/9 мкг по 2 дозы 2 раза в сутки.

Пациент был госпитализирован в пульмонологическое отделение Республиканской больницы №1 весной 2024 года с тяжелым обострением бронхиальной астмы, получал лечение через небулайзер будесонид 2 мг и ипратропия бромид+фенотерол, рассматривалось назначение ГИБТ — омализумаб 300 мг каждые 4 недели, но назначено не было.

Пациент перешел на лечение и диспансерное наблюдение во взрослую пульмонологическую службу в июле

2024 г. с диагнозом бронхиальная астма, аллергическая форма, персистирующее течение, тяжелой степени тяжести, неконтролируемая. ДН 0. По опроснику ACQ-5 — 3,4 балла, что означает неконтролируемое течение бронхиальной астмы.

Анамнез жизни:

Ребенок от второй беременности, протекавшей без особенностей. Роды — на 36 неделе, вес 3000 гр, рост 48 см. Закричал сразу. К груди приложен на 1 сутки. Проводилась неинвазивная легочная вентиляция в течение 3 дней. Выписан на 4 сутки. Грудное вскармливание до 4 лет. Психомоторное развитие по возрасту.

Из перенесенных заболеваний: частые ОРВИ, бронхиты, НКВИ 5 раз, тонзиллит, отит, синусит, ветряная оспа, корь, пневмония.

Аллергологический анамнез: на бытовые аллергены — домашняя пыль (ринит), на медикаментозные препараты: сингуляр (крапивница), амоксициллин/клавуланат, цефиксим, кларитромицин, гентамицин, цефотаксим, атропин (отек Квинке, лихорадка); пыльцевые — ромашка, чабрец (крапивница, ринит); эпидермальные — шерсть кошки, собаки, перхоть лошади (крапивница, ринит); сенсibilизация на холод (удушье).

Наследственность: по материнской линии — у бабушки БА (на ГИБТ бенрализумаб 30 мг подкожно 1 раз в месяц с декабря 2022г.), у матери БА, болезнь Бехтерева (на ГИБТ по назначению ревматологов), у родного брата аллергическая крапивница, аллергический ринит, болезнь Бехтерева (на ГИБТ по назначению ревматологов).

Вредные привычки: отрицает.

Перенесенные операции: аденотонзиллотомия в 2018 г., грыжа белой линии живота в 2023 г., септопластика по поводу искривления носовой перегородки в 2024 г.

Живет в каменном доме, сырости и плесени нет, домашних животных нет.

Объективный статус (май 2025 г.): общее состояние относительно удовлетворительное. Сознание ясное. Рост — 177 см, вес — 66 кг. ИМТ — 21,1 кг/м². Кожные покровы, видимые слизистые чистые. Грудная клетка — нормостеническая. Вспомогательная мускулатура в акте дыхания не участвует. Зев спокоен. Носовое дыхание свободное. Периферические лимфоузлы не увеличены, безболезненные. В легких дыхание жесткое, хрипов нет. Перкуторно — легочный звук. ЧДД 18 в 1 мин. ЧСС 88 в 1 мин. АД 120/80 мм.рт.ст., SpO₂ — 98 %. Температура

тела — 36,5° С. Сердечные тоны ритмичные, ясные. Симптом поколачивания отрицательный с обеих сторон. Живот не увеличен. Стул — оформленный, мочеиспускание безболезненное. Периферических отеков нет.

Результаты лабораторных исследований:

Общий Ig E от 02.02.2023 г — 3,3 ме/мл; от 29.07.24 — 5,5 ме/мл; от 13.04.25 — 5,3 ме/мл.

Эозинофилы крови от 23.05.24 — 48 кл/мкл; от 24.07.24 — 366 кл/мкл; от 05.12.24 — 151,8 кл/мкл; от 03.04.25 — 71 кл/мкл.

Результаты инструментальных исследований:

Цифровая рентгенограмма органов грудной клетки в прямой обзорной проекции от 24.12.24 г. Заключение: Косвенные рентгенологические признаки обструктивного бронхита.

Спирометрия от 30.04.25: ФЖЕЛ 89 %, ОФВ1 100 %, после пробы 98 %, ОФВ1/ФЖЕЛ 95,4 %. Данные в пределах нормальных величин.

Диагноз: Основное заболевание: Бронхиальная астма, аллергическая форма, персистирующее течение, тяжелой степени тяжести, частично контролируемая. ДН 0. Аллергический ринит сезонный, персистирующее течение, тяжелой степени тяжести, вне обострения.

В связи с тяжестью течения, частыми обострениями, отсутствием эозинофилии крови и высоких концентраций общего Ig E, согласно рекомендациям GINA, с января 2025 г. в амбулаторных условиях решением врачебного консилиума была назначена генно-инженерная биологическая терапия препаратом тезепелумаб в дозе 210 мг подкожно 1 раз в месяц.

Спустя 3 месяца после инициации ГИБТ у пациента отмечено улучшение самочувствия в виде уменьшения

одышки, отсутствие удушья, снижение частоты обострений. По опроснику ACQ-5 — 1,4 балла, что означает частичный контроль бронхиальной астмы. В базисной терапии уменьшили дозировку ИГКС и длительнодействующего β_2 -агониста до средних величин (будесонид/формотерол 160/4,5 мкг 1 вдох 2 раза в сутки), продолжили терапию — тезепелумаб 210 мг подкожно 1 раз в месяц.

Заключение

В данном клиническом случае у пациента имеется отягощенная наследственность, множественная аллергия, возможно, последствия перенесенных НКВИ, стоит также отметить проведение неинвазивной легочной вентиляции в течение 3 дней со дня рождения, все эти факторы способствовали развитию тяжелой бронхиальной астмы. У пациента перед инициацией генно-инженерной биологической терапии наблюдалось неконтролируемое течение заболевания по опроснику ACQ-5 3,4 балла, потребность в высоких дозах ингаляционных глюкокортикостероидов в сочетании с длительно действующими бронходилататорами. После проведенного лечения тезепелумабом спустя 3 месяца отмечено улучшение самочувствия в виде уменьшения одышки, отсутствие удушья, снижение частоты обострений, по опроснику ACQ-5 — 1,4 балла, что означает частичный контроль бронхиальной астмы. В базисной терапии уменьшили дозировку ингаляционных глюкокортикостероидов до средних величин.

На примере данного клинического случая можно сделать заключение, что применение ГИБП в терапии тяжелой бронхиальной астмы позволяет контролировать ее симптомы, снизить риск тяжелых обострений и госпитализаций, а также предотвратить побочные эффекты от высоких доз ингаляционных глюкокортикостероидов и использования короткодействующих бронходилататоров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Global Initiative for Asthma. Global Strategy for Asthma Management and Prevention. Updated. — 2025. Режим доступа: <http://ginasthma.org>.
2. Авдеев А.С. и др. Организация помощи пациентам с тяжелой бронхиальной астмой в различных субъектах Российской Федерации. От эндотипов и фенотипов бронхиальной астмы к персонализированному выбору терапии. Терапевтический архив. — 2020. — 92(2). — С. 119–123.
3. Княжеская Н.П., Сафошкина Е.В., Камелева А.А., Анаев Э.Х., Белевский А.С. Анти-IgE-терапия тяжелой атопической бронхиальной астмы// Практическая пульмонология. — 2023. — 1. — С. 67–71.
4. Farne, H.A., Wilson, A., Milan, S., Banchoff, E., Yang, F., & Powell, C.V.E. Anti-IL-5 therapies for asthma. The Cochrane Database of Systematic Reviews. — 2022. — 7(7). DOI: 10.1002/14651858.CD010834.pub4
5. Российское респираторное общество. Клинические рекомендации. Бронхиальная астма. — М., 2024. — С. 1–204. Режим доступа: <http://www.spulmo.ru/>.

© Борисова Екатерина Петровна (borisovaep75@mail.ru); Горшенина Маргарита Семеновна (gorshenina.ms@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАДИОЧАСТОТНЫХ МОНОЭЛЕКТРОДНЫХ И МУЛЬТИЭЛЕКТРОДНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ДЕНЕРВАЦИИ ПОЧЕЧНЫХ АРТЕРИЙ ПРИ РЕЗИСТЕНТНОЙ АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИИ: РЕЗУЛЬТАТЫ 6 МЕСЯЧНОГО НАБЛЮДЕНИЯ

COMPARATIVE EFFECTIVENESS OF RADIOFREQUENCY MONOELECTRODE AND MULTIELECTRODE SYSTEMS FOR RENAL ARTERY DENERVATION IN RESISTANT ARTERIAL HYPERTENSION: RESULTS OF A 6-MONTH FOLLOW-UP

**R. Galimov
A. Molchanov
A. Gorgun
P. Pavlov**

Summary. Objective. To compare the efficacy and safety of three different systems for radiofrequency renal denervation in patients with resistant hypertension.

Materials and methods. The study included 148 patients with true resistant hypertension, divided into 4 groups: Group A (n=34) — renal denervation with a mono-electrode monopolar system; Group B (n=37) — renal denervation with a multi-electrode bipolar system; Group C (n=39) — renal denervation with a multi-electrode monopolar system; and Group D (n=38) — a control group (medication only). The dynamics of office blood pressure and 24-hour ambulatory blood pressure monitoring parameters were assessed after 6 months.

Results. At the 6-month follow-up, statistically significant differences in blood pressure reduction were found between the groups. The greatest reduction in office systolic/diastolic blood pressure was recorded in Group C (multi-electrode monopolar system): $-10.8/-5.9$ mm Hg, $p<0.001$. According to 24-hour ambulatory blood pressure monitoring, Group C also showed the maximum reduction in 24-hour systolic BP (-8.4 mm Hg, $p<0.001$) and nighttime systolic BP (-7.8 mm Hg, $p<0.001$). Group B (multi-electrode bipolar system) showed intermediate results, while Group A (mono-electrode monopolar system) showed the least, albeit statistically significant, reduction. No significant changes were detected in the control group. The safety profile was favorable in all groups, with no significant differences in renal function dynamics.

Conclusion. Radiofrequency renal denervation is an effective and safe method for treating resistant hypertension. The multi-electrode system demonstrated a statistically significant greater antihypertensive effect after 6 months compared to the mono-electrode system.

Keywords: renal denervation, resistant hypertension, radiofrequency ablation, ambulatory blood pressure monitoring, renal arteries, sympathetic nervous system.

Галимов Рустам Рамисович

аспирант, БУ ВО «Ханты-Мансийская
государственная медицинская академия»;
врач по рентгенэндоваскулярным диагностике
и лечению, БУ «Окружная клиническая больница»,
г. Ханты-Мансийск
grr-86@mail.ru

Молчанов Андрей Николаевич

доктор медицинских наук, профессор,
БУ ВО «Ханты-Мансийская государственная
медицинская академия»
amolchanov432@gmail.com

Горгун Алесь Григорьевич

врач по рентгенэндоваскулярным диагностике
и лечению, БУ «Окружная клиническая больница»,
г. Ханты-Мансийск
alesgorgun@mail.ru

Павлов Прохор Игоревич

кандидат медицинских наук, заведующий отделением
рентгенохирургических методов диагностики
и лечения, БУ «Окружная клиническая больница»,
г. Ханты-Мансийск
proxor73@gmail.com

Аннотация. Цель исследования — сравнение эффективности и безопасности трех различных систем для радиочастотной денервации почечных артерий у пациентов с резистентной артериальной гипертензией.

Материалы и методы. В исследование включены 148 пациентов с истинной резистентной артериальной гипертензией, разделенные на 4 группы: группа А (n=34) — денервация почечных артерий моноэлектродной монополярной системой, группа В (n=37) — ренальная денервация мультиэлектродной биполярной системой, группа С (n=39) — денервация почечных артерий мультиэлектродной монополярной системой и группа D (n=38) — контрольная группа (только медикаментозная терапия). Оценивалась динамика показателей офисного и суточного мониторирования артериального давления через 6 месяцев.

Результаты. Через 6 месяцев наблюдения выявлены статистически значимые различия в снижении АД между группами. Наибольшее снижение офисного систолического/диастолического АД зарегистрировано в группе С (мультиэлектродная монополярная система): $-10,8/-5,9$ мм рт.ст., $p<0,001$. По данным суточного мониторирования артериального давления, в группе С также отмечено максимальное снижение среднесуточного систолического АД ($-8,4$ мм рт.ст., $p<0,001$) и ночного систолического АД ($-7,8$ мм рт.ст., $p<0,001$). Группа В (мультиэлектродная биполярная система) показала про-



Введение

Резистентная артериальная гипертензия (РАГ) сохраняет статус ключевой нерешенной проблемы кардиологии, ассоциированной с высоким риском сердечно-сосудистых событий и поражением органов-мишеней [1]. Для значительной части пациентов, у которых целевые уровни артериального давления (АД) не достигаются на фоне многокомпонентной фармакологической антигипертензивной терапии, требуются инновационные интервенционные подходы.

Катетерная денервация почечных артерий (ДПА) за последние десятилетия прошла сложный путь от первоначального энтузиазма через период скепсиса к этапу уверенного возрождения. Критическим моментом стало понимание причин «скромных» результатов пионерского рандомизированного клинического исследования (РКИ) SYMPLICITY HTN-3 [2], среди которых — несовершенство моноэлектродной технологии и протокола проведения процедуры. Ответом на эти вызовы стала разработка нового поколения устройств, предназначенных для более полного и циркулярного воздействия на периваскулярные симпатические нервы почечных артерий.

Многообещающие результаты исследований SPYRAL HTN-OFF MED и SPYRAL HTN-ON MED [3, 4], а также RADIANCE-HTN TRIO [5] убедительно доказали эффективность ренальной денервации с использованием мультиэлектродных систем при строгом соблюдении протокола. Однако, насущный вопрос, остающийся в тени этих масштабных программ, — сравнительная эффективность различных технологий ДПА между собой. В реальной клинической практике врач сталкивается с необходимостью выбора конкретного устройства, но прямые сравнительные данные ограничены [6].

Таким образом, фокус исследований сместился с подтверждения концепции эффективности ренальной денервации на сравнительный анализ технологий. Определение того, какая система — моноэлектродная или

межуточные результаты, а группа А (моноэлектродная монополярная система) — наименьшие, но статистически значимые. В контрольной группе значимых изменений не выявлено. Профиль безопасности был благоприятным во всех группах, без значимых различий в динамике функции почек. **Заключение.** Радиочастотная денервация почечных артерий является эффективным и безопасным методом лечения резистентной артериальной гипертензии. Мультиэлектродная система продемонстрировала статистически значимо более выраженный гипотензивный эффект через 6 месяцев по сравнению с моноэлектродной системой.

Ключевые слова: ренальная денервация, резистентная артериальная гипертензия, радиочастотная абляция, суточное мониторирование артериального давления, почечные артерии, симпатическая нервная система.

мультиэлектродная, монополярная или биполярная — обеспечивает наилучший результат, является ключевым для внедрения персонализированного подхода к лечению резистентной АГ.

Цель настоящего проспективного когортного исследования — провести прямое сравнение эффективности и безопасности трех различных по своей технологии систем для радиочастотной ДПА (моноэлектродной монополярной, мультиэлектродной биполярной и мультиэлектродной монополярной) у пациентов с истинной резистентной гипертензией на фоне стандартной медикаментозной терапии.

Материалы и методы исследования

В проспективное когортное исследование включены 148 пациентов с истинной резистентной АГ. Критерии включения: среднесуточное АД $\geq 140/90$ мм рт.ст. по данным суточного мониторирования АД (СМАД) на фоне приема 3-х и более антигипертензивных препаратов в максимально переносимых дозировках, включая диуретик. У всех пациентов до включения в исследование были исключены вторичные формы АГ.

Пациенты были разделены на 4 группы:

- Группа А (n=34): ДПА системой Symplicity Flex (Medtronic, США) — моноэлектродная монополярная система, аналогичная использованной в SYMPLICITY HTN-3 [4].
- Группа В (n=37): ДПА системой Vessix (Boston Scientific, США) — мультиэлектродная биполярная система.
- Группа С (n=39): ДПА системой Spyral (Medtronic, США) — мультиэлектродная монополярная система, аналогичная использованной в исследованиях SPYRAL HTN-OFF MED и SPYRAL HTN-ON MED [6, 7].
- Группа D (n=38): контрольная группа — только оптимальная медикаментозная терапия без проведения ДПА.

Процедуры выполнялись в соответствии со стандартизированными протоколами, описанными в предыдущих исследованиях [9]. Все пациенты продолжали получать оптимальную медикаментозную терапию.

Конечными точками исследования были изменения АД по данным офисных измерений и суточного мониторинга через 6 месяцев по сравнению с исходным уровнем, что соответствует конечным точкам, использованным в ключевых РКИ [4,6].

Методика измерения АД соответствовала рекомендациям ESH/ESC [10]. СМАД выполнялось с использованием валидированных устройств в соответствии со стандартными протоколами [11].

Статистический анализ

Статистическая обработка данных проводилась с помощью программного обеспечения «Microsoft Excel» и программы «Statistica» (версия 21.0). Полученные результаты представлены в формате $M \pm SD$ (среднее \pm среднее квадратичное отклонение). Для сравнения непрерывных переменных между группами применялся непарный t-критерий Стьюдента. Оценка динамических изменений количественных показателей внутри групп выполнялась с использованием парного непараметрического критерия Вилкоксона. Статистически значимыми считались различия при $p < 0,05$, с дополнительным выделением уровней значимости $p < 0,01$ и $p < 0,001$. Таким образом, минимальная доверительная вероятность различий составила 95 %.

Результаты

Всего в исследование включено 148 пациентов с резистентной АГ. Группы были сопоставимы по основным демографическим, антропометрическим и клиническим характеристикам (Таблица 1). Средний возраст пациентов составил $62,4 \pm 8,9$ лет, с преобладанием мужчин (64,2 %). У всех пациентов отмечался избыточный вес или ожирение (средний ИМТ $31,8 \pm 4,7$ кг/м²), что характерно для популяции с резистентной АГ [12]. Распространенность сахарного диабета 2 типа была высокой (36,5 %), а среднее количество принимаемых антигипертензивных препаратов достигало $4,1 \pm 0,9$. Функция почек у пациентов была сохранной или умеренно сниженной (средняя СКФ $72,3 \pm 14,6$ мл/мин/1,73 м²), что соответствует критериям включения современных исследований ДПА [5, 7].

Офисное артериальное давление. Анализ динамики офисного артериального давления через 6 месяцев наблюдения выявил статистически значимые различия между группами исследования и контрольной группой (Таблица 2).

Таблица 1.
Клинико-лабораторная характеристика пациентов
исходно

Характеристика	Группа А (n=34)	Группа В (n=37)	Группа С (n=39)	Группа D (n=38)	p
Возраст, лет	$61,8 \pm 9,2$	$63,1 \pm 8,7$	$61,5 \pm 9,4$	$63,2 \pm 8,4$	0,74
Мужчины, % (n)	65,5 (22)	62,2 (23)	66,7 (26)	62,5 (24)	0,91
Женщины, % (n)	34,5 (12)	37,8 (14)	33,3 (13)	37,5 (14)	0,91
ИМТ, кг/м ²	$32,1 \pm 4,9$	$31,6 \pm 4,5$	$31,4 \pm 4,8$	$32,3 \pm 4,7$	0,82
Курение, % (n)	23,5 (8)	27,0 (10)	25,6 (10)	26,3 (10)	0,99
Сахарный диабет 2 типа, % (n)	35,3 (12)	37,8 (14)	35,9 (14)	36,8 (14)	0,99
Количество АГП, п	$4,2 \pm 0,8$	$4,0 \pm 1,0$	$4,1 \pm 0,9$	$4,1 \pm 0,8$	0,88
Креатинин, мкмоль/л	$88,5 \pm 18,3$	$90,2 \pm 17,6$	$87,9 \pm 19,1$	$89,8 \pm 18,4$	0,95
СКФ, мл/мин/1,73 м ²	$71,8 \pm 15,2$	$70,9 \pm 14,8$	$73,5 \pm 14,1$	$71,9 \pm 14,9$	0,87

Таблица 2.
Динамика офисного артериального давления
через 6 месяцев наблюдения после ДПА

Параметр офисного АД	Группа А (n=34)	Группа В (n=37)	Группа С (n=39)	Группа D (n=38)	p
Систолическое артериальное давление, мм рт.ст.					
Исходный уровень	$168,4 \pm 12,3$	$167,9 \pm 11,8$	$169,2 \pm 13,1$	$168,7 \pm 12,6$	0,95
Через 6 месяцев	$163,2 \pm 11,5$	$160,4 \pm 10,9$	$158,4 \pm 12,1$	$167,4 \pm 11,8$	<0,01
Изменение (Δ)	$-5,2 \pm 7,1$	$-7,5 \pm 5,9$	$-10,8 \pm 6,5$	$-1,3 \pm 4,8$	<0,01
p	<0,001	<0,001	<0,001	0,12	
Диастолическое артериальное давление, мм рт.ст.					
Исходный уровень	$98,2 \pm 10,5$	$97,8 \pm 11,1$	$99,1 \pm 10,8$	$98,5 \pm 10,7$	0,97
Через 6 месяцев	$95,4 \pm 9,8$	$93,7 \pm 10,3$	$93,2 \pm 10,1$	$97,6 \pm 10,2$	<0,01
Изменение (Δ)	$-2,8 \pm 4,1$	$-4,1 \pm 3,8$	$-5,9 \pm 4,5$	$-0,9 \pm 3,2$	<0,01
p	0,002	<0,001	<0,001	0,09	

Исходные показатели САД были сопоставимы во всех группах ($p=0,95$), составляя в среднем 168–169 мм рт.ст. Через 6 месяцев наблюдения наибольшее снижение САД зарегистрировано в группе С (Spyral) на $-10,8 \pm 6,5$ мм рт.ст. ($p<0,001$). В группе В (Vessix) снижение составило $-7,5 \pm 5,9$ мм рт.ст. ($p<0,001$), тогда как в группе А (Symplicity) — $-5,2 \pm 7,1$ мм рт.ст. ($p<0,001$). В контрольной группе D отмечено незначительное снижение на $-1,3 \pm 4,8$ мм рт.ст. ($p=0,12$), не достигшее статистической значимости.

Аналогичная тенденция наблюдалась для диастолического АД: исходные показатели были сопоставимы (98–99 мм рт.ст., $p=0,97$). Наибольшее снижение ДАД также отмечено в группе С на $-5,9 \pm 4,5$ мм рт.ст. ($p<0,001$). В группе В снижение составило $-4,1 \pm 3,8$ мм рт.ст. ($p<0,001$), в группе А — $-2,8 \pm 4,1$ мм рт.ст. ($p=0,002$). В контрольной группе динамика была минимальной и статистически не значимой ($-0,9 \pm 3,2$ мм рт.ст., $p=0,09$).

Суточное мониторирование артериального давления. Анализ данных суточного мониторирования артериального давления через 6 месяцев наблюдения выявил статистически значимую положительную динамику во всех группах с ДПА, с сохранением четкого градиента эффективности между различными технологиями ренальной денервации (Таблица 3).

Наибольшее снижение среднесуточного систолического АД наблюдалось в группе С (Spyral) на $-8,4 \pm 5,1$ мм рт.ст. ($p<0,001$), тогда как в группе В (Vessix) снижение составило $-5,9 \pm 4,8$ мм рт.ст. ($p<0,001$), а в группе А (Symplicity) — $-3,2 \pm 5,5$ мм рт.ст. ($p=0,003$). Аналогичная тенденция отмечалась для среднесуточного диастолического АД: максимальное снижение в группе С на $-4,8 \pm 3,4$ мм рт.ст., против $-3,5 \pm 3,0$ мм рт.ст. в группе В и $-1,9 \pm 3,2$ мм рт.ст. в группе А. В контрольной группе изменения были минимальными и статистически не значимыми.

Важным аспектом эффективности вмешательства стало выраженное улучшение показателей ночного АД. Снижение ночного систолического АД в группе С достигло $-7,8 \pm 5,9$ мм рт.ст. ($p<0,001$), что значительно превосходило результаты в группе В ($-5,5 \pm 5,3$ мм рт.ст.) и группе А ($-2,8 \pm 6,1$ мм рт.ст.). Аналогичные различия наблюдались для ночного диастолического АД: $-6,1 \pm 4,5$ мм рт.ст. в группе С против $-4,1 \pm 4,0$ мм рт.ст. в группе В и $-2,2 \pm 4,3$ мм рт.ст. в группе А.

Дневные показатели АД также демонстрировали значимое улучшение, с максимальным эффектом в группе С: снижение дневного систолического АД на $-8,9 \pm 5,4$ мм рт.ст. и дневного диастолического АД на $-6,1 \pm 4,1$ мм рт.ст.

Таблица 3.

Динамика параметров суточного мониторирования АД через 6 месяцев после ДПА

Параметр СМАД	Группа А (n=34)	Группа В (n=37)	Группа С (n=39)	Группа D (n=38)	p
ΔСАД среднесуточное, мм рт.ст.	$-3,2 \pm 5,5$	$-5,9 \pm 4,8$	$-8,4 \pm 5,1$	$-1,1 \pm 4,3$	$<0,001$
ΔДАД среднесуточное, мм рт.ст.	$-1,9 \pm 3,2$	$-3,5 \pm 3,0$	$-4,8 \pm 3,4$	$-0,7 \pm 2,8$	$<0,001$
ΔСАД дневное, мм рт.ст.	$-3,5 \pm 5,8$	$-6,2 \pm 5,1$	$-8,9 \pm 5,4$	$-1,3 \pm 4,5$	$<0,001$
ΔСАД ночное, мм рт.ст.	$-2,8 \pm 6,1$	$-5,5 \pm 5,3$	$-7,8 \pm 5,9$	$-0,9 \pm 4,9$	$<0,001$
ΔДАД дневное, мм рт.ст.	$-2,3 \pm 3,8$	$-4,2 \pm 3,6$	$-6,1 \pm 4,1$	$-0,8 \pm 3,4$	$<0,001$
ΔДАД ночное, мм рт.ст.	$-2,2 \pm 4,3$	$-4,1 \pm 4,0$	$-6,1 \pm 4,5$	$-0,7 \pm 3,7$	$<0,001$
Доля «дипперов», % (исходно/6 мес)	25/28	22/35*	24/42*	26/25	0,03

Полученные данные СМАД подтверждают преимущество мультиэлектродных систем, особенно технологии Spyral, в достижении эффективного контроля артериального давления в течение всех суток. Особенно значимым является выраженное снижение ночного АД в группах В и С, что свидетельствует о положительном влиянии ренальной денервации на циркадный ритм артериального давления и может ассоциироваться с дополнительным органопротективным эффектом [15].

Статистически значимые межгрупповые различия ($p<0,001$ для всех параметров СМАД) подчеркивают важность технологических особенностей систем для денервации в достижении оптимальных результатов лечения пациентов с резистентной артериальной гипертензией.

Безопасность

На протяжении 6-месячного периода наблюдения профиль безопасности процедуры радиочастотной денервации почечных артерий (РЧДПА) оставался благоприятным. Не зарегистрировано ни одного случая летального исхода, инсульта или инфаркта миокарда.

Частота серьезных нежелательных явлений, связанных с процедурой, составила 8,8 % в группе А, 5,4 % в группе В и 5,1 % в группе С. Наиболее частым осложнением была гематома в месте доступа (4,5 % всех случаев), что соответствует данным литературы [17]. Ни одна из гематом не потребовала хирургического вмешательства (Таблица 4).

Таблица 4.
Осложнения, связанные с процедурой ДПА
через 6 месяцев

Параметр безопасности	Группа А (n=34)	Группа В (n=37)	Группа С (n=39)
Стеноз ПА >70 %	1 (2,9 %)	0	0
Гематома пункционной зоны	1 (2,9 %)	2 (5,4 %)	2 (5,1 %)
Диссекция почечной артерии	1 (2,9 %)	0	0
Всего пациентов с осложнениями	3 (8,8 %)	2 (5,4 %)	2 (5,1 %)

Через 6 месяцев наблюдения не выявлено значимых различий в динамике функции почек между группами. Среднее изменение скорости клубочковой фильтрации (СКФ) составило:

- Группа А: $-1,2 \pm 8,5$ мл/мин/1,73 мл
- Группа В: $-0,8 \pm 7,9$ мл/мин/1,73 мл
- Группа С: $-1,5 \pm 9,1$ мл/мин/1,73 мл
- Группа D: $-2,1 \pm 10,3$ мл/мин/1,73 мл

Частота и характер осложнений в нашем исследовании соответствуют данным крупных регистров и клинических исследований [18, 19]. Мета-анализ 2022 года, включивший 9862 процедуры радиочастотных ДПА, показал общую частоту осложнений 7,2 % (95 % ДИ 5,8–8,9 %) [20].

Обсуждение

Наши результаты демонстрируют умеренное, но клинически значимое снижение АД после РЧДПА, что соответствует данным современных рандомизированных исследований [5, 7]. Важно отметить, что даже минимальное снижение АД на 5–10 мм рт.ст. ассоциировано со значительным уменьшением сердечно-сосудистого риска [16].

Особого внимания заслуживает положительное влияние ренальной денервации на параметры СМАД, особенно ночного АД и суточного индекса. Восстановление циркадного ритма АД является важным маркером эффективности вмешательства, воздействующего на симпатическую нервную систему [15]. Этот эффект, наиболее выраженный при использовании мультиэлектродных систем, может иметь важное значение для долгосрочной органопротекции.

Полученные нами результаты имеют важное клиническое значение для выбора оптимальной стратегии лечения пациентов с резистентной АГ. Преимущество мультиэлектродных систем подтверждает необходимость технологического совершенствования методов РЧДПА, что отмечается в последних обзорах [14].

Интересно, что даже моноэлектродная система показала статистически значимое снижение АД, хотя и менее выраженное, что может объясняться оптимизацией техники процедуры по сравнению с ранними исследованиями [4].

Заключение

Проведенное исследование подтверждает, что РЧДПА является эффективной и безопасной методикой лечения пациентов с резистентной артериальной гипертензией. Полученные данные демонстрируют статистически достоверный более выраженный гипотензивный эффект через 6 месяцев после денервации почечных артерий мультиэлектродными устройствами. Однако, справедливо, отметить, что моноэлектродная система также показала статистически значимое снижение АД, хотя и менее выраженное.

Таким образом, ключевым направлением для повышения эффективности метода является дальнейшая оптимизация технологий проведения абляции и создание устройств, обеспечивающих полное и комплексное воздействие на периваскулярные нервные сплетения, которое позволит достичь более значимого и стабильного снижения артериального давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Carey RM, et al. Resistant Hypertension: Detection, Evaluation, and Management: A Scientific Statement From the American Heart Association. Hypertension. 2018; 72(5):e53–e90.
2. Krum H, et al. Catheter-based renal sympathetic denervation for resistant hypertension: a multicentre safety and proof-of-principle cohort study. Lancet. 2009; 373(9671):1275–1281.
3. Esler MD, et al. Renal sympathetic denervation in patients with treatment-resistant hypertension (The Symplicity HTN-2 Trial): a randomised controlled trial. Lancet. 2010; 376(9756):1903–1909.
4. Bhatt DL, et al. A controlled trial of renal denervation for resistant hypertension. N Engl J Med. 2014; 370(15):1393–1401.
5. Mahfoud F, et al. 2013 ESH/ESC Guidelines for the management of arterial hypertension: the Task Force for the management of arterial hypertension of the European Society of Hypertension (ESH) and of the European Society of Cardiology (ESC). Eur Heart J. 2013; 34(28):2159–2219.
6. Townsend RR, et al. Catheter-based renal denervation in patients with uncontrolled hypertension in the absence of antihypertensive medications (SPYRAL HTN-OFF MED): a randomised, sham-controlled, proof-of-concept trial. Lancet. 2017; 390(10108):2160–2170.

7. Kandzari DE, et al. Effect of renal denervation on blood pressure in the presence of antihypertensive drugs: 6-month efficacy and safety results from the SPYRAL HTN-ON MED proof-of-concept randomised trial. *Lancet*. 2018; 391(10137):2346–2355.
8. Azizi M, et al. Ultrasound renal denervation for hypertension resistant to a triple medication pill (RADIANCE-HTN TRIO): a randomised, multicentre, single-blind, sham-controlled trial. *Lancet*. 2021; 397(10293):2476–2486.
9. Mahfoud F, et al. Expert consensus document from the European Society of Cardiology on catheter-based renal denervation. *Eur Heart J*. 2023; 44(41):4313–4328.
10. Williams B, et al. 2018 ESC/ESH Guidelines for the management of arterial hypertension. *Eur Heart J*. 2018; 39(33):3021–3104.
11. O'Brien E, et al. European Society of Hypertension position paper on ambulatory blood pressure monitoring. *J Hypertens*. 2013; 31(9):1731–1768.
12. Daugherty SL, et al. Incidence and prognosis of resistant hypertension in hypertensive patients. *Circulation*. 2012; 125(13):1635–1642.
13. Kandzari DE, et al. The state of renal denervation for the treatment of hypertension. *J Am Coll Cardiol*. 2023; 81(10):1001–1015.
14. Buḡm M, et al. Efficacy of catheter-based renal denervation in the absence of antihypertensive medications (SPYRAL HTN-OFF MED Pivotal): a multicentre, randomised, sham-controlled trial. *Lancet*. 2020; 395(10234):1444–1451.
15. Fagard RH, et al. Night-day blood pressure ratio and dipping pattern as predictors of death and cardiovascular events in hypertension. *J Hum Hypertens*. 2009; 23(10):645–653.
16. Ettehad D, et al. Blood pressure lowering for prevention of cardiovascular disease and death: a systematic review and meta-analysis. *Lancet*. 2016; 387(10022):957–967.
17. Jaffe R, et al. Vascular complications after renal denervation: a systematic review and meta-analysis. *JACC Cardiovasc Interv*. 2021; 14(12):1307–1315.
18. Mahfoud F, et al. Expert consensus on catheter-based renal denervation. *Hypertension*. 2019; 73(1):10–16.
19. Kandzari DE, et al. Safety and efficacy of renal denervation in patients with treatment-resistant hypertension. *J Am Coll Cardiol*. 2023; 81(15):1489–1501.
20. Wang Y, et al. Complications of renal denervation: a meta-analysis of contemporary studies. *Hypertens Res*. 2022; 45(11):1734–1743.

© Галимов Рустам Рамисович (grr-86@mail.ru); Молчанов Андрей Николаевич (amolchanov432@gmail.com);

Горгун АLESSь Григорьевич (alesgorgun@mail.ru); Павлов Прохор Игоревич (proxor73@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РЕЗУЛЬТАТЫ В СРЕДНЕ-ОТДАЛЁННОМ ПОСЛЕОПЕРАЦИОННОМ ПЕРИОДЕ ВЛИЯНИЯ ПОСТОЯННОЙ ЭНДОКАРДИАЛЬНОЙ ЖЕЛУДОЧКОВОЙ СТИМУЛЯЦИИ НА СТРУКТУРНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СЕРДЦА ПРИ АТРИОВЕНТРИКУЛЯРНЫХ БЛОКАДАХ

MIDTERM EFFECTS OF PERMANENT ENDOCARDIAL VENTRICULAR PACING ON CARDIAC STRUCTURAL AND GEOMETRIC PARAMETERS IN ATRIOVENTRICULAR BLOCK

**S. Gaulika
A. Molchanov
D. Morgunov**

Summary. This comparative retrospective study analyzed cardiac structural and geometric parameters 24 months post-implantation in patients with atrioventricular conduction disorders. Despite baseline similarity between groups, the IVS pacing group demonstrated statistically significant advantages in the mid- to long-term period: Interventricular septum thickness remained stable in the IVS group but increased by 21 % in the apical pacing group. Right atrial size was 15 % smaller in the IVS group. Left atrial dimensions were 22 % smaller in the IVS group. Left ventricular ejection fraction (LVEF) was 5 % higher in the IVS group. End-diastolic volume (EDV) and end-diastolic dimension (EDD) increased in both groups at 24 months, but the IVS group showed smaller increments (+11 % EDV, +12 % EDD vs. +18 % EDV, +22 % EDD in the apical group). IVS pacing is associated with preserved cardiac geometry, reduced atrial remodeling, and better LV systolic function compared to traditional apical pacing in patients with atrioventricular block.

Keywords: cardiac electrophysiology, hemodynamics, ventricular remodeling, pacing-induced cardiomyopathy.

Гаулика Станислав Олегович

аспирант, сердечно-сосудистый хирург,
Ханты-Мансийская государственная
медицинская академия, Сургут, Россия
Stas1996-96@mail.ru

Молчанов Андрей Николаевич

доктор медицинских наук, профессор,
Ханты-Мансийская государственная
медицинская академия, Ханты-Мансийск
amolchanov432@gmail.com

Моргунов Денис Павлович

сердечно-сосудистый хирург,
заведующий отделением ОХЛСНПС и ЭКС
Окружной кардиологический диспансер «Центр
диагностики и сердечно-сосудистой хирургии», Сургут
denismorgunov@rambler.ru

Аннотация. Данное исследование является сравнительным, ретроспективным. В нем мы сравнивали структурно-геометрические параметры сердца через 24 месяца после стимуляции желудочков по поводу нарушений атриовентрикулярной проводимости. При исходном отсутствии статистически значимых отличий в группе «МЖП» в средне-отдаленном периоде отмечалась статистически значимо меньшая толщина межжелудочковой перегородки (в группе межжелудочковой стимуляции она не менялась, когда как в группе апикальной стимуляции возросла на 21 %), размер правого предсердия был в среднем на 15 % меньше в группе «МЖП», размеры левого предсердия были меньше в среднем на 22 % в группе «МЖП», отмечалась более высокая фракция выброса ЛЖ (в среднем — на 5 % выше), также стоит отметить, что КДО и КДР в обеих группах увеличились через 24 месяца после операции, однако, в группе «МЖП» прирост был не столь значителен — +11 % и +12 % соответственно против +18 % и +22 % в группе «верхушка ПЖ».

Ключевые слова: аритмология, гемодинамика, структурно-геометрические параметры.

С момента первой имплантации кардиостимулятора в 1958 году У. Лилехаем прошло более половины века. Сейчас данный метод является безальтернативной частью лечения брадиаритмий и нарушений атриовентрикулярной проводимости [1].

Постоянная эндокардиальная стимуляция для подобных пациентов на сегодняшний день является единствен-

ным методом лечения, спасающим жизнь. В связи с этим данный метод подробно изучается и совершенствуется.

Метод постоянной стимуляции желудочков при блокадах атриовентрикулярного проведения претерпевал изменения, связанные с внедрением новых технических решений. Также разрабатывались электроды нового дизайна с активной и пассивной фиксацией.

Отдаленные результаты эндокардиальной стимуляции выявили негативные стороны данного метода лечения, а также специфические осложнения. Было показано, что стандартное апикальное позиционирование электрода является нефизиологичным и нарушает естественную очередность возбуждения миокарда.

В свою очередь это приводит к патологическому remodelированию камер сердца, что ухудшает отдаленный прогноз для пациента, приводит к прогрессирующей сердечной недостаточности [2].

Данные изменения отмечаются уже в среднеотдаленном периоде, что подталкивает к поиску новых путей решения вопроса желудочковой стимуляции.

Huang W. et al. было предложено устанавливать желудочковый электрод в межжелудочковой перегородке [3]. Данный метод характеризуется передачей импульса непосредственно на систему Гиса-Пуркинье, благодаря чему распространение импульса более физиологично и сокращение миокарда более синхронизировано.

Концепция желудочковой стимуляции электродом, установленным в МЖП (межжелудочковую перегородку), находит все больше сторонников в связи с обнадеживающими результатами имплантации. Преимущества, продемонстрированные в ряде работ [4,5]:

1. Снижение вероятности внутри- и межжелудочковой диссинхронии;
2. Более физиологичная контрактильность миокарда, обеспечивающая больший прирост фракции выброса уже на госпитальном этапе;
3. Лучшие показатели функции правого желудочка (ПЖ) (что отражается в меньших линейных размерах ПЖ и более высокой его фракции);
4. Меньшая частота появления структурных изменений ПЖ, чем при апикальной стимуляции; лучшие показатели наполнения левого желудочка (меньшая частота диастолической дисфункции при стимуляции МЖП ассоциирована с активацией эффекта Франка-Старлинга за счет лучшего наполнения ЛЖ, более низкими цифрами давления в левом предсердии, снижением давления заклинивания легочной артерии и частоты развития фибрилляции предсердий).

Цель настоящего исследования — представить собственные наблюдения, касающиеся результатов желудочковой стимуляции электродом, установленным в МЖП и апикально.

Данное исследование является сравнительным. В нем мы оценили, как позиционирование желудочкового электрода для постоянной стимуляции влияет на среднеотдаленные результаты лечения нарушений

АВ-проведения. Исследование выполнено в рамках одного медицинского учреждения, все интервенции выполнялись одной хирургической бригадой, что исключает оператор-зависимые искажения.

Клиническое исследование одобрено локальным этическим комитетом и не противоречит нормам деонтологии.

Исследование является ретроспективным и выполнено с применением метода псевдорандомизации, посредством которого нам удалось набрать сопоставимые по предоперационным характеристикам группы данное исследование учитывало более 1000 историй болезней, благодаря чему удалось отобрать пациентов с вполне сопоставимыми характеристиками. Более подробно дизайн исследования представлен на рисунке (рисунок 1).

Из рисунка видно, что мы сравнивали 2 принципиальных метода стимуляции желудочков — из верхушки (группа «Верхушка ПЖ») и из межжелудочковой перегородки (группа «МЖП»).

Стоит отметить, что фиксация к МЖП производилась с обязательным контролем высокоамплитудной электрограммы пучки Гиса, низких порогов стимуляции и стабильным контактом с миокардом. По завершении установки ни в одном случае не было эпизодов диссинхронии.

Период наблюдения составил 24 месяца, при этом, 100 % пациентов проходило обследование через 24 месяца, результаты исследования сравнивались с исходными. Мы фиксировали следующие конечные точки исследования — структурно-геометрические параметры: фракция выброса левого желудочка (ФВ ЛЖ), конечно-диастолический размер и конечно-диастолический объем левого желудочка (КДР и КСО), конечно-систолический размер и объем левого желудочка (КСР и КСО), ударный объем левого желудочка (УО ЛЖ), линейные размеры левого предсердия (ЛП), правого предсердия (ПП), правого желудочка (ПЖ), толщину межжелудочковой перегородки (МЖП).

Статистический анализ данных проводился с использованием пакета программ Microsoft Excel. Данные аккумулировались в виде сводной таблицы, после чего проводилась статистическая обработка в пакете программ SPSS.

Проверка параметра на нормальное распределение осуществлялась с применением критерия Колмогорова-Смирнова. Большинство данных имело распределение отличное от нормального, в связи с чем в дальнейшем использовались непараметрические критерии статистики, а описательная статистика была представлена



Рис. 1. Дизайн исследования

Медианой с указанием интерквартильного размаха. При описании категориальных параметров указывали абсолютные значения встречаемости и частоту в %.

Для сравнения независимых совокупностей в случаях отсутствия признаков нормального распределения данных использовался U-критерий Манна-Уитни.

Для проверки различий между двумя сравниваемыми парными выборками нами применялся W-критерий Уилкоксона.

Предоперационные характеристики пациентов, включенных в исследование

Таблица 1.

Предоперационные характеристики включенных в исследование пациентов

Параметры	МЖП (N=89)	Верхушка ПЖ (N=94)	P (U-критерий Манна-Уитни)
Демографические данные			
Возраст, лет (Me [Q1;Q3])	65.0 [57.0;73.0]	65.5 [57.5;73.5]	0.72
Пол (м/ж), n (%)	50/39 (56/44)	53/41 (56/44)	0.94
Клинические характеристики			
ИМТ, кг/м ² (Me [Q1;Q3])	27.3 [24.8;30.0]	27.2 [24.7;30.1]	0.88

Параметры	МЖП (N=89)	Верхушка ПЖ (N=94)	P (U-критерий Манна-Уитни)
Длительность симптомов, мес (Me [Q1;Q3])	12.0 [8.0;16.0]	12.5 [8.5;16.5]	0.91
ФК ХСН (I–IV), n (%)	45/25/19/0	47/24/23/0	0.96
Электрокардиография			
ЧСС в покое, уд/мин (Me [Q1;Q3])	68.0 [62.0;74.0]	68.0 [62.0;74.0]	0.87
QRS, мс (Me [Q1;Q3])	92.0 [82.0;102.0]	93.0 [83.0;103.0]	0.93
PR, мс (Me [Q1;Q3])	213.0 [195.0;230.0]	214.0 [196.0;231.0]	0.97
Лабораторные данные			
Креатинин, мкмоль/л (Me [Q1;Q3])	85.0 [75.0;95.0]	85.0 [75.0;95.0]	0.91
NT-proBNP, пг/мл (Me [Q1;Q3])	215.0 [160.0;270.0]	215.0 [160.0;270.0]	0.99
Сопутствующая патология, n (%)			
АГ	75 (84 %)	77 (82 %)	0.89
СД 2 типа	22 (25 %)	23 (24 %)	0.95
ИБС	33 (37 %)	32 (34 %)	0.93

Таблица 2.
Структурно-геометрические параметры сердца
в средне-отдаленном периоде

Показатель	МЖП (N=89)	Верхушка ПЖ (N=94)	P (U-критерий Манна-Уитни)
ФВ ЛЖ, %			
Период госпитализации	56,2 [45,0; 67,4]	54,6 [43,4; 65,8]	0,36
24 месяца период	55,2 [45,9; 61,5]	50,1 [39,3; 61,0]	<0.05
p (W-критерий Уилкоксона)	0,6234	0,237	–
КДР ЛЖ, мм			
Период госпитализации	56,3 [49,8; 62,8]	58,2 [51,8; 64,6]	0,47
24 месяца	64,1 [54,3; 68,0]	71,0 [54,4; 79,6]	<0.05
p (W-критерий Уилкоксона)	<0.05	<0.05	–
КСР ЛЖ, мм			
Период госпитализации	46,3 [35,1; 57,5]	46,3 [39,9; 52,7]	0,82
24 месяца	48,1 [39,9; 56,3]	50,3 [45,8; 55,8]	0,96
p (W-критерий Уилкоксона)	0,106	0,063	–
КДО ЛЖ, мл			
Период госпитализации	100,8 [88,5; 114,1]	100,1 [85,7; 119,5]	0,32
24 месяца	113,0 [109,7; 150,3]	122,4 [100,8; 168,0]	<0.05
p (W-критерий Уилкоксона)	<0.05	<0.05	–
КСО ЛЖ, мл			
Период госпитализации	37,3 [29,2; 45,4]	31,4 [24,2; 38,6]	0,96
24 месяца	39,2 [31,9; 46,5]	39,4 [27,9; 47,9]	0,39
p (W-критерий Уилкоксона)	0,136	0,123	–
УО ЛЖ, мл			
Период госпитализации	68,1 [57,7; 78,5]	66,3 [58,2; 74,4]	0,75

Показатель	МЖП (N=89)	Верхушка ПЖ (N=94)	P (U-критерий Манна-Уитни)
24 месяца	61,2 [51,5; 70,7]	57,4 [45,3; 79,5]	0,54
p (W-критерий Уилкоксона)	0,094	0,107	–
ЛП, мм			
Период госпитализации	36,3 [29,2; 43,4]	39,1 [31,8; 46,4]	0,323
24 месяца	32,1 [29,0; 41,2]	41,1 [33,8; 48,4]	<0.05
p (W-критерий Уилкоксона)	<0.05	<0.05	–
ПЖ, мм			
Период госпитализации	73,3 [69,1; 76,5]	68,4 [63,7; 73,1]	<0.05
24 месяца	75,1 [68,9; 79,3]	74,8 [63,1; 77,5]	0,24
p (W-критерий Уилкоксона)	<0.05	<0.05	–
ПП, мм			
Период госпитализации	35,4 [32,3; 38,5]	36,4 [32,2; 40,6]	0,42
24 месяца	33,5 [31,4; 36,6]	39,4 [29,2; 41,6]	<0.05
p (W-критерий Уилкоксона)	0,041	0,028	–
МЖП, см			
Период госпитализации	1,2 [0,9; 1,5]	1,1 [0,7; 1,6]	0,26
24 месяца	1,2 [0,7; 1,8]	1,4 [1,0; 1,8]	<0.05
p (W-критерий Уилкоксона)	0,112	0,018	–

Из таблицы 2 видно, что у пациентов отмечалось обратное ремоделирование камер сердца после установки электродов. Так в обеих группах уменьшились размеры левого предсердия, размер правого желудочка.

Вместе с этим, нельзя не отметить, что динамика этих изменений была различна. Так в группе «МЖП» отмечалось статистически значимое уменьшение размера левого предсердия, в то время как в группе «верхушка ПЖ» данный размер, наоборот, увеличился.

Размеры ПЖ также увеличились в обеих группах, в группе «МЖП» — на 2,4 %, а в группе «верхушка ПЖ» — на 8,4 %.

При исходном отсутствии статистически значимых отличий в группе «МЖП» в средне-отдаленном периоде отмечалась статистически значимо меньшая толщина межжелудочковой перегородки (в группе межжелудочковой стимуляции она не менялась, когда как в группе апикальной стимуляции возросла на 21 %), размер правого предсердия был в среднем на 15 % меньше в группе «МЖП», размеры левого предсердия были меньше в среднем на 22 % в группе «МЖП», отмечалась более высокая фракция выброса ЛЖ (в среднем — на 5 % выше), также стоит отметить, что КДО и КДР в обеих группах увеличились через 24 месяца после операции, однако, в группе «МЖП» прирост был не столь значителен — +11 % и +12 % соответственно против +18 % и +22 % в группе «верхушка ПЖ».

Спустя 24 месяца после оперативного вмешательства, в группе «МЖП» не произошло значимого увеличения количества пациентов с промежуточной фракцией выброса, однако, не смотря на оптимальную терапию увеличилось количество пациентов со сниженной фракцией выброса до 6,74 % (n=6).

В группе апикальной стимуляции произошло увеличение количества пациентов с промежуточной фракцией выброса до 17,02 % (n=16), а также произошло увеличение количества пациентов с низкой фракцией выброса до 12,77 % (n=12). В средне-отдаленном послеоперационном периоде произошло снижение ФВЛЖ в обеих исследуемых группах, однако более значимое снижение произошло в группе апикальной стимуляции.

Таким образом, результаты исследования подчеркивают важность выбора места имплантации желудочкового электрода и оставляют открытым вопрос о не-

обходимости изучения новых методик имплантации желудочкового электрода, которые сохраняют положительные стороны прежних методик, но при этом уменьшают негативные последствия, связанные с имплантацией ЭКС.

Однако, подобный метод является более сложным в исполнении, в частности, требует большего мастерства оператора, увеличивает время операции и лучевую нагрузку. Кроме того, требуется разработка новых моделей электродов и средств их доставки, а техническая сложность при позиционировании электрода может приводить к ряду осложнений в виде возможного расширения комплекса QRS, нарушения внутрижелудочковой проводимости. Технические аспекты данной процедуры были подробно описаны в работе Chen K. et al. который акцентировал внимание на том, что техника имплантации сложна и требует стандартизации (в отличие от апикального позиционирования электрода) [6]. Кроме того, некоторые авторы указали на то, что более сложное позиционирование электрода повышает риск реинтервенции. Фактор риска — высокая вариабельность строения правого желудочка. Из-за его трабекулярности может быть повышен риск дислокации электродов с пассивной фиксацией (частота реинтервенций — от 1 до 4 %) [7].

Представленные нами данные говорят о том, что выбор места установки желудочкового электрода для постоянной кардиостимуляции является предиктором изменения структурно-геометрических параметров сердца. При этом, мы получили статистически значимые отличия, которые говорят о том, что уже через 24 месяца стимуляция межжелудочковой перегородки дает преимущества в виде лучших показателей ремоделирования камер сердца.

Требуется более детальный анализ подобных показателей и их прогностической значимости в оценке рисков развития неблагоприятных сердечно-сосудистых событий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gao J, Zhang B, Zhang N, Sun M, Wang R. The electrocardiogram characteristics and pacing parameters of permanent left bundle branch pacing: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Interventional Cardiac Electrophysiology*. 2022;63:215–224. doi:10.1007/s10840-021-01000-3.
2. Sidhu BS, Gould J, Elliott MK, Mehta V, Niederer S, Rinaldi CA. Leadless Left Ventricular Endocardial Pacing and Left Bundle Branch Area Pacing for Cardiac Resynchronisation Therapy. *Arrhythmia and Electrophysiology Review*. 2021;10:45–50. doi:10.15420/aer.2020.46.
3. Huang W, Su L, Wu S, et al. A novel pacing strategy with low and stable output: pacing the left bundle branch immediately beyond the conduction block. *Canadian Journal of Cardiology*. 2017;33:1736.e1–1736.e3. doi:10.1016/j.cjca.2017.09.013.
4. Li Y, Chen K, Dai Y, et al. Left bundle branch pacing for symptomatic bradycardia: Implant success rate, safety, and pacing characteristics. *Heart Rhythm*. 2019;16:1758–1765. doi:10.1016/j.hrthm.2019.05.014.
5. Chen K, Li Y, Dai Y, et al. Comparison of electrocardiogram characteristics and pacing parameters between left bundle branch pacing and right ventricular pacing in patients receiving pacemaker therapy. *Europace*. 2019;21:673–680. doi:10.1093/europace/euy252.
6. Chen K, Li Y. How to implant left bundle branch pacing lead in routine clinical practice. *Journal of Cardiovascular Electrophysiology*. 2019;30:2569–2577. doi:10.1111/jce.14190.
7. Yu GI, Kim TH, Yu HT, et al. Left bundle branch area pacing with stylet-driven pacing leads: implantation technique. *International Journal of Arrhythmia*. 2023;24:12. doi:10.1186/s42444-023-00095-1.

© Гаулика Станислав Олегович (Stas1996-96@mail.ru); Молчанов Андрей Николаевич (amolchanov432@gmail.com);

Моргунов Денис Павлович (denismorgunov@rambler.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ФОТОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕРАПИЯ В ЛЕЧЕНИИ НЕМЫШЕЧНО-ИНВАЗИВНОГО РАКА МОЧЕВОГО ПУЗЫРЯ

PHOTODYNAMIC THERAPY IN THE TREATMENT OF NON-MUSCLE- INVASIVE BLADDER CANCER

A. Gural
E. Usynin
V. Boshchenko
A. Mustafayev
Yu. Rogovskaya

Summary. Photodynamic therapy (PDT) is a promising cancer treatment method based on the use of photosensitizers activated by light of a specific wavelength to generate cytotoxic oxygen species, leading to the selective destruction of tumor cells. This article analyzes the current state of photodynamic therapy in the context of the treatment of non-muscle-invasive bladder cancer (NMIBC). The article examines the principle of PDT and reviews clinical studies aimed at studying the efficacy and safety of PDT in NMIBC. The use of PDT for the treatment of NMIBC demonstrates promising results; further study, including the selection of photosensitizers and the identification of optimal patient groups, will allow PDT to be identified as a primary treatment option for NMIBC.

Keywords: pyelonephritis, nephrolithotripsy, antibiotic therapy, urolithiasis.

Гураль Андрей Константинович

врач высшей категории, уролог-онколог,
ОГАУЗ «Томский областной онкологический диспансер»;
ассистент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
медицинский университет»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
andy.gural@gmail.com

Усынин Евгений Анатольевич

доктор медицинских наук, заведующий отделением
общей онкологии НИИ онкологии Томского НИМЦ,
врач высшей категории, руководитель
онкоурологической группы, член правления
Российского общества онкоурологов
gusi70@list.ru

Бощенко Вячеслав Семенович

доктор медицинских наук, доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский
государственный медицинский университет»
Министерства здравоохранения
Российской Федерации, Томск
vsbosh@mail.ru

Мустафеев Али Тельман оглы

врач-уролог, ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна
ФМБА России, Видное
dr.mustafayevat@gmail.com

Роговская Юлия Викторовна

кандидат медицинских наук, врач-патологоанатом,
ОГАУЗ «Томский областной онкологический диспансер»
Yuliya.rogovskaya@gmail.com

Аннотация. Фотодинамическая терапия (ФДТ) представляет собой перспективный метод лечения рака, основанный на использовании фотосенсибилизаторов, активируемых светом определенной длины волны для генерации цитотоксических форм кислорода, приводящих к селективному разрушению опухолевых клеток. Данная статья посвящена анализу современного состояния фотодинамической терапии в контексте лечения немышечно-инвазивного рака мочевого пузыря (НМИРМП). В статье рассмотрен принцип работы ФДТ; рассмотрены клинические исследования, направленные на изучение эффективности и безопасности ФДТ при немышечно-инвазивном раке мочевого пузыря. Применение ФДТ для лечения НМИРМП демонстрирует многообещающие результаты; а дальнейшее изучение, включая выбор фотосенсибилизаторов и определение оптимальных групп пациентов позволит выделить ФДТ как основной метод лечения НМИРМП.

Ключевые слова: пиелонефрит, нефролитотрипсия, антибиотикотерапия, мочекаменная болезнь.

Несмотря на тревожную тенденцию роста заболеваемости раком мочевого пузыря (прирост за последнее десятилетие составил около 15 % [1–3]), очевидны обнадеживающие признаки прогресса в этом вопросе. Наблюдается улучшение показателей выявляемости, активно разрабатываются скрининговые программы, ориентированные на диагностику патологии на ранних стадиях. У значительной части пациентов (75–80 %) рак локализован в пределах слизистой и подслизистой оболочек, не затрагивая мышечный слой. Согласно общепринятой классификации TNM [4; 5], такие случаи классифицируются как Ta-T1 [6].

Терапия рака мочевого пузыря на ранних стадиях (Ta-T1) имеет принципиальное значение, поскольку «поверхностные» формы рака демонстрируют более высокую восприимчивость к лечению и характеризуются благоприятным прогнозом в отношении рецидивов и прогрессирования. При этом предпочтение отдается нехирургическим методам лечения, среди которых фотодинамическая терапия занимает важное место в лечении немышечно-инвазивного рака мочевого пузыря (НМИРМП). Настоящее исследование посвящено анализу современного состояния фотодинамической терапии в контексте лечения немышечно-инвазивного рака мочевого пузыря [7].

Для составления обзора использовали периодическую литературу базы данных PubMed за все время. Для поиска применяли ключевые слова «non-muscle-invasive bladder cancer; photodynamic diagnosis; photodynamic therapy». Приоритет был отдан статьям, опубликованным в рецензируемых журналах за 3–5 лет до составления обзора.

Принцип работы фотодинамической терапии

Экспериментальное исследование, проведенное в 1975 году, заложило фундамент для развития принципа фотодинамической терапии (ФДТ). В рамках экспериментальной модели на мышах, с использованием карциномы в качестве объекта исследования [8], карциноматозные образования подвергались воздействию производного гематопорфирина с последующей активацией белым светом, играющим роль сенситизатора. Облучение с экспозицией в 24 часа показало выраженное поражение опухолевых клеток, при этом жизнеспособность здоровых тканей оставалась неизменной. Наглядная эффективность представленного метода лечения послужила основанием для его дальнейшего внедрения в клиническую практику.

Тем не менее дальнейшие исследования выявили нежелательные эффекты, связанные с применением гематопорфирина, включая контрактуру мочевого пузыря, фототоксичность и фотосенсибилизацию [8]. В результа-

те в 1987 г., гематопорфирин был заменен прекурсором 5-ALA (5-аминолевулиновой кислотой).

В настоящее время 5-ALA аминолевулиновая кислота [9] является наиболее распространенным прекурсором, который будучи инертным сам по себе становится активным под воздействием светового излучения. Аминолевулиновая кислота, являясь природной аминокислотой, обладает высокой степенью онкоспецифичности. Она не обладает токсичностью и быстро выводится из организма благодаря специфическим транспортным системам. Высокая тропность 5-аминолевулиновой кислоты к уротелию обусловила ее применение в лечении рака предстательной железы и мочевого пузыря.

Фотосенсибилизатором, активирующим прекурсор в активную форму, служит лазер, излучающий свет в красном спектре. Введение прекурсора непосредственно в мочевой пузырь является относительно безопасной процедурой, поскольку препарат оказывает локальное воздействие исключительно в присутствии фотосенсибилизатора, то есть внутри мочевого пузыря. Данный подход значительно снижает потенциальную токсическую нагрузку и обеспечивает максимальную доставку препарата к цели (в сравнении с традиционной химиотерапией) (рисунок 1).

Следует подчеркнуть, что данная технология пригодна не только для терапевтических целей, но и для диагностики поверхностного рака мочевого пузыря, что является существенным преимуществом ФДТ, позволяющим эффективно вести пациентов с рецидивами после трансуретральной резекции, оценивать результативность лечения (в том числе и резекции) и при необходимости проводить лечебные мероприятия.

Для переключения между режимами «диагностики» и «лечения» достаточно лишь изменить длину волны светового излучения, что представляет собой удобное и гибкое решение.

Место фотодинамической терапии в лечении немышечно-инвазивного рака мочевого пузыря

Первые упоминания о ФДТ в лечении рака мочевого пузыря связаны с ведением пациентов с немышечно-инвазивным раком мочевого пузыря после трансуретральной резекции (ТУР). ТУР, безусловно, остается «золотым стандартом» в терапии НМИРМП, обладая рядом преимуществ: высокой точностью гистологической оценки для стратификации рисков и определения дальнейшей тактики, высоким процентом резекции опухолевых клеток (близкий к 100 %) и наибольшей радикальностью вмешательства.

Тем не менее ряд исследований [12] указывает на то, что дополнение ТУР однократной инстилляцией химиопре-

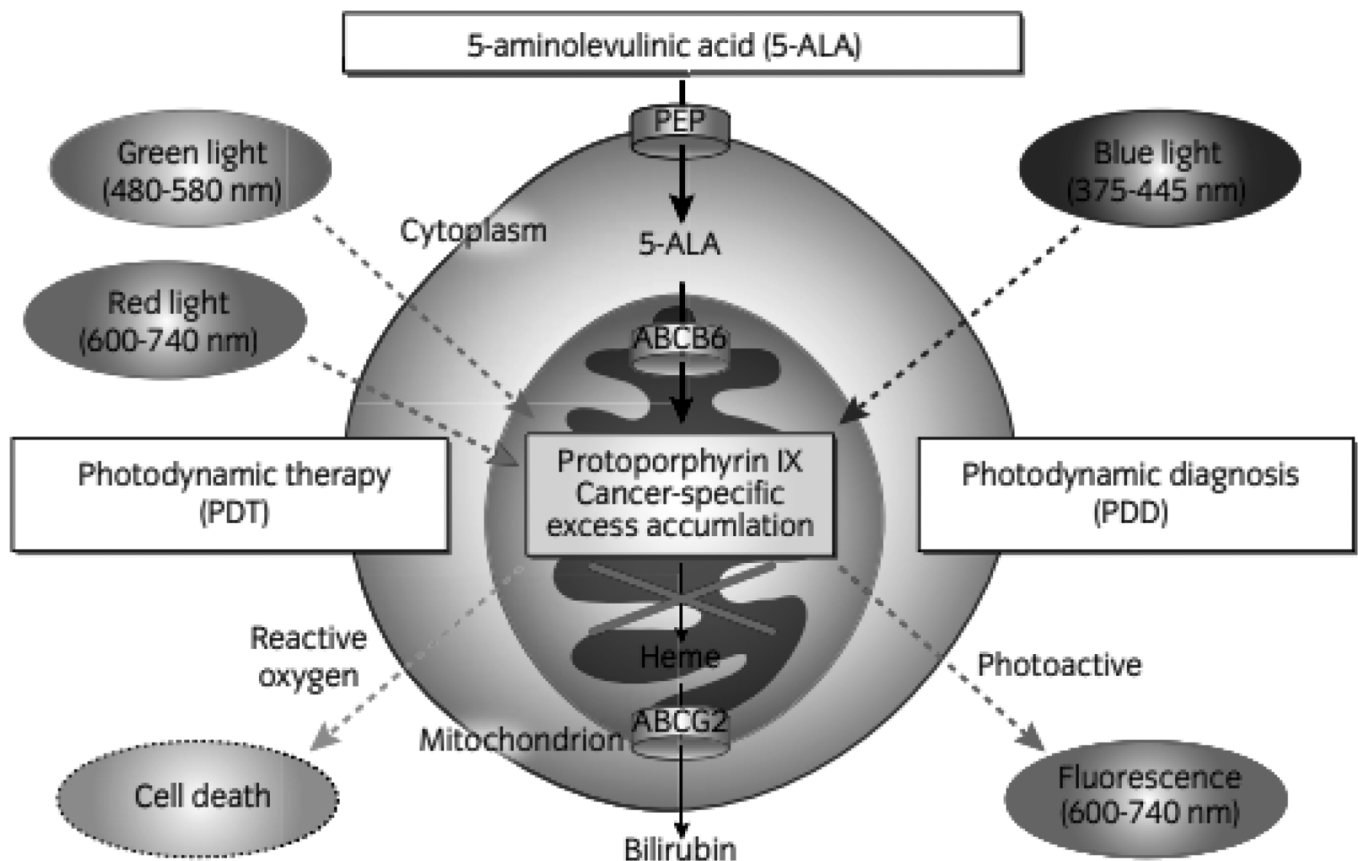


Рис. 1. Принцип фотодинамической диагностики и лечения [11]

парата, адъювантной внутрипузырной терапией или ФДТ способно увеличить период свободы от рецидива [13].

Самостоятельное применение ФДТ ограничено единичными публикациями [14]. Современные клинические рекомендации относят ФДТ ко второй линии терапии, применяя ее преимущественно при неэффективности химио- или иммунотерапии. Лишь в отдельных исследованиях ФДТ используется в качестве первой линии при рецидиве НМИРМП после ТУР. Отказ от классической ТУР пока не представляется возможным из-за отсутствия достаточно эффективных фотосенсибилизаторов, обладающих высокой селективностью и глубиной проникновения в ткань, позволяющих воздействовать на все опухолевые клетки и достигать свободы от рецидива, сопоставимой с хирургическим лечением.

Безопасность фотодинамической терапии

ФДТ зарекомендовала себя в лечении поверхностного рака мочевого пузыря, резистентного к иммунотерапии БЦЖ или ТУР [15]. При этом метод обладает потенциалом стать самостоятельным методом лечения, применяемым в качестве монотерапии.

На данном этапе недостаточно данных для определения оптимального объема опухоли, поддающегося ФДТ,

глубины проникновения фотосенсибилизатора и необходимого количества сеансов ФДТ для достижения адекватного противоопухолевого эффекта.

Одним из ключевых преимуществ ФДТ является высокая селективность воздействия на опухолевые клетки. Локальное действие фотосенсибилизатора минимизирует негативное влияние на другие органы, что делает ФДТ значительно безопаснее, чем системная химиотерапия [15].

В доступной литературе серьезные побочные эффекты встречаются редко и ограничиваются дизурическими явлениями, связанными с введением препарата через уретру (цистит, уретрит, гематурия). Описанные побочные эффекты не оказывали значимого влияния на исход лечения и успешно купировались. В ранних исследованиях отмечались явления раздражения мочевого пузыря, которые эффективно устранялись введением местного анестетика, не влияя при этом на функцию мочеиспускания.

Современное применение фотодинамической терапии с использованием 5-ALA

Впервые фотодинамическую терапию с использованием современного прекурсора (5-аминолеволиновой

кислоты) успешно испытали в 1996 г. [16]. В пилотном исследовании, включавшем небольшую группу пациентов, наблюдалась полная ремиссия у 4 пациентов, частичная — у 3, и отсутствие изменений у 3 пациентов при наблюдении в среднеотдаленном периоде. Авторы подчеркнули перспективность метода, отметив, что ФДТ с 5-ALA может быть эффективна не только при рецидивах рака после трансуретральной резекции (ТУР) или при резистентности к химиотерапии, но и в качестве первичной терапии у пациентов с начальными стадиями метаплазии.

Успешное применение 5-ALA стимулировало проведение дальнейших исследований с увеличенным числом пациентов и более длительными периодами наблюдения, преимущественно в европейских клиниках. Исследование 1 фазы, проведенное в 2002 г., оценивало эффективность ФДТ у пациентов с переходно-клеточным раком мочевого пузыря. Авторы заключили, что метод является простым и воспроизводимым. Проведение процедуры в амбулаторных условиях под местной анестезией обеспечивает адекватное обезболивание, снижает дискомфорт пациента и, как следствие, уменьшает спазм мочевого пузыря, известный как «раздраженный мочевой пузырь» — реакция на механическое раздражение и воздействие 5-ALA. Из 19 пациентов у 10 наблюдался положительный ответ на ФДТ, что указывает на необходимость использования более высоких концентраций 5-ALA (6 %) для достижения оптимального терапевтического эффекта [17].

В 2003 г. опубликованы результаты исследования 31 пациента с поверхностным раком мочевого пузыря, средний период наблюдения составил 23 месяца. У 4 из 10 пациентов, резистентных к иммунотерапии БЦЖ, была достигнута ремиссия. В общей сложности, у 16 из 31 пациента наблюдалась стойкая ремиссия, в то время как у остальных рецидив возникал в среднем через 8 месяцев [14].

В том же 2003 г. были опубликованы данные, подтверждающие безопасность, воспроизводимость и эф-

фективность ФДТ при плоскоклеточном раке in situ. Гистологическое исследование выявило эффективность ФДТ как при плоскоклеточных, так и при папиллярных опухолях, хотя в последних были обнаружены жизнеспособные раковые клетки. Метод рекомендован для лечения злокачественного плоскоклеточного рака [18].

В исследовании 2005 г. применялись повышенные концентрации 5-ALA (до 10 %) и новый прекурсор — Митомин С, а также максимально или субмаксимально допустимые дозы светового излучения, что позволило добиться более продолжительной свободы от рецидива при плоскоклеточном раке до 24 месяцев. Несмотря на увеличение концентрации прекурсора и световой нагрузки, не было отмечено существенных побочных эффектов, отличных от тех, что наблюдались при использовании низких доз. Данное исследование 1 фазы подчеркивает необходимость дальнейших многоцентровых рандомизированных исследований для подтверждения полученных результатов [19].

В исследовании 2013 г., где в качестве прекурсора использовался 6-ALA, ФДТ показала отличную эффективность против рецидивов немышечно-инвазивного рака мочевого пузыря как низкой, так и высокой степени риска [20].

В том же году было опубликовано крупное проспективное рандомизированное исследование, в котором сравнивались результаты ТУР с ТУР, дополненной ФДТ. Последняя показала лучшие результаты за счет лечебной и диагностической ценности ФДТ [21].

Таким образом, стоит отметить, что с 2020 года ФДТ рассматривается как перспективный метод лечения рака мочевого пузыря. Метод включает как диагностику (в синем спектре), так и лечение (в красном или зеленом спектре) (рисунок 2), представляя собой единый терапевтический подход. Диагностическая составляющая важна для выявления ранних признаков рака и инициации терапии на ранней стадии, что приводит к улучшению прогноза. Лечебная составляющая за последние



Рис. 2. Фотодинамическая терапия при цистоскопии

20 лет доказала свою эффективность и безопасность в качестве адъювантной терапии, способствующей увеличению периода без рецидивов после основного лечения [22].

Фотодинамическая терапия показывает значительный потенциал как метод адъювантной терапии, характеризующейся благоприятным профилем безопасности и минимальным количеством побочных эффектов. Несмотря на это, трансуретральная резекция остается «золотым стандартом» в лечении немышечно-инвазивного рака мочевого пузыря.

Разработка и внедрение новых прекурсоров способно существенно расширить возможности применения ФДТ, трансформировав ее в самостоятельный основной метод лечения онкологических заболеваний. Ключевыми аспектами, ограничивающими широкое распространение ФДТ, являются пенетрантность фотосенсибилизатора в ткани опухоли и онкоспецифичность. Решение данных проблем позволит реализовать потенциал ФДТ как основного метода лечения онкологических заболеваний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Al Hussein Al Awamlh B, Chang SS. Novel Therapies for High-Risk Non-Muscle Invasive Bladder Cancer. *Curr Oncol Rep*. 2023 Feb;25(2):83–91. doi: 10.1007/s11912-022-01350-9. Epub 2022 Dec 26. PMID: 36571706; PMCID: PMC9791638.
2. Kukreja JB. Non-muscle-invasive Bladder Cancer: Side-by-Side Guideline Comparison. *Eur Urol Focus*. 2023 Nov;9(6):954–956. doi: 10.1016/j.euf.2023.05.004. Epub 2023 Jun 10. PMID: 37308343.
3. Claps F, Pavan N, Ongaro L, Tierno D, Grassi G, Trombetta C, Tulone G, Simonato A, Bartoletti R, Mertens LS, van Rhijn BWG, Mir MC, Scaggiante B. BCG-Unresponsive Non-Muscle-Invasive Bladder Cancer: Current Treatment Landscape and Novel Emerging Molecular Targets. *Int J Mol Sci*. 2023 Aug 9;24(16):12596. doi: 10.3390/ijms241612596. PMID: 37628785; PMCID: PMC10454200.
4. Heer R, Lewis R, Duncan A, Penegar S, Vadeloo T, Clark E, Yu G, Mariappan P, Cresswell J, McGrath J, N'Dow J, Nabi G, Mostafid H, Kelly J, Ramsay C, Lazarowicz H, Allan A, Breckons M, Campbell K, Campbell L, Feber A, McDonald A, Norrie J, Orozco-Leal G, Rice S, Tandogdu Z, Taylor E, Wilson L, Vale L, MacLennan G, Hall E. Photodynamic versus white-light-guided resection of first-diagnosis non-muscle-invasive bladder cancer: PHOTO RCT. *Health Technol Assess*. 2022 Oct;26(40):1–144. doi: 10.3310/PLPU1526. PMID: 36300825; PMCID: PMC9639219.
5. Russo GI, Sholkapper TN, Cocci A, Broggi G, Caltabiano R, Smith AB, Lotan Y, Morgia G, Kamat AM, Witjes JA, Daneshmand S, Desai MM, Gill IS, Cacciamani GE. Performance of Narrow Band Imaging (NBI) and Photodynamic Diagnosis (PDD) Fluorescence Imaging Compared to White Light Cystoscopy (WLC) in Detecting Non-Muscle Invasive Bladder Cancer: A Systematic Review and Lesion-Level Diagnostic Meta-Analysis. *Cancers (Basel)*. 2021 Aug 30;13(17):4378. doi: 10.3390/cancers13174378. PMID: 34503188; PMCID: PMC8431313.
6. Heer R, Lewis R, Vadeloo T, Yu G, Mariappan P, Cresswell J, McGrath J, Nabi G, Mostafid H, Lazarowicz H, Kelly J, Duncan A, Penegar S, Breckons M, Wilson L, Clark E, Feber A, Orozco-Leal G, Tandogdu Z, Taylor E, N'Dow J, Norrie J, Ramsay C, Rice S, Vale L, MacLennan G, Hall E. A Randomized Trial of PHOTodynamic Surgery in Non-Muscle-Invasive Bladder Cancer. *NEJM Evid*. 2022 Oct;1(10):EVIDoa2200092. doi: 10.1056/EVIDoa2200092. Epub 2022 Sep 2. PMID: 38319866.
7. Li H, Long G, Tian J. Efficacy and safety of photodynamic therapy for non-muscle-invasive bladder cancer: a systematic review and meta-analysis. *Front Oncol*. 2023 Oct 4;13:1255632. doi: 10.3389/fonc.2023.1255632. PMID: 37860180; PMCID: PMC10584312.
8. Kubrak T, Karakuła M, Czap M, Kawczyk-Krupka A, Aebischer D. Advances in Management of Bladder Cancer-The Role of Photodynamic Therapy. *Molecules*. 2022 Jan 23;27(3):731. doi: 10.3390/molecules27030731. PMID: 35163996; PMCID: PMC8838614.
9. Miyake M, Nishimura N, Fujii T, Fujimoto K. Recent advancements in the diagnosis and treatment of non-muscle invasive bladder cancer: Evidence update of surgical concept, risk stratification, and BCG-treated disease. *Int J Urol*. 2023 Nov;30(11):944–957. doi: 10.1111/iju.15263. Epub 2023 Jul 31. PMID: 37522629.
10. Kelly JF, Snell ME, Berenbaum MC. Photodynamic destruction of human bladder carcinoma. *Br J Cancer*. 1975 Feb;31(2):237–44. doi: 10.1038/bjc.1975.30. PMID: 1164470; PMCID: PMC2009375.
11. Naselli A, Pirola GM. Editorial Comment from Dr Naselli and Dr Pirola to Bladder cancer prospective cohort study on high-risk non-muscle invasive bladder cancer after photodynamic diagnosis-assisted transurethral resection of the bladder tumor (BRIGHT study). *Int J Urol*. 2022 Jul;29(7):638–639. doi: 10.1111/iju.14883. Epub 2022 Mar 31. PMID: 35362114.
12. Galsky et al. Atezolizumab With or Without Chemotherapy in Metastatic Urothelial Cancer (IMvigor130): A Multicentre, Randomised, Placebo-Controlled Phase 3 Trial. *Lancet* 2020 May 16; 395(10236):1547–1557. doi: 10.1016/S0140-6736(20)30230-0.
13. Muzij L et al. Low-level laser therapy for chemotherapy-induced peripheral neuropathy. *Journal of Clinical Oncology* 30, no. 15_suppl (May 2012) 9019–9019 54)
14. Berger, A. P., Steiner, H., Stenzl, A., Akkad, T., Bartsch, G., & Holtl, L. (2003). Photodynamic therapy with intravesical instillation of 5-aminolevulinic acid for patients with recurrent superficial bladder cancer: a single-center study. *Urology*, 61(2), 338–341. doi:10.1016/s0090-4295(02)02123-4
15. Miyake M, Nishimura N, Nakahama T, Nishimoto K, Oyama M, Matsushita Y, Miyake H, Fukuhara H, Inoue K, Kobayashi K, Matsumoto H, Matsuyama H, Fujii T, Hirao Y, Fujimoto K. Additional oncological benefit of photodynamic diagnosis with blue light cystoscopy in transurethral resection for primary non-muscle-invasive bladder cancer: A comparative study from experienced institutes. *BJUI Compass*. 2023 Jan 13;4(3):305–313. doi: 10.1002/bco2.215. PMID: 37025476; PMCID: PMC10071077.
16. Kobayashi K, Matsuyama H, Kawai T, Ikeda A, Miyake M, Nishimoto K, Matsushita Y, Komura K, Abe T, Kume H, Nishiyama H, Fujimoto K, Oyama M, Miyake H, Inoue K, Mitsui T, Kawakita M, Ohyama C, Mizokami A, Kuroiwa H. Bladder cancer prospective cohort study on high-risk non-muscle invasive bladder cancer after photodynamic diagnosis-assisted transurethral resection of the bladder tumor (BRIGHT study). *Int J Urol*. 2022 Jul;29(7):632–638. doi: 10.1111/iju.14854. Epub 2022 Mar 15. PMID: 35293022; PMCID: PMC9542202.

17. Shackley DC, Briggs C, Gilhooley A et al. Photodynamic therapy for superficial bladder cancer under local anaesthetic. *BJU Int.* 2002; 89: 665–70.
18. Waidelich R, Beyer W, Knuchel R et al. Whole bladder photodynamic therapy with 5-aminolevulinic acid using a white light source. *Urology* 2003; 61: 332–7.]
19. Skyrme RJ, French AS, Allman R, Mason MD, Matthews PN. A phase-1 study of sequential mitomycin C and 5-aminolaevulinic acid-mediated photodynamic therapy in recurrent superficial bladder carcinoma. *BJU Int.* 2005; 95: 1206–10.
20. Bader MJ, Stepp H, Beyer W et al. Photodynamic therapy of bladder cancer: a phase I study using hexaminolevulinate (HAL). *Urol. Oncol.* 2013; 31: 1178–83.
21. O'Brien T, Ray E, Chatterton K, Khan MS, Chandra A, Thomas K. Prospective randomized trial of hexylaminolevulinate photodynamic-assisted transurethral resection of bladder tumour (TURBT) plus single-shot intravesical mitomycin C vs conventional white-light TURBT plus mitomycin C in newly presenting non-muscle-invasive bladder cancer. *BJU Int.* 2013 Dec;112(8):1096–104. doi: 10.1111/bju.12355. PMID: 24053153.]
22. de Angelis M, Briganti A, Montorsi F, Moschini M. Re: A Randomized Trial of PHOTodynamic Surgery in Non-muscle-invasive Bladder Cancer. *Eur Urol.* 2023 May;83(5):477–478. doi: 10.1016/j.eururo.2023.02.001. Epub 2023 Feb 16. PMID: 36806362.

© Гураль Андрей Константинович (andy.gural@gmail.com); Усынин Евгений Анатольевич (gusi70@list.ru);
Бощенко Вячеслав Семенович (vsbosh@mail.ru); Мустафаев Али Тельман оглы (dr.mustafayevat@gmail.com);

Роговская Юлия Викторовна (Yuliya.rogovskaya@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВОЗМОЖНОСТИ ПОЗИТРОННО-ЭМИССИОННОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОТВЕТА РАКА ПРЯМОЙ КИШКИ НА ХИМИОЛУЧЕВУЮ ТЕРАПИЮ

EFFICIENCY OF POSITRON EMISSION TOMOGRAPHY IN PREDICTION OF RESPONSE AFTER CHEMORADIO THERAPY FOR RECTAL CANCER

**O. Kaganov
S. Frolov
N. Blinov
N. Okulevich**

Summary. Personification of approaches to the treatment of patients with rectal cancer requires precise staging and identification of unfavorable prognosis factors. The choice of the most effective treatment protocol directly depends on the response of the tumor to chemoradiotherapy. The purpose of this study is to evaluate the ability of №¹⁸F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography combined with computed tomography to predict tumor response to neoadjuvant treatment.

Materials and methods. The study included 32 patients diagnosed with locally advanced rectal cancer. All patients were planned to undergo combined treatment: neoadjuvant chemoradiation therapy, as well as surgical intervention, total mesorectumectomy after 10–12 weeks. Patients underwent №¹⁸F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography combined with computed tomography at the stage of staging, as well as 8 weeks after completion of chemoradiotherapy. Decrease of standardized uptake values before and after therapy was assessed. The correlation of the obtained data with the degree of tumor response to chemoradiation according to the Mandard scale was studied.

Results. Patients with a good response to neoadjuvant treatment — 6 patients (Grade 1–2 on the Mandard scale); patients with a poor response — 25 patients (Grade 3–4 on the Mandard scale). It was shown that before and after neoadjuvant treatment, the mean standardized uptake values was 15.2 and 5.2, respectively ($p < 0.001$). It was demonstrated that a reduction in standardized uptake values after chemoradiotherapy by more than 72 % could help identify patients who are more likely to respond to treatment with a sensitivity of 80.2 %, specificity of 78.4 %, and accuracy of 77 %. Thus, №¹⁸F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography can be used by oncoboard to assess the effect of neoadjuvant treatment when making strategic decisions for patients with rectal cancer.

Keywords: rectal cancer, №¹⁸F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography, complete response, chemoradiotherapy.

Каганов Олег Игоревич

Доктор медицинских наук, профессор, Самарский
государственный медицинский университет;
заместитель главного врача ГБУЗ Самарский
областной клинический диспансер по научной работе
okaganov@yandex.ru

Фролов Сергей Александрович

Кандидат медицинских наук, заведующий
онкологическим отделением (абдоминальное №1),
Самарский областной клинический онкологический
диспансер, врач-онколог
frol_ser@mail.ru

Блинов Никита Вячеславович

врач-онколог онкологического отделения
(абдоминальная онкология) №1 Самарский областной
клинический онкологический диспансер
blinovnv@samaraonko.ru

Окулевич Никита Борисович

врач-онколог онкологического отделения
(абдоминальная онкология) №1 Самарский областной
клинический онкологический диспансер
OkulevichNB@samaraonko.ru

Аннотация. Индивидуализация подходов к лечению больных раком прямой кишки, требует тщательного стадирования, выявления неблагоприятных факторов прогноза. Выбор наиболее эффективного протокола лечения напрямую зависит от ответа опухоли на химиолучевую терапию. Цель настоящего исследования: оценить возможности позитронно-эмиссионной томографии с №¹⁸F-фтордезоксиглюкозой, совмещенной с компьютерной томографией, для прогнозирования ответа опухоли на неoadъювантное лечение.

Материалы и методы. В исследование было включено 32 пациента с диагнозом местно-распространенного рака прямой кишки. Всем пациентам планировалось проведение комбинированного лечения: проведение неoadъювантной химиолучевой терапии, а также выполнение через 10–12 недель хирургического вмешательства в объеме тотальной мезоректумэктомии. Пациентам выполнялась позитронно-эмиссионная томография с №¹⁸F-фтордезоксиглюкозой, совмещенная с компьютерной томографией, на этапе стадирования, а также через 8 недель после завершения химиолучевой терапии. Оценивалось изменение стандартизованного уровня захвата радиофармпрепарата до и после проведения химиолучевой терапии. Изучена корреляция полученных данных со степенью ответа опухоли на терапию по шкале Mandard.

Результаты. Пациенты с хорошим ответом химиолучевую терапию — 6 больных (Grade 1–2 по шкале Mandard); пациенты с плохим ответом — 25 больных (Grade 3–4 по шкале Mandard). Показано, что до и после проведения неoadъювантного лечения среднее значение стандартизованного уровня захвата составило 15,2 и 5,2 соответственно ($p < 0,001$). Продemonстрировано, что снижение стандартизованного уровня захвата после химиолучевой терапии более чем на 72 %, может помочь идентифициро-



Введение

Современные протоколы неоадъювантной химиолучевой терапии по поводу местно-распространенного рака прямой кишки, позволяют обеспечить локальный контроль за болезнью, увеличить шансы на выполнение сфинктеросохраняющего хирургического вмешательства, улучшить общую выживаемость [1,2]. По данным различных авторов полный патоморфологический ответ (ypT0) может быть достигнут благодаря применению химиолучевой терапии у 12–30 % больных [3,4]. Персонифицированное определение наиболее эффективной лечебной стратегии мультидисциплинарным консилиумом требует тщательного обследования и точного стадирования опухоли. Актуальные клинические рекомендации предполагают выполнение МРТ малого таза, КТ органов грудной клетки и брюшной полости, при необходимости трансректального ультразвукового исследования, что позволяет оценить глубину инвазии опухоли, состояние регионарного лимфоколлектора, наличие отдаленных метастазов. Тем не менее, использование традиционных методов медицинской визуализации при оценке ответа опухоли на проведение неоадъювантного лечения не всегда позволяет получить однозначные, надежные данные, необходимые для принятия адекватного стратегического решения [5,6]. Развитие выраженного фиброза и отека в опухолевой ткани вследствие лучевого воздействия может расцениваться как наличие остаточной опухоли, приводить к недооценке эффекта неоадъювантного лечения. Истинный же патоморфологический ответ опухоли на лечение оценивается только при гистологическом исследовании удаленного препарата, основанном на изучении объема опухоли, замещенной фиброзной тканью [7,8]. Поэтому важно иметь в арсенале неинвазивную диагностическую технологию, позволяющую не только получить изображение опухоли и её взаимоотношения с анатомическими структурами, но и изучить жизнеспособность опухолевых клеток. Такие возможности предоставляет позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) с ^{18}F -фтордезоксиглюкозой, позволяющая визуализировать и измерить метаболизм глюкозы опухолевыми клетками, что напрямую коррелирует с их жизнеспособностью. Совмещение технологий ядерной медицины с компью-

терной томографией на современных гибридных сканерах позволяет совмещать анатомическое изображение с функциональными (ПЭТ/КТ). В работах Kubota K. было показано, что изменения метаболизма глюкозы опухолевыми клетками, обусловленные противоопухолевым лечением, происходят быстрее, чем изменение размера опухоли, регистрируемые традиционными методами исследования [9]. В настоящей работе авторами изучается эффективность использования ПЭТ/КТ для оценки ответа опухоли на химиолучевую терапию у больных местнораспространенным раком прямой кишки.

Ключевые слова: рак прямой кишки, позитронно-эмиссионная томография совмещенная с компьютерной томографией, полный патоморфологический ответ, химиолучевая терапия.

терной томографией на современных гибридных сканерах позволяет совмещать анатомическое изображение с функциональными (ПЭТ/КТ). В работах Kubota K. было показано, что изменения метаболизма глюкозы опухолевыми клетками, обусловленные противоопухолевым лечением, происходят быстрее, чем изменение размера опухоли, регистрируемые традиционными методами исследования [9]. В настоящей работе авторами изучается эффективность использования ПЭТ/КТ для оценки ответа опухоли на химиолучевую терапию у больных местнораспространенным раком прямой кишки.

Материал и методы исследования

Исследование было выполнено на базе Самарского областного онкологического диспансера в 2020–2023 годах. Всего было включено 32 пациента, мужчин было 20, женщин 12. Средний возраст пациентов составил 62 года (35–78 лет). IIa стадия заболевания была диагностирована у 15 пациентов, IIIa стадия — у 10 пациентов, IIIb — 7 пациентов. Опухоль располагалась в средне-ампулярном отделе прямой кишки у 20 пациентов, у 12 больных — в нижеампулярном отделе прямой кишки. У всех больных была диагностирована аденокарцинома прямой кишки. Low grade опухоли были диагностированы у 22 пациентов, High grade — у 8 больных, Gx — у 2 пациентов. Все пациенты подписали добровольное информированное согласие на лечение. Обследование пациентов включало пальцевое ректальное исследование, видеокколоноскопию с биопсией, УЗИ брюшной полости и/или КТ брюшной полости, МРТ малого таза, рентгенографию легких/ КТ органов грудной полости. Всем пациентам была выполнена ПЭТ/КТ с ^{18}F -фтордезоксиглюкозой. Оценка опухолевого ответа на химиолучевую терапию выполнялась на 8 неделе после завершения неоадъювантного лечения и включала пальцевое ректальное исследование, ректороманоскопию, МРТ малого таза, УЗИ брюшной полости, ПЭТ/КТ с ^{18}F -фтордезоксиглюкозой.

ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ выполнялось по методике «всё тело» от орбитально-миаальной линии до верхней трети бедра, через 60 минут после введения ^{18}F -фтордезоксиглюкозы (5 МБк/кг массы тела), на сканере производства компании GE Healthcare. Пациент го-

лодал на менее 8 часов до исследования, перед введением радиофармпрепарата контролировался уровень глюкозы крови. Синхронно выполнялась компьютерная томография, шаг снимков 5 мм, с последующей реконструкцией 1,25 мм, при 120 киловольт, и от 60 до 180 мА в зависимости от толщины тканей в зоне сканирования. Медицинские изображения оценивались опытным рентгенологом. Опухолевые очаги идентифицировались как зоны патологического накопления радиофармпрепарата, с выделением областей интереса (ROI) диаметром не более 1,5 см.

Для оценки эффекта от неоадьювантного лечения, при выполнении ПЭТ особое внимание уделялось выделению ROI в тех же позициях что и при исходном исследовании. Оценка уровня SUV при исходном исследовании (SUV1) и при повторном сканировании (SUV2), позволяет оценить изменение данного показателя, что должно коррелировать со степенью ответа опухоли на терапию. Для объективизации оценки ответа опухоли на лечение предлагается индекс ответа (ИО), рассчитываемый как $ИО = [(SUV1 - SUV2) / SUV1] \times 100$.

Лучевая терапия проводилась на линейном ускорителе компании Siemens, по технологии конформного облучения. Всем пациентам проводился длинный курс лучевой терапии СОД 50–54 Гр. на опухоль, 44 Гр на зоны регионарного метастазирования, РОД 1,8–2 Гр. Лечение проводилось ежедневно, пять дней в неделю. Симультированная химиотерапия проводилась на протяжении всего курса лучевой терапии, включала внутривенную непрерывную инфузию 5-фторурацила в дозе 225 мг/мл.

Всем пациентам было выполнено хирургическое вмешательство в сроки 10–12 недель после завершения лучевой терапии. Операции выполнялись опытными хирургами онкологами, с соблюдением принципов онкологического радикализма, в объеме тотальной мезоректумэктомии.

Гистологическое исследование удаленного препарата выполнялось по методике Ph. Quirke. Оценка степени регрессии опухоли выполнялось в соответствии со шкалой Mandard. Опухоли TRG1-2 расценивались как ответившие на лечение, TRG3-5 — как не ответившие на лечение опухоли.

Статистический анализ был выполнен с помощью программного обеспечения SPSS ver.10 для персонального компьютера. Изучались средние величины, медиана, стандартное отклонение, чувствительность и специфичность методики, анализ ROC кривых.

Результаты

В исследование было включено 32 пациента. 1 пациент выбыл из исследования в период ожидания хирургического

лечения по немедицинским причинам. 31 пациенту было выполнено ПЭТ/КТ до и после химиолучевой терапии, все они были прооперированы. Все пациенты получили запланированный длинный курс лучевой терапии. 27 пациентов получили химиотерапию в стандартной дозировке 5-фторурацила. 5 пациентам из-за сопутствующей патологии была редуцирована доза химиопрепарата. Средняя время между завершением лучевой терапии и хирургическим вмешательством составило 11 недель. 5 больным была выполнена брюшно-промежностная экстирпация прямой кишки, 27 пациентам — сфинктеросохраняющие вмешательства. У 30 пациентов хирургическое вмешательство было выполнено в объеме R0, у одного пациента — R1. 15 пациентам использовался лапароскопический доступ при выполнении операции.

При аудите удаленного препарата, было показано, что понижение стадии заболевания по TNM — у 19 пациентов (61,2 %), отсутствие изменения стадии заболевания — у 12 пациентов (38,8 %). При этом стадия урТ0N0 была диагностирована у 4 пациентов.

При оценке лучевого патоморфоза по шкале Mandard показано, что полный патоморфологический ответ TRG1 был констатирован у 4 пациентов (13 %), у 2 пациентов — TRG2 (6,5 %), TRG3 был выявлен у 15 пациентов (48,3 %), у 10 больных — TRG4 (32,2 %).

При изучении интенсивности накопления радиофармпрепарата при ПЭТ, было показано, что до проведения неоадьювантного лечения SUV1 составляло от 3,6 до 42,3 ($15,2 \pm 7,6$; медиана 16,2). После завершения химиолучевого лечения SUV2 составило от 0,5 до 16,2 ($5,2 \pm 2,9$; медиана 4,6), что оказалось существенно ниже предыдущего показателя ($p < 0,001$). Среднее значение индекса ответа (ИО) опухоли на лечение составило 64,2.

Для оценки эффективности исследуемого метода для прогнозирования ответа опухоли на лечение исследуемая группа больных была разделена на две подгруппы: первая — пациенты с хорошим ответом на лечение — 6 больных, постлучевой патоморфоз у которых по шкале Mandard составил Grade1-Grade2; вторая — пациенты с плохим ответом на терапию — 25 больных, постлучевой патоморфоз у которых по шкале Mandard составил Grade3-Grade4.

Интересно отметить, что среднее значение SUV1 у пациентов первой подгруппы оказалось немного выше, чем у больных второй подгруппы (18,6 и 15 соответственно, $p = 0,13$). Среднее же значение SUV2 больных, ответивших на лечение, оказалось статистически значимо ниже, чем у больных второй подгруппы (3,8 и 7,1 соответственно, $p = 0,001$). Показательно, что среднее значение индекса ответа опухоли на лечение у пациентов

первой подгруппы составил 76,3, тогда как у пациентов второй подгруппы — 45,3 ($p < 0,001$).

Анализ ROC кривых показал, что ИО может быть эффективным предиктором хорошего ответа на терапию, оцененного по критериям Mandard. Продemonстрировано, что снижение уровня SUV после химиолучевой терапии более чем на 72 %, может помочь идентифицировать больных, которые вероятнее ответят на лечение с чувствительностью 80,2 %, специфичностью 78,42 %, точностью 77 %.

Обсуждение

Стандартным подходом в лечении местно-распространенного рака прямой кишки является комбинированное лечение: неоадьювантная химиолучевая терапия с последующим выполнением тотальной мезоректумэктомии. По данным различных исследователей до 30 % больных могут рассчитывать на полный ответ опухоли на химиолучевую терапию [10]. У больных, продемонстрировавших полный патоморфологический ответ, ожидаются благоприятные отдаленные результаты, независимо от исходной стадии заболевания [10–12]. Работами Habr-Nama из Бразилии показано, что у таких пациентов возможно реализовать подход «наблюдай и жди», и у отобранной группы больных избежать выполнения хирургического вмешательства [13–15]. Данная опция особенно актуальна для пациентов с дистальной локализацией опухоли, для которых не представляется возможным сохранить сфинктер, а риск формирования постоянной стомы крайне велик. Очевидно, что подобный органосберегающий подход связан с определенными рисками и требует тщательной селекции пациентов. Выполнение компьютерной томографии, ректоскопии, магнитно-резонансной томографии малого таза, трансректальное УЗИ не всегда могут дать все необходимые данные для оценки ответа опухоли на проведенную терапию. В этой связи полезным могут быть методы «функциональной» визуализации, которые позволяют запечатлеть микроструктурные и метаболические изменения в опухолевой ткани вследствие химиолучевого воздействия, до того как произойдут морфологические изменения тканей. Микроструктурные изменения

в тканях могут быть визуализированы на диффузионно-взвешенных изображениях при МРТ. Данная неинвазивная технология фиксирует изменения в диффузии внеклеточной и внутриклеточной жидкости в тканях. Метаболические же изменения в тканях могут быть детектированы при ПЭТ/КТ, путем оценки интенсивности накопления радиофармпрепарата опухолевыми клетками. Показано, что снижения метаболизма глюкозы в опухоли коррелирует с ответом опухоли на проведенное лечение. Учитывая высокий уровень ответственности, лежащей на мультидисциплинарной команде, принимающей решение о наблюдательной и выжидательной тактике ведения больного, использование различных инструментов для подтверждения полного ответа на ХЛТ представляется разумным и полезным. В данном исследовании изучается возможность использования ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ для прогнозирования полного ответа рака прямой кишки на проведение химиолучевой терапии. Результаты нашего исследования продемонстрировано, что снижение уровня накопления ^{18}F -ФДГ более чем на 72 % после проведения химиолучевой терапии может с чувствительностью 80,2 %, специфичностью 78,42 % прогнозировать хороший ответ опухоли на неоадьювантное лечение. В случае получения данных о плохом ответе опухоли на неоадьювантное лечение может быть скорректирована стратегия ведения больного: интенсификация системного компонента в лечении больного, добавления таргетных препаратов и т.д. В последних публикациях по данной проблеме, высказывается аргументированное предположение, что вероятность получения полного ответа на ХЛТ продолжает увеличиваться при наблюдении за больным в течении более чем 8–10 недель [16]. Поэтому оправданным могло бы быть дальнейшее изучение данного вопроса на большем клиническом материале, в более поздние сроки после завершения неоадьювантного лечения.

Протокол исследования был одобрен локальным этическим комитетом 10.02.2023 (Протокол №12)

Авторы получили письменное согласие законных представителей пациента на публикацию медицинских данных и фотографий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Valentini V., Coco C., Picciocchi A., et al. Does downstaging predict improved outcome after preoperative chemoradiation for extraperitoneal locally advanced rectal cancer? A long-term analysis of 165 patients // *International Journal of Radiation Oncology*Biophysics*. 2002. Vol. 53, № 3. P. 664–674. doi:10.1016/S0360-3016(02)02764-5
2. Mohiuddin M., Hayne M., Regine W.F., et al. Prognostic significance of postchemoradiation stage following preoperative chemotherapy and radiation for advanced/recurrent rectal cancers // *International Journal of Radiation Oncology*Biophysics*. 2000. Vol. 48, № 4. P. 1075–1080. doi:10.1016/S0360-3016(00)00732-X
3. Calvo Manuel F.A., Del Pie R.C., Espn M.G., et al. Ano-rectal sphincter preservation following preoperative chemoradiation in cT3–4Nx rectal cancer: influence of tumor distance and downstaging // *Rev Oncol*. 2002. Vol. 4, № 3. P. 146–153. doi:10.1007/BF02732344
4. Gyrard J.-P., Chapet O., Nemoz C., et al. Preoperative Concurrent Chemoradiotherapy in Locally Advanced Rectal Cancer With High-Dose Radiation and Oxaliplatin-Containing Regimen: The Lyon R0–04 Phase II Trial // *JCO*. 2003. Vol. 21, № 6. P. 1119–1124. doi:10.1200/JCO.2003.10.045

5. Hoffmann K.-T., Rau B., Wust P., et al. Restaging of Locally Advanced Carcinoma of the Rectum with MR Imaging after Preoperative Radio-Chemotherapy plus Regional Hyperthermia // *Strahlentherapie und Onkologie*. 2002. Vol. 178, № 7. P. 386–392. doi:10.1007/s00066-002-0938-3
6. Rau B., Hӧrnerbein M., Barth C., et al. Accuracy of endorectal ultrasound after preoperative radiochemotherapy in locally advanced rectal cancer // *Surg Endosc*. 1999. Vol. 13, № 10. P. 980–984. doi:10.1007/s004649901151
7. Mandard A.-M., Dalibard F., Mandard J.-C., et al. Pathologic assessment of tumor regression after preoperative chemoradiotherapy of esophageal carcinoma. Clinicopathologic correlations // *Cancer*. 1994. Vol. 73, № 11. P. 2680–2686. doi:10.1002/1097-0142(19940601)73:11<2680::AID-CNCR2820731105>3.0.CO;2-C
8. Vecchio F.M., Valentini V., Minsky B.D., et al. The relationship of pathologic tumor regression grade (TRG) and outcomes after preoperative therapy in rectal cancer // *International Journal of Radiation Oncology*Biophysics*. 2005. Vol. 62, № 3. P. 752–760. doi:10.1016/j.ijrobp.2004.11.017
9. Kubota K. From tumor biology to clinical PET: A review of positron emission tomography (PET) in oncology // *Ann Nucl Med*. 2001. Vol. 15, № 6. P. 471–486. doi:10.1007/BF02988499
10. Maas M., Nelemans P.J., Valentini V., et al. Long-term outcome in patients with a pathological complete response after chemoradiation for rectal cancer: a pooled analysis of individual patient data // *The Lancet Oncology*. 2010. Vol. 11, № 9. P. 835–844. doi:10.1016/S1470-2045(10)70172-8
11. Valentini V., Coco C., Cellini N., et al. Ten years of preoperative chemoradiation for extraperitoneal T3 rectal cancer: acute toxicity, tumor response, and sphincter preservation in three consecutive studies // *International Journal of Radiation Oncology*Biophysics*. 2001. Vol. 51, № 2. P. 371–383. doi:10.1016/S0360-3016(01)01618-2
12. Habr-Gama A., Perez R.O., Nadalin W., et al. Operative Versus Nonoperative Treatment for Stage 0 Distal Rectal Cancer Following Chemoradiation Therapy: Long-term Results // *Annals of Surgery*. 2004. Vol. 240, № 4. P. 711–718. doi:10.1097/01.sla.0000141194.27992.32
13. Maas M., Beets-Tan R.G.H., Lambregts D.M.J., et al. Wait-and-See Policy for Clinical Complete Responders After Chemoradiation for Rectal Cancer // *JCO*. 2011. Vol. 29, № 35. P. 4633–4640. doi:10.1200/JCO.2011.37.7176
14. Dalton R.S.J., Velineni R., Osborne M.E., et al. A single-centre experience of chemoradiotherapy for rectal cancer: is there potential for nonoperative management? // *Colorectal Disease*. 2012. Vol. 14, № 5. P. 567–571. doi:10.1111/j.1463-1318.2011.02752.x
15. Tulchinsky H., Shmueli E., Figer A., et al. An Interval >7 Weeks between Neoadjuvant Therapy and Surgery Improves Pathologic Complete Response and Disease-Free Survival in Patients with Locally Advanced Rectal Cancer // *Ann Surg Oncol*. 2008. Vol. 15, № 10. P. 2661–2667. doi:10.1245/s10434-008-9892-3
16. Wolthuis A.M., Penninckx F., Haustermans K., et al. Impact of Interval between Neoadjuvant Chemoradiotherapy and TME for Locally Advanced Rectal Cancer on Pathologic Response and Oncologic Outcome // *Ann Surg Oncol*. 2012. Vol. 19, № 9. P. 2833–2841. doi:10.1245/s10434-012-2327-1

© Каганов Олег Игоревич (okaganov@yandex.ru); Фролов Сергей Александрович (frol_ser@mail.ru);
Блинов Никита Вячеславович (blinovnv@samaraonko.ru); Окулевич Никита Борисович (OkulevichNB@samaraonko.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОПЫТ ПАЦИЕНТОК ПРИ ГИНЕКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕДУРАХ: ВОСПРИЯТИЕ БОЛИ И РОЛЬ АНЕСТЕЗИИ

WOMEN'S EXPERIENCE WITH GYNECOLOGICAL PROCEDURES: PAIN PERCEPTION AND THE ROLE OF ANESTHESIA

**M. Kardanova
L. Idrisova
A. Kardanova
Z. Zhambekova
A. Tlupova
N. Guseinova**

Summary. Routine gynecological procedures including pelvic exams, hysteroscopies, and IUD insertions are often regarded as minimally invasive and low in discomfort. However, emerging patient-reported data suggest otherwise, revealing significant levels of procedural pain and unmet needs for pain management. This study employed the Patient-Centered Gynecological Experience Assessment (PCGEA), a structured survey completed by 227 women, to evaluate pain experiences, anesthesia use, and preferences across nine common gynecological procedures. Results showed that procedures involving intrauterine access, such as endometrial ablation (mean pain score: 7.9/10), endometrial sampling (~7.5/10), and hysteroscopy (~7.2/10), were associated with the highest pain levels. Even traditionally low-pain procedures like the speculum exam led 63 % of respondents to wish anesthesia had been offered. Across all procedures performed without anesthesia, 61 % of participants expressed a desire for it. The study also revealed a significant gap between clinical assumptions and patient experiences, highlighting widespread underestimation of procedural pain. These findings underscore the ethical and clinical need to shift toward trauma-informed, patient-centered approaches that incorporate personalized pain management strategies in routine gynecological care.

Keywords: patient-centered care, Pain management, Gynecological procedures.

Карданова Мадина Хабиловна

Кандидат медицинских наук,
Кабардино-Балкарский Государственный Университет
madina.kardanova@icloud.com

Идрисова Лилия Султановна

Кандидат медицинских наук, Пятигорский медико-фармацевтический институт — филиал Федерального Государственного Бюджетного Образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский Государственный медицинский университет»
Министерства Здравоохранения Российской Федерации
dr.idrisova11@yandex.ru

Карданова Айдана Зауровна

Кабардино-Балкарский государственный университет
aidanakardanova@gmail.com

Джамбекова Залина Магомедовна

Кабардино-Балкарский Государственный Университет
zalina.j@mail.com

Тлупова Алина Анзоровна

Кабардино-Балкарский Государственный Университет
talina2101@icloud.com

Гусейнова Нурия Рамизовна

Кабардино-Балкарский государственный университет
nuriiya17@gmail.com

Аннотация. Рутинные гинекологические вмешательства такие как влагалищное исследование с использованием зеркал, гистероскопия и установка внутриматочной спирали традиционно рассматриваются как малоинвазивные процедуры, сопровождающиеся минимальным дискомфортом. Однако данные, основанные на опросах самих пациенток, указывают на обратное: значительная часть женщин испытывает выраженную боль, а потребности в адекватном обезболивании часто остаётся неудовлетворёнными. В настоящем исследовании применялся опросник Patient-Centered Gynecological Experience Assessment (PCGEA), который прошли 227 женщин. Целью было оценить уровень болевых ощущений, использование анестезии и предпочтения пациенток при проведении девяти наиболее распространённых гинекологических процедур. Наибольшая интенсивность боли отмечалась при манипуляциях, связанных с доступом в полость матки: абляция эндометрия (средний балл 7,9 из 10), забор эндометрия (~7,5 из 10) и гистероскопия (~7,2 из 10). Даже процедуры, традиционно считающиеся малоболезненными, например исследование с зеркалами, вызвали у 63 % женщин желание, чтобы им было предложено обезбоживание. В целом, среди пациенток, перенёвших вмешательства без анестезии, 61 % выразили предпочтение в её использовании. Результаты выявили существенный разрыв между клиническими представлениями врачей и реальным опытом женщин, что свидетельствует о систематическом недооценивании выраженности боли. Полученные данные подчёркивают необходимость перехода к травма-ориентированному, пациент-центрированному подходу в гинекологической практике, предусматривающему индивидуализацию обезбоживания даже при «рутинных» процедурах.

Ключевые слова: пациент-ориентированная помощь; обезбоживание; гинекологические вмешательства.

Введение

Рутинные гинекологические процедуры — включая осмотр с помощью зеркал, гистероскопию и трансвагинальные исследования — традиционно характеризуются в клинической практике как простые и малоинвазивные. Однако накопленные данные, основанные на самоотчётах пациенток, свидетельствуют о противоположном: подобные вмешательства нередко сопровождаются выраженными болевыми ощущениями и психоэмоциональным дискомфортом. Игнорирование этой проблемы в медицинской практике снижает уровень автономии женщины и вызывает этические вопросы, касающиеся информированного согласия и адекватного обезболивания в сфере репродуктивного здоровья.

Так, по результатам одного из опросов, проведённых среди женщин, перенёвших амбулаторную гистероскопию, 35,5 % респонденток оценили болевые ощущения как сильные, а многие заявили, что не согласились бы на повторное проведение процедуры в тех же условиях. Интенсивность боли варьировала особенно значительно у женщин в постменопаузе, а также у пациенток с анамнезом психотравмирующих событий или повышенной чувствительностью, что ставит под сомнение устоявшееся представление о достаточности минимальной аналгезии.

В период с 2009 по 2017 гг. анализ данных 804 пациенток, перенёвших гистероскопию, показал, что лишь 7,8 % женщин сообщили об отсутствии боли, тогда как 17,6 % оценили её как более 7 баллов из 10. При этом врачи систематически недооценивали выраженность болевых ощущений, что выявило разрыв между клиническими оценками и реальными впечатлениями пациенток. Подобное несоответствие всё чаще становится объектом этической критики. В частности, в публикациях *Journal of Ethics* подчёркивается, что игнорирование боли при неакушерских гинекологических вмешательствах подрывает доверие к врачу и ослабляет терапевтический альянс.

В ответ на нарастающее внимание к этой проблеме Центры по контролю и профилактике заболеваний (CDC) рекомендовали использовать лидокаин — местно или в виде парацервикальной блокады — при установке внутриматочных средств, а также акцентировать внимание на необходимости консультирования женщин и разработки индивидуальных планов обезболивания. Современные исследования также подтверждают значимость комплексного подхода: так, работа 2024 года, опубликованная в *Journal of Midwifery & Women's Health*, показала, что женщины во время обычного осмотра нередко испытывают средний уровень боли 6,41 балла по 10-балльной шкале, а применение инновационных методик, включая виртуальную реальность, позволяет существенно снижать выраженность боли и тревожности.

Совокупность этих данных подтверждает необходимость внедрения в гинекологическую практику травма-ориентированного подхода, где ключевым критерием является не только клиническая целесообразность, но и субъективное восприятие пациентки. Признание боли в качестве важного компонента медицинского взаимодействия выступает одновременно и клинической, и этической обязанностью.

Цель исследования

Основная задача данной работы заключается в обосновании необходимости внедрения пациент-ориентированного подхода к обезболиванию при проведении гинекологических вмешательств. В исследовании акцентируется внимание на восприятии женщинами распространённых процедур, степени выраженности болевых ощущений и их отношении к применению анестезии.

Особое внимание уделяется тому, чтобы подчеркнуть: даже так называемые «рутинные» манипуляции могут вызывать значительный дискомфорт и требовать индивидуализированного подхода к обезболиванию. Авторы ставят целью убедить врачей в важности признания этих фактов и необходимости включения в процесс принятия клинических решений не только медицинских показаний, но и предпочтений пациенток, что позволит обеспечить информированное согласие и уважительное отношение к женщинам в сфере репродуктивного здоровья.

Материалы и методы

В качестве основного инструмента исследования использовался стандартизированный опросник Patient-Centered Gynecological Experience Assessment (PCGEA), предназначенный для комплексной оценки опыта пациенток. Анкетирование охватило 227 женщин, ранее перенёвших распространённые гинекологические процедуры.

Опрос включал несколько блоков:

- Социодемографические и медицинские характеристики: возраст, репродуктивный анамнез (число беременностей и родов), наличие гинекологических заболеваний, осложнённое течение беременности, перенесённые операции на органах малого таза, кесарево сечение, использование акушерских вмешательств.
- Оценка конкретных процедур: исследование с использованием зеркал, трансвагинальное ультразвуковое исследование, цитологический мазок (Pap-тест), установка внутриматочной спирали, кольпоскопия, гистероскопия, забор эндометрия, абляция эндометрия, введение или удаление пессария.

Пациентки указывали, проводилась ли анестезия при каждом вмешательстве, а если да — то какой вид (местная или общая). Для оценки выраженности боли использовалась шкала от 0 (полное отсутствие боли) до 10 (максимально возможная боль). В случае отсутствия обезболивания женщины также отмечали, хотели бы они, чтобы анестезия была применена.

Анкетирование проводилось в анонимной форме, под наблюдением исследователей для обеспечения корректности заполнения и исключения пропусков. До включения в исследование каждая участница подписала информированное согласие.

Результаты

В исследовании приняли участие 227 женщин. Средний возраст респонденток составил 36,7 года ($SD = 8,9$). Медиана числа беременностей равнялась 2 (от 0 до 8), а родов — 1 (от 0 до 5). Более половины участниц (58 %) имели в анамнезе гинекологическое заболевание, а 42 % на момент опроса находились под наблюдением по поводу текущей патологии. Осложнённое течение беременности встречалось у 23 %, хирургические вмешательства на органах малого таза перенесли 47 % женщин, кесарево сечение — 34 %, использование акушерских вспомогательных технологий отмечено у 18 %.

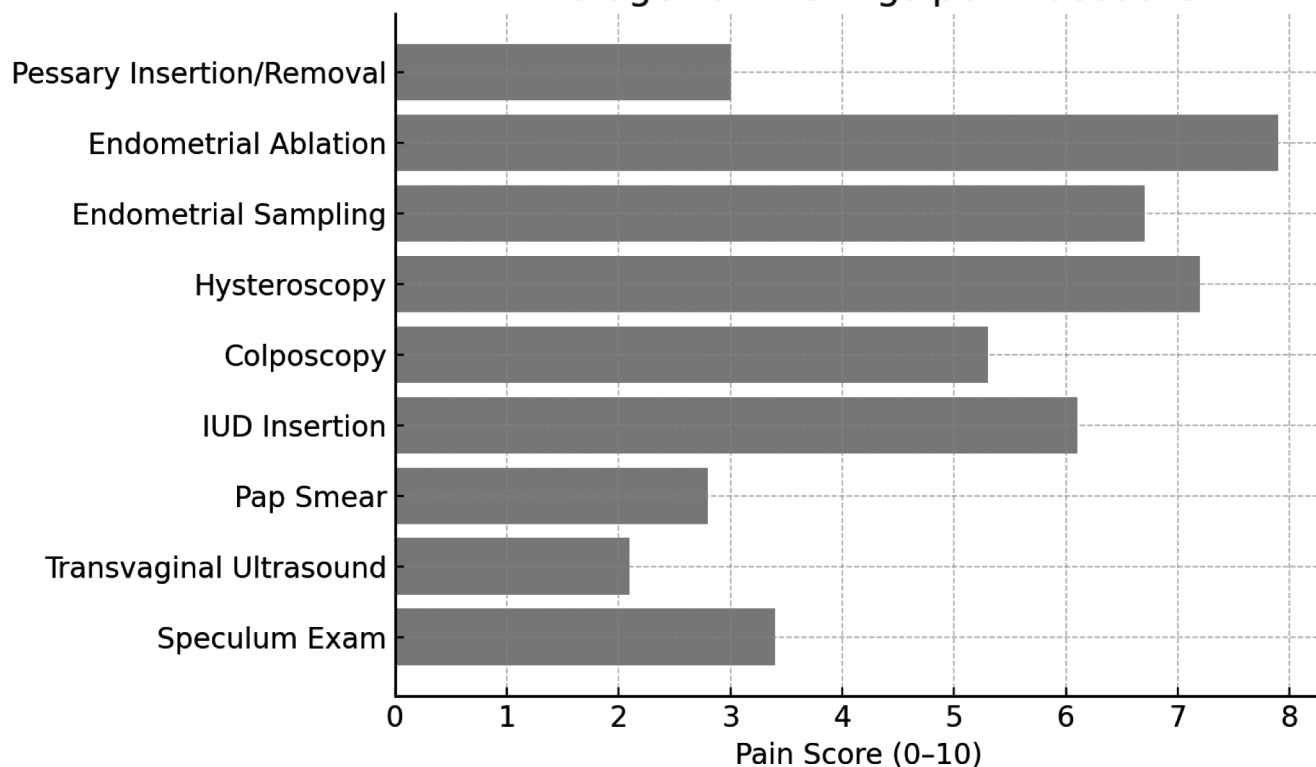
Что касается клинических процедур, наиболее часто выполняемым вмешательством был осмотр с исполь-

зованием зеркал, который в 89 % случаев проводился без анестезии. При установке внутриматочной спирали 54 % женщин сообщили о применении обезболивания, преимущественно местного. Гистероскопии и связанные с ними манипуляции (абляция и биопсия эндометрия) выполнялись с использованием анестезии в 72 % случаев: у половины пациенток применялась общая, у 22 % — местная. В то же время такие процедуры, как трансвагинальное УЗИ, цитологический мазок, кольпоскопия и введение или удаление пессария, проводились полностью без анестезии.

Анализ самооценки болевых ощущений (по шкале от 0 до 10) показал значительные различия между процедурами. Наиболее выраженная боль отмечена при абляции эндометрия (в среднем около 8 баллов), далее следовали забор эндометрия (~7,5 балла) и гистероскопия (~7,2 балла). Установка ВМС и кольпоскопия оценивались как умеренно болезненные процедуры (около 6 и 5,5 баллов соответственно). Менее выраженные боли фиксировались при проведении осмотра с зеркалами, введении/удалении пессария и Пап-теста (в среднем 3–3,5 балла). Наименее болезненной признана трансвагинальная ультразвуковая диагностика (около 2 баллов).

Примечательно, что среди всех вмешательств, выполненных без обезболивания, 61 % участниц заявили о желании, чтобы им была предложена анестезия. Наибольшая потребность в анестезии наблюдалась при заборе эндометрия — 78 % женщин отметили, что пред-

Average Pain Ratings per Procedure



почти бы проведение манипуляции с обезболиванием. Неожданным оказалось и то, что при традиционно «малоболезненной» процедуре — осмотре с зеркалами — 63 % пациенток также выразили желание в применении анестезии.

Заключение

Полученные результаты убедительно опровергают распространённое в клинической практике мнение о том, что рутинные гинекологические процедуры сопровождаются минимальным дискомфортом и не требуют обезбоживания. Хотя такие вмешательства, как трансвагинальное ультразвуковое исследование, действительно характеризовались низкими показателями боли (в среднем около 2 баллов по шкале от 0 до 10), ряд процедур оказался значительно более травматичным для пациенток. Наибольшая интенсивность боли отмечалась при абляции эндометрия (7,9 балла), заборе эндометрия (~7,5 балла) и гистероскопии (~7,2 балла).

Особое внимание заслуживает факт, что даже традиционно «несложные» процедуры, например осмотр

с зеркалами (выполненный без обезбоживания у 89 % женщин), вызвали у большинства (63 %) желание применения анестезии. Установка внутриматочной спирали также показала высокий уровень дискомфорта (свыше 6 баллов), несмотря на то что лишь 54 % пациенток получили обезбоживание, преимущественно местное. В целом, среди всех женщин, перенёвших процедуры без анестезии, 61 % заявили о её необходимости.

Таким образом, выявлен выраженный разрыв между клиническими представлениями врачей и реальными ощущениями пациенток. Систематическая недооценка боли не только снижает доверие к медицинской помощи, но и поднимает серьёзные этические вопросы. Настоящее исследование подчёркивает необходимость пересмотра подходов к определению понятия «рутинная процедура» и внедрения в гинекологическую практику индивидуализированных, травма-ориентированных стратегий обезбоживания, основанных на реальных потребностях и предпочтениях женщин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mahmud A., De Silva P., Smith P., Clark T.J. Patient experiences of outpatient hysteroscopy // *European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology*. — 2023. — Vol. 288. — P. 142–152. DOI: 10.1016/j.ejogrb.2023.07.009.
2. Harrison R., As-Sanie S. Pain-free day surgery? Evaluating pain and pain assessment during hysteroscopy // *British Journal of Anaesthesia*. — 2020. — Vol. 125, № 6. — P. e468–e470. DOI: 10.1016/j.bja.2020.08.015.
3. Ensuring Equitable Pain Management in Gynecologic Care [Электронный ресурс] // *AMA Journal of Ethics*. — 2025. — Vol. 27, № 2. — P. E98–103. DOI: 10.1001/amajethics.2025.98.
4. Curtis K.M., Nguyen A.T., Tepper N.K. et al. U.S. Selected Practice Recommendations for Contraceptive Use, 2024 // *MMWR Recommendations and Reports*. — 2024. — Vol. 73, № RR-3. — P. 1–77. DOI: <http://dx.doi.org/10.15585/mmwr.rr7303a1>.
5. Kurt G., Ozcan N. The Effect of Virtual Reality On Pain and Anxiety Management During Pelvic Examination: A Randomized Controlled Trial // *Journal of Midwifery & Women's Health*. — 2024. — Vol. 69. — DOI: 10.1111/jmwh.13587

© Карданова Мадина Хабилевна (madina.kardanova@icloud.com); Идрисова Лилия Султановна (dr.idrisova11@yandex.ru);
Карданова Айдана Зауровна (aidanakardanova@gmail.com); Джамбекова Залина Магомедовна (zalina.j@mail.com);
Тлупова Алина Анзоровна (talina2101@icloud.com); Гусейнова Нурия Рамизовна (nuriiya17@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПОЛНЫЙ ПАТОМОРФОЛОГИЧЕСКИЙ ОТВЕТ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ НЕОАДЬЮВАНТНОЙ ТЕРАПИИ HER2+ РАКА МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

PROGNOSTIC CRITERIA DETERMINING A COMPLETE PATHOMORPHOLOGICAL RESPONSE DURING NEOADJUVANT SYSTEMIC THERAPY OF HER2+ BREAST CANCER»

**I. Krivokhizhin
A. Parsadanyan**

Summary. Background: neoadjuvant systemic therapy plays a key role in the combined treatment of HER2-positive breast cancer (BC). In this regard, it is of particular importance to identify prognostic factors that make it possible to assess the effectiveness of treatment, as well as to determine the optimal criteria for assessing the tumor response.

Aim: the purpose of the current study was to analyze and determine the most significant prognostic criteria for achieving pathological complete response (pCR) during preoperative HER2+ breast cancer therapy. The morphological response was assessed using the RCB (Residual Cancer Burden) system, and additional characteristics of the residual tumor were studied.

Materials and methods: a randomized retrospective study of 175 breast cancer patients with HER2 positive subtypes of stage II and III receiving neoadjuvant systemic therapy was conducted. The treatment took place on the basis of the Surgut District Clinical Hospital in a day hospital for surgical treatment and antitumor drug therapy from 2019–2023. Statistical data processing was performed using the SPSS statistics software version 27.0.1.

Results: as a result of the data obtained, we found out that the frequency of achieving pCR in T1 (77.8 %), T2 (51.5 %), T3 (31.3 %). No statistically significant results were achieved depending on regional metastasis (cN) and the frequency of achieving a complete response to treatment ($p=0.11$). At stage IIA, the incidence of pCR reached 59.2 %, stage IIB — 52.9 %, and at stage IIIA — 35.7 % ($p=0.041$). In comparison of luminal and non-luminal tumors, statistical significance was obtained for pCR ($p<0.001$). In luminal HER2+ patients, the incidence of complete therapeutic pathomorphosis was lower (32.5 %) compared to non-luminal ones (64.1 %). We also obtained the statistical significance of the frequency of pCR depending on the level of Ki-67 ($p=0.032$). With a Ki value of 67, 45 % or more is expected to achieve a pCR.

Conclusions: the results of the study demonstrate that an integrated approach makes it possible to identify prognostic groups of patients based on clinical and morphological factors and optimize the choice of adjuvant therapy tactics on an individual basis.

Keywords: HER2+ breast cancer, prognostic criteria, RCB, Ki-67, pathological complete response, targeted therapy.

Кривохижин Игорь Викторович

Аспирант, БУ ВО ХМАО-Югры

«Сургутский государственный университет»;

Врач-онколог БУ «Сургутская окружная
клиническая больница»

KrivokhizhinIV@surgutokb.ru

Парсаданян Арапат Микичович

доктор медицинских наук, профессор БУ ВО ХМАО-Югры

«Сургутский государственный университет»;

врач-онколог БУ «Сургутская окружная
клиническая больница»

parsadanyanam@surgutokb.ru

Аннотация. Введение: неоадьювантная системная терапия играет ключевую роль в комбинированном лечении HER2-позитивного рака молочной железы (РМЖ). В этой связи особую значимость приобретает выявление прогностических факторов, позволяющих оценить эффективность лечения, а также определение оптимальных критериев оценки ответа опухоли.

Цель: целью текущего исследования было проанализировать и определить наиболее значимые прогностические критерии достижения полной патоморфологической регрессии (пПР) при проведении предоперационной терапии HER2+ рака молочной железы. Оценка морфологического ответа проводилась с использованием системы RCB (Residual Cancer Burden), а также изучались дополнительные характеристики остаточной опухоли.

Материалы и методы: проведено рандомизированное ретроспективное исследование 175 пациентов раком молочной железы с HER2 положительным подтипом II и III стадии, получающих неоадьювантную системную терапию. Лечение проходило на базе Сургутской окружной клинической больницы в условиях дневного стационара хирургических методов лечения и противоопухолевой лекарственной терапии с 2019–2023 годы. Статистическая обработка данных была выполнена при помощи программы SPSS statistics версии 27.0.1.

Результаты исследования: в результате полученных данных, мы выяснили, что частота достижения пПР при T1 (77,8 %), при T2 (51,5 %), T3 (31,3 %). Зависимости от регионарного метастазирования (cN) и частоты достижения полного ответа на лечения статистически значимых результатов не достигнуто ($p=0,11$). При IIA стадии частота пПР достигала 59,2 %, IIB стадии — 52,9 %, при IIIA стадии заболевания 35,7 % ($p=0,041$). В сравнении люминальных и нелюминальных опухолей в отношении пПР была получена статистическая значимость ($p<0,001$). При люминальных HER2+ частота полного лечебного патоморфоза была ниже (32,5 %) относительно нелюминальных — 64,1 %. Также, нами была получена статистическая значимость частоты пПР в зависимости от уровня Ki-67 ($p=0,032$). При значении Ki-67 45 % и более ожидается достижение пПР.

Выводы: результаты исследования демонстрируют, что комплексный подход позволяет выделить, исходя из клинических и морфологических факторов, прогностические группы пациенток и оптимизировать выбор тактики адьювантной терапии в индивидуальном порядке.

Ключевые слова: HER2+ рак молочной железы, прогностические критерии, RCB, Ki-67, полный патоморфологический регресс, таргетная терапия.

Введение

Рак молочной железы остается, на сегодняшний день, самым часто диагностируемым онкологическим заболеванием у женского населения в мире: по международным данным, на его долю приходится 11,7 % всех новых случаев рака — это 2,3 миллиона диагнозов ежегодно [1]. HER2-позитивный подтип, составляющий 15–20 % случаев, демонстрирует улучшение прогноза: внедрение таргетной терапии снизило смертность на 30–40 % за последние 20 лет [2,3]. Подтверждению тому, что использование таргетных агентов, а именно двойной блокады достоверно увеличивало частоту полного патоморфологического ответа, было продемонстрировано в исследовании NeoSphere. Комбинация THP (трастузумаб+пертузумаб+доцетаксел) обеспечила пПР 45,8 % против 29 % в группе без пертузумаба (TH) — абсолютный прирост +16,8 %. При этом, наблюдается максимальная эффективность в агрессивных подтипах: наивысший пПР (63,2 %) достигнут у ER/PR-отрицательных опухолей при комбинации THP. ER/PR-положительные опухоли хуже отвечали на терапию. Анализ подгрупп по уровню Ki67 (маркер пролиферативной активности опухоли) выявил важные закономерности в ответе на терапию. Наибольший пПР (54,1 %) достигнут в группе THP при высоком Ki67 — почти в 2 раза выше, чем при низком Ki67. Даже без химиотерапии (группа HP) высокий Ki67 ассоциировался с лучшим ответом (23,1 % vs 8,3 %) [4,5]. В исследовании TRYPHAENA (Schneeweiss et al., 2013) анализ пПР (патологическая полная ремиссия) по рецепторному статусу (ER/PR) выявил существенные различия в ответе на терапию. Максимальная эффективность при ER/PR-отрицательном статусе: пПР (73,1 %) достигнут в группе FEC → THP (антрациклины + двойная HER2-блокада). Даже в безантрациклиновой группе TCHP пПР составил 68,4 %. Что нельзя сказать о ER/PR-отрицательном статусе, пПР не превышал 50 % независимо от режима [6].

Целью нашего исследования было определить наиболее значимые прогностические критерии достижения пПР при проведении неоадъювантной терапии HER2+ рака молочной железы.

Материал и методы

В нашем ретроспективном исследовании было включено 175 пациентов раком молочной железы с HER2 положительным подтипом II и III стадии. Характеристика пациентов представлена в таблице 1. Пациенты получали предоперационную системную лекарственную терапию по одной из выбранных схем:

1. 4 курса АС (доксорубин 60мг/м² + циклофосфамид 600мг/м²), далее 4 курса паклитаксел 175мг/м² + трастузумаб 6мг/кг (8мг/кг нагрузочная доза);

2. 4 курса АС (доксорубин 60мг/м² + циклофосфамид 600мг/м²), далее 4 курса доцетаксел 75мг/м² + трастузумаб 6мг/кг (8мг/кг нагрузочная доза);
3. 4 курса АС (доксорубин 60мг/м² + циклофосфамид 600мг/м²), далее 4 курса доцетаксел 75мг/м² + трастузумаб 6мг/кг (8мг/кг нагрузочная доза) + пертузумаб 400мг (800мг нагрузочная доза);
4. 6 курсов доцетаксел 75мг/м² + карбоплатин АUC6 + трастузумаб 6мг/кг (8мг/кг нагрузочная доза) + пертузумаб 400мг (800мг нагрузочная доза);

Таблица 1.

Общая характеристика пациентов HER2+ рака молочной железы

Критерий	n (%)
сТ (первичная опухоль)	
T1	9 (5,1)
T2	134 (75,6)
T3	32 (18,3)
сN (регионарное метастазирование)	
N0	59 (33,7)
N1	78 (44,6)
N2	38 (21,7)
Стадия заболевания	
IIA	49 (28)
IIB	70 (40)
IIIA	56 (32)
Биологический подтип	
Люминальный	83 (47,4)
Нельминальный	92 (52,6)
Гистологический тип опухоли	
Протоковый	168 (96)
Дольковый	5 (2,8)
Смешанный	2 (1,2)
Степень дифференцировки опухоли	
G1	20 (11,4)
G2	105 (60)
G3	50 (28,6)

Лечение проходило отделении дневного стационара хирургических методов лечения и противоопухолевой лекарственной терапии на базе Сургутской окружной клинической больницы с 2019–2023 годы. Диагноз вы-

ставлялся на основании клинических, инструментальных и лабораторных данных. Показатель HER2 был определен при помощи иммуногистохимического метода диагностики. В случае результата HER2 2+, проводилось дополнительное исследование с помощью флюоресцентной гибридизации. После завершения всех курсов терапии пациентам проводилось оперативное лечение. Патоморфологический ответ на проведенное неоадьювантное лечение был оценен с помощью системы RCB и по шкале Г.А. Лавниковой [7,8].

В постнеоадьювантном режиме пациенты получали курсы лучевой терапии, трастузумаб или трастузумаб эмтанзин +/- гормонотерапия. Медиана наблюдения составила 37 месяцев. Медиана возраста пациентов — 50 лет (26–72).

Статистическая обработка данных была выполнена при помощи программы SPSS statistics версии 27.0.1. Количественные показатели измерялись по предмету соответствия нормальному распределению, для этого использовались критерии Шапиро-Уилка (при включении ограничивающих менее 50), а также показатели асимметрии и эксцесса. Сравнение номинальных данных проводилось при помощи критерия χ^2 Пирсона. В случае анализа четырехпольных таблиц при ожидаемом явлении, хотя бы в одной ячейке меньше 10, мы рассчитывали критерии χ^2 с поправкой Йейтса. В качестве количественного измерения эффекта при соблюдении относительных показателей мы использовали показатель отношения шансов (ОШ), определяемый как отношение вероятности наступления событий в группе. Для оценки диагностической инновации численных признаков при прогнозировании определенного исхода, в том числе вероятности наступления исхода, применялся метод анализа ROC-кривых.

Результаты

В результате нашего исследования мы определили влияние как клинических, так и морфологических критериев для достижения полного патоморфологического ответа после завершения всех курсов предоперационной лекарственной терапии. При сравнении частоты достижения полного патоморфологического ответа в зависимости от первичной опухоли (сТ) были получены статистически значимые результаты ($p=0,025$). Частота достижения пПР при Т1 (77,8 %), при Т2 (51,5 %), Т3 (31,3 %), (рис.1). При анализе каждой сТ между собой, получены статистически значимые различия между Т1 и Т3 ($p_{1-3}=0,037$).

Зависимости от регионарного метастазирования (сN) и частоты достижения полного ответа на лечения статистически значимых результатов не достигнуто ($p=0,11$). Но при исходном N0 и N1 (54,2 % и 52,6 % соответственно) наблюдается чаще пПР в отличие от N2 (34,2 %). При оценке частоты пПР в зависимости от стадии заболевания были получены статистически значимые различия ($p=0,041$). При IIA стадии частота пПР достигала 59,2 %, IIB стадии — 52,9 %, при IIIA стадии заболевания 35,7 % (рис. 2). При сравнении каждой стадии между собой мы выяснили, что статистически значимые различия были между IIA и IIIA стадиями ($p_{1-3}=0,049$).

Медиана индекса Ki-67 у исследуемых пациентов, получающих неоадьювантное лечение составила 40 % [5–90]. В результате мы получили статистическую значимость частоты полного патоморфологического ответа в зависимости от уровня Ki-67 ($p=0,032$). Полученная модель при помощи ROC-кривой была статистически значимой ($p=0,033$). При значении Ki-67 45 % и более ожидается достижение пПР (рис. 3).

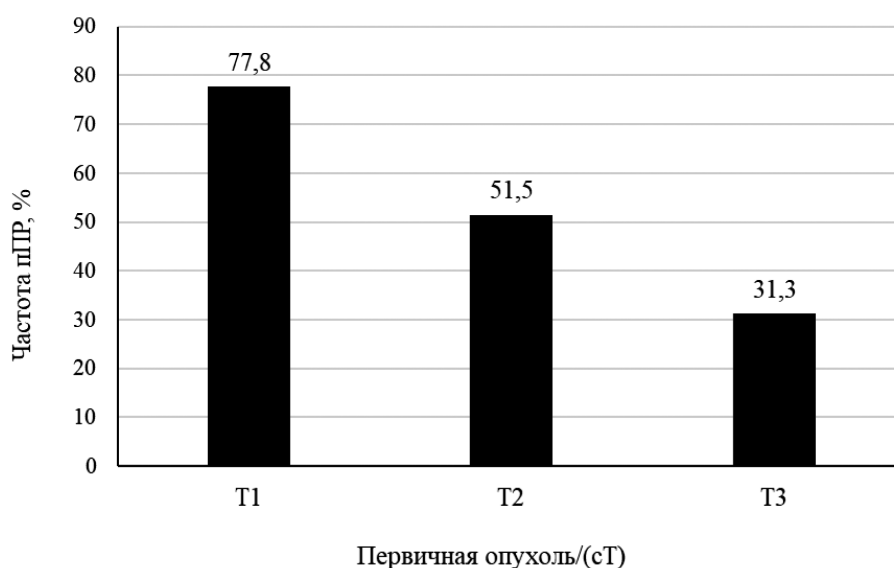


Рис. 1. Частота пПР в зависимости от первичной опухоли (сТ)

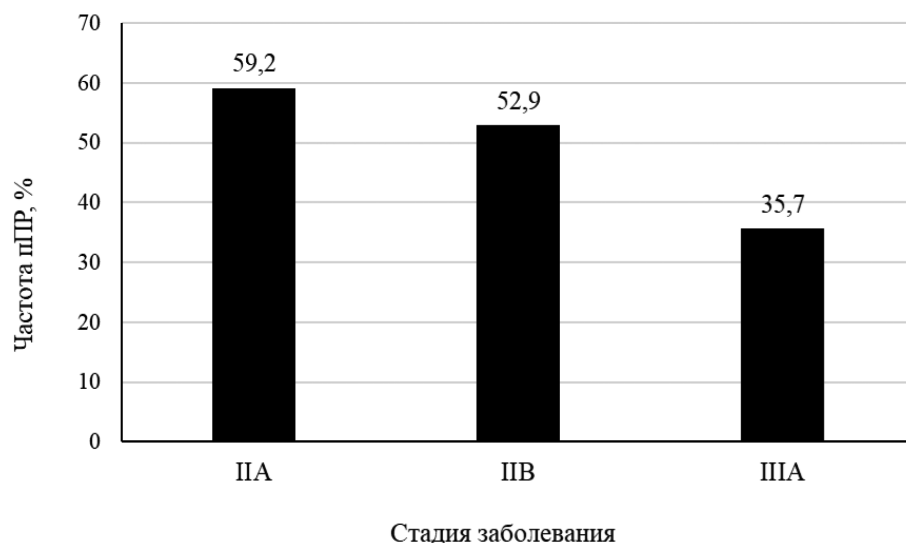


Рис. 2. Частота пПР в зависимости от стадии заболевания

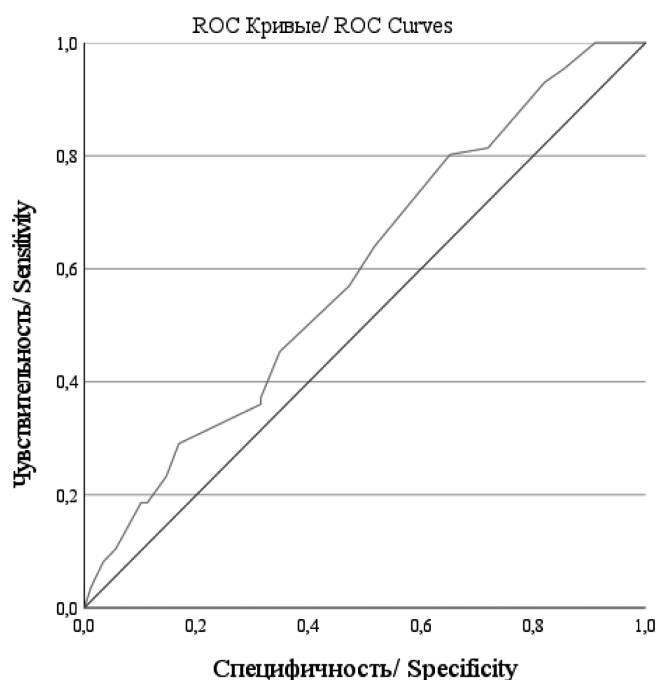


Рис. 3. ROC-кривая, демонстрирующая частоту пПР в зависимости от индекса Ki-67

Также, стоит отметить биологический подтип HER2+ РМЖ и его зависимость на частоту получения пПР. В сравнении люминальных и нелюминальных опухолей в отношении пПР была получена статистическая значимость ($p < 0,001$). При люминальных HER2+ частота полного лечебного патоморфоза была ниже (32,5 %) относительно нелюминальных — 64,1 % (рис. 4), (ОШ=3,7; 95 % ДИ: 1,9–6,9).

Большая часть пациентов в исследовании была представлена в виде протоковой инвазивной карциномы (96 %). У 5 человек (2,8 %) диагностирован дольковый рак МЖ и у 2 человек (1,2 %) встречалась смешанная

форма рака. По степени дифференцировки опухоли (G) — низкую степень злокачественности (G1) имели 11,4 %, G2 составляла 60 % пациентов. Опухоли с высокой степенью злокачественности составляли 28,6 %.

Обсуждение результатов

В результате нашего исследования статистически значимыми критериями полного патоморфологического ответа на предоперационную лекарственную терапию HER2+ РМЖ являлись: сТ — первичная опухоль, где пПР был достигнут у пациентов с Т1 (77,8 %) лучше, чем при Т3 (31,3 %). У пациентов с Т2 пПР был у 51,5 % исследуемых, при Т3 — 31,3 %. В нашем исследовании не включались пациенты с Т4. Возвращаясь к исследованию NeoSphere, где наилучший ответ на лечение наблюдался у пациентов с Т2 (50,6 %) на схеме ТНР. Пациенты с опухолью ≤ 2 см (Т1a/b/c) не включались в данное исследование. При Т3-Т4 ответ составлял 42,9 %. При этом стоит отметить, что увеличения процента достижения полного ответа на лечение (почти + 20 %) благодаря добавлению пертузумабу [4,5]. Также в исследовании говорится, что при N+ добавление пертузумаба увеличивало частоту пПР почти на 14,7 %. Исследование NADIM-HER2 показывает, что у пациентов, получавших лечение препаратами: карбоплатин+ паклитаксел+ трастузумаб с пертузумабом частота пПР выше была с Т2 (68 %), с Т3 (50 %). Данные по Т1 также отсутствуют, как и в предыдущем исследовании. Исследование NADIM-HER2 продемонстрировало четкую зависимость частоты патологического полного ответа от исходной стадии заболевания у пациентов с HER2-позитивным раком молочной железы, получавших неоадьювантную терапию. При стадии IIA (Т2N0) частота пПР составила 73 % в экспериментальной группе (карбоплатин+паклитаксел+двойная HER2-блокада) против 54 % в контрольной группе (антрациклины, таксаны + двойная HER2-блокада). Однако, статистической

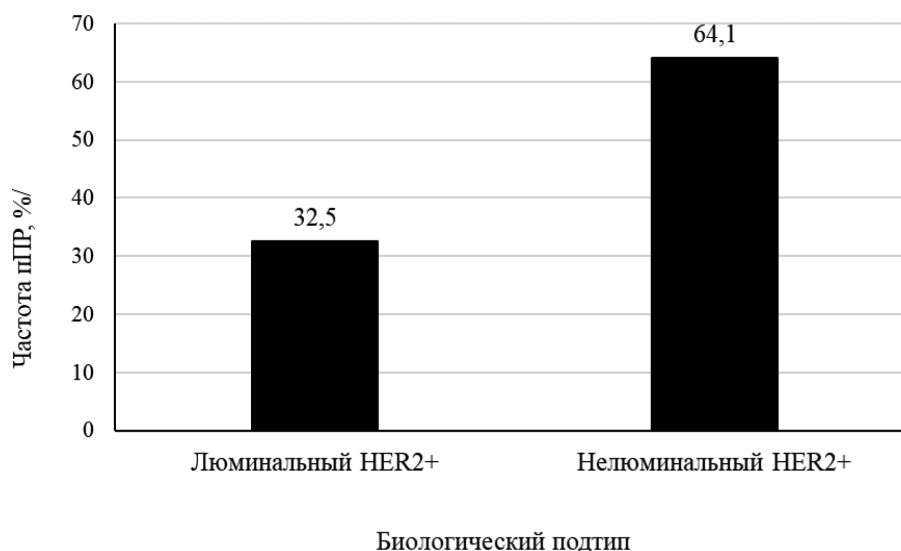


Рис. 4. Частота пПР в зависимости от биологического подтипа

значимости получено не было ($p=0,28$). При IIIA стадии самый высокий ответ был группе без антрациклинов — 50 % против 42 % ($p=0,69$) [9,10]. В нашем исследовании при IIA стадии полный лечебный патоморфоз составлял 59,2 % в общей группе пациентов, пролеченных неоадъювантной терапией HER2+ РМЖ. При внутригрупповом анализе нами была получена статистическая значимость частоты пПР между IIA и IIIA стадиями ($p=0,049$). Как и в вышеупомянутых исследованиях отличные результаты по достижению пПР показывает IIA стадия заболевания. В рандомизированном исследовании фазы III KRISTINE при сравнении биологических подтипов наибольший пПР при нелюминальных HER2+ опухолях (63 % в TCHP), хуже отвечают опухоли HR+. В дополнении к результатам по биологическим подтипам, проведен анализ по уровню Ki-67, где было показано, что при уровне ≥ 20 % встречался наибольший показатель полного ответа на лечение (пПР) у пациентов при назначении TCHP (61 %) против (48 %) с T-DM1 + пертузумаб ($p=0,021$)

[11,12]. Результаты нашего исследования сопоставимы по биологическим подтипам с KRISTINE, достигая 64,1 % при нелюминальных опухолях против 32,5 % люминальных. К тому же, при исследовании уровня Ki-67, было показано, что при высоком показателе, начиная с 45 % прогнозировалось наступление полного патоморфологического ответа на проведенное лечение.

Выводы

Проведенный анализ подтвердил, что эффективность неоадъювантной терапии HER2-позитивного рака молочной железы II–III стадии существенно варьирует в зависимости от клинко-морфологических характеристик опухоли. Индивидуализация неоадъювантного лечения с учетом биологии опухоли и точная оценка ответа позволяют улучшить долгосрочные исходы у пациенток с HER2-позитивным РМЖ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sung H, et al. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *CA Cancer J Clin*. 2021;71(3):209–249.
2. Howlader N, Noone AM, Krapcho M, Miller D, Brest A, Yu M, et al. (eds). SEER Cancer Stat Facts: Female Breast Cancer Subtypes [Internet]. Bethesda, MD: National Cancer Institute; 2023. (Electronic resource). URL: <https://seer.cancer.gov/statfacts/html/breast-subtypes.html> (access date: 17.03.2025).
3. Slamon DJ, et al. Adjuvant Trastuzumab in HER2-Positive Breast Cancer. *N Engl J Med*. 2017;377(2):122–131.
4. Gianni L, Pienkowski T, Im Y-H., Roman L, Tseng L-M., Liu M.-C., Lluch A., Starosławska E., de la Haba-Rodriguez J., Im S.-A., Pedrini J. L., Poirier B., Morandi P., Semiglazov V., Srimuninnimit V., Bianchi G., Szado T., Ratnayake J., Ross G., & Valagussa P. (2012). Efficacy and safety of neoadjuvant pertuzumab and trastuzumab in women with locally advanced, inflammatory, or early HER2-positive breast cancer (NeoSphere): a randomised multicentre, open-label, phase 2 trial. *The Lancet Oncology*, 13(1), 25–32.
5. Gianni L, Pienkowski T, Im YH, Tseng LM, Liu MC, Lluch A, Starosławska E, de la Haba-Rodriguez J, Im SA, Pedrini JL, Poirier B, Morandi P, Semiglazov V, Srimuninnimit V, Bianchi GV, Magazzu D, McNally V, Douthwaite H, Ross G, Valagussa P. 5-year analysis of neoadjuvant pertuzumab and trastuzumab in patients with locally advanced, inflammatory, or early-stage HER2-positive breast cancer (NeoSphere): a multicentre, open-label, phase 2 randomised trial. *Lancet Oncol*. 2016 Jun;17(6):791–800. doi: 10.1016/S1470-2045(16)00163-7. Epub 2016 May 11. PMID: 27179402.
6. Schneeweiss A, Chia S, Hickish T, Harvey V, Eniu A, Hegg R, Tausch C, Seo JH, Tsai YF, Ratnayake J, McNally V, Ross G, Cortés J. Pertuzumab plus trastuzumab in combination with standard neoadjuvant anthracycline-containing and anthracycline-free chemotherapy regimens in patients with HER2-positive early breast cancer: a randomized phase II cardiac safety study (TRYPHAENA). *Ann Oncol*. 2013 Sep;24(9):2278–84. doi: 10.1093/annonc/mdt182. Epub 2013 May 22. PMID: 23704196.

7. Методологические аспекты морфологической диагностики и оценки лечебного патоморфоза тройного негативного рака молочной железы / Ю.Ю. Андреева, Л.Э. Завалишина, Н.В. Данилова [и др.] // Фарматека. — 2014. — № 8(281). — С. 13–18.
8. Cortazar P., et al. «Pathological complete response and long-term clinical benefit in breast cancer: the CTNeoBC pooled analysis». *Lancet*. 2014;384(9938):164–172.
9. Llombart-Cussac A., Pírez-García J.M., Bellet M., et al. Final results of NADIM-HER2: Long-term survival outcomes. *Annals of Oncology* 2022; 33(5): 534–543.
10. Pírez-García J.M., Cortés J., Ruiz-Borrego M., et al. Neoadjuvant trastuzumab and pertuzumab plus chemotherapy for HER2-positive breast cancer (NADIM-HER2): A multicentre, open-label, single-arm, phase 2 trial. *The Lancet Oncology* 2021; 22(3): 351–360.
11. Hurvitz SA, Martin M, Symmans WF, Jung KH, Huang CS, Thompson AM, Harbeck N, Valero V, Stroyakovskiy D, Wildiers H, Campone M, Boileau JF, Beckmann MW, Afenjar K, Fresco R, Helms HJ, Xu J, Lin YG, Sparano J, Slamon D. Neoadjuvant trastuzumab, pertuzumab, and chemotherapy versus trastuzumab emtansine plus pertuzumab in patients with HER2-positive breast cancer (KRISTINE): a randomised, open-label, multicentre, phase 3 trial. *Lancet Oncol*. 2018 Jan;19(1):115–126. doi: 10.1016/S1470-2045(17)30716-7. Epub 2017 Nov 23. PMID: 29175149.
12. Okines AF. T-DM1 in the Neo-Adjuvant Treatment of HER2-Positive Breast Cancer: Impact of the KRISTINE (TRIO-021) Trial. *Rev Recent Clin Trials*. 2017;12(3):216–222. doi: 10.2174/1574887112666170529094911. PMID: 28552047.

© Кривохижин Игорь Викторович (krivokhizhinIV@surgutokb.ru); Парсаданян Апарат Микичович (parsadanyanam@surgutokb.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ГЕМОЦИРКУЛЯТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРИ КИШЕЧНОЙ НЕПРОХОДИМОСТИ В КРИТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ P. SUDECK И ПРОФИЛАКТИКА СПАЙКООБРАЗОВАНИЯ ПОСЛЕ ЛАПАРОСКОПИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

HEMOCIRCULATORY PARAMETERS IN INTESTINAL OBSTRUCTION IN THE CRITICAL ZONE OF P. SUDECK AND PREVENTION OF ADHESIONS AFTER LAPAROSCOPIC SURGERIES

**A. Magomedov
M. Ramazanov
M. Magomedov
Z. Abdurakhmanova**

Summary. The study of blood circulation in the anastomotic suture strips to prevent insolvency in the sigma bowel resection on intestinal obstruction in the critical zone P. Sudeck in 15 patients of the group. In 12 control patients with intestinal obstruction after resection of bowel anastomoses formed without study blood circulation and without the critical zone P. Sudeck. In the study group had no insolvency sutures anastomoses.

In the control group in the 2 cases set anastomotic suture failure and 5 cases of adhesions.

Keywords: critical zone, suture failure, adhesions.

Магомедов Амир-Али Магомедович
кандидат медицинских наук, заведующий хирургическим
отделением ФКУЗ МСЧ Республики Дагестан,
майор медицинской службы, ассистент, Дагестанский
государственный медицинский университет
mr.amirali@mail.ru

Рамазанов Муталим Рамазанович
доктор медицинских наук, Дагестанский
государственный медицинский университет
mutalim338@gmail.com

Магомедов Магомед Ахмедович
кандидат медицинских наук, Дагестанский
государственный медицинский университет
magomed05@gmail.com

Абдурахманова Загидат Муталимовна
Ассистент, Дагестанский государственный
медицинский университет
Z.M.abdurakhmanova@gmail.com

Аннотация. Проведено исследование гемоциркуляции в шовных полосах анастомозов для предупреждения несостоятельности швов при резекции сигмовидной ободочной кишки по поводу кишечной непроходимости в критической зоне P. Sudeck у 15 больных основной группы. У 12 больных контрольной группы при кишечной непроходимости после резекции кишки анастомозы сформированы без исследования гемоциркуляции и без учёта критической зоны P. Sudeck. В основной группе не было несостоятельности швов анастомозов.

В контрольной группе в 2 случаях установлена несостоятельность швов межкишечного анастомоза и 5 случаев спайкообразования.

Ключевые слова: критическая зона, несостоятельность швов, спайкообразование.

Введение

До настоящего времени несостоятельность межкишечных анастомозов остается частым и обычно смертельным осложнением [1,2,3,8,10], после которой летальность достигается при кишечной непроходимости до 63 %, что является несомненно актуальной проблемой.

На основании анатомических исследований P.Sudeck [11] считал, что в ректосигмоидном отделе толстой кишки существует критическая зона. Ангиологический аспект хирургического лечения заболеваний ректосигмоидно-

го отдела толстой кишки в критической зоне P.Sudeck практически не изучено.

В литературе имеются сообщения о том, что спайкообразованию способствует не только несостоятельность швов и перитонит, но и ишемия органов брюшной полости, в частности, кишечника [8].

Профилактика несостоятельности швов межкишечных анастомозов при хирургическом лечении кишечной непроходимости в данной критической зоне и профилактика спайкообразования является актуальной проблемой.

Целью настоящей работы является исследование гемоциркуляции в шовных полосах анастомозов для предупреждения несостоятельности швов при хирургическом лечении заболеваний ректосигмоидного отдела толстой кишки в критической зоне P.Sudeck и профилактики спайкообразования в брюшной полости.

Материалы и методы исследования

В работе приведены результаты резекций кишки при кишечной непроходимости и формирования межкишечных анастомозов у 27 больных.

Из них 12 больных контрольной группы перенесли резекцию ректосигмоидного отдела толстой кишки и формирование анастомоза без исследования гемоциркуляции в швной полосе и без учёта критической зоны P.Sudeck. Основная группа составила 15 больных, которые перенесли резекцию сигмовидной ободочной кишки и формирование анастомозов с учётом критической зоны P.Sudeck, артериального и кислородного индекса жизнеспособности швной полосы, а также с введением противоспаечных средств: раствора вископлюса в брюшную полость и прозерина внутримышечно.

У 15 больных исследовано кровяное давление в интрамуральных сосудах в стенке сигмовидной ободочной кишки, у которых не было патологий кишечника для определения нормальных показателей интрамурального давления и после введения прозерина внутримышечно. Проведённые исследования показали, что после введения 1 мл. прозерина внутримышечно наблюдается статистически значимое ($P < 0,001$) повышение кровяного давления в интрамуральных сосудах сигмовидной ободочной кишки (табл. 1).

Таблица 1.

Кровяное давление в интрамуральных сосудах сигмовидной ободочной кишки до и после введения внутримышечно 1 мл. прозерина в мм рт. ст. (15 больных)

Давление $M \pm n$		Давление $M \pm n$	
В норме $n=15$		После введения прозерина $n=15$	
Интрамуральное	Общее	Интрамуральное	Общее
$75,5 \pm 0,5 / 40,3 \pm 0,5$	$120,3 \pm 1,2 / 82 \pm 0,8$	$95,5 \pm 0,8 / 60,3 \pm 0,5$ $P < 0,001$	$120,2 \pm 0,8 / 80 \pm 0,5$

Введение раствора противоспаечного средства вископлюс 1 % — 0,04 на 1 кг веса также статистически значимо ($P < 0,001$) повышает кровяное давление в интрамуральных сосудах тонкой кишки на 12 ± 1 мм.рт. ст.

Ангиотензиометрия в интрамуральных сосудах кишки проведена по методике М.З. Сигала [9] во время операций с помощью аппарата, разработанного нами [7]. За-

тем вычисляли артериальный индекс жизнеспособности швной полосы по формуле, предложенной М.Р. Рамазановым [6]:

$$АИ = \frac{(D_{\pi} + D_6) - 20}{D_c} \geq 1,$$

где D_{π} — интрамуральное давление у противобрыжеечного края кишки;

D_6 — интрамуральное давление у брыжеечного края кишки;

D_c — системное давление на плече больного по Н.С. Короткову;

АИ — артериальный индекс жизнеспособности швной полосы.

Возраст больных колебался от 23 до 72 лет. Мужчин было 16, женщин — 11.

Во время операции формировали межкишечные анастомозы атравматическим материалом полисорб, затем изучали механическую прочность межкишечных анастомозов путём введения раствора метиленового синего в просвет кишки через ректальный зонд.

Межкишечные анастомозы дренировали зондом с целью исключения воздействия внутриполостного давления на швные полосы межкишечных анастомозов.

Результаты исследования и их обсуждение

Во время операции у 10 больных обнаружен заворот сигмовидной ободочной кишки, мегадолохосигма — у 8 больных, у 9 больных — рак сигмовидной ободочной кишки. У 5 больных установлен некроз кишки с серозным перитонитом.

После лапароскопии последовательность операций была следующей.

1. Ревизия органов брюшной полости.
2. Оценка нарушения кровоснабжения в кишечной стенке с помощью трансиллюминации вследствие воздействия внутриполостного давления.
3. Трансиллюминация брыжейки кишки для исследования ангиоархитектоники экстраорганных сосудов кишки на предмет обнаружения критической зоны P.Sudeck.
4. Исследование интрамурального давления кишки и вычисление индекса жизнеспособности кишки для выбора швных полос с целью формирования межкишечного анастомоза.
5. Лигирование экстраорганных сосудов под контролем трансиллюминации.
6. Отдельный разрез передней брюшной стенки для выведения резецируемой кишки на переднюю брюшную стенку.
7. Подготовка швной полосы для формирования межкишечного анастомоза.

8. Исследование интрамурального давления и вычисление индекса жизнеспособности шовной полосы. Определение насыщения кислородом гемоглобина артериальной крови.
9. Формирование межкишечного анастомоза.
10. Дренирование брюшной полости для введения лекарственных препаратов.
11. Послойные швы на переднюю брюшную стенку.

Состояние интрамурального кровотока в стенке кишки от воздействия внутриполостного давления при кишечной непроходимости оценивалось расположением аппарата прижизненной ангиоскопии и измерения кровяного давления в сосудах полых органов, а также определения насыщения кислородом артериальной крови [5] позади исследуемой кишечной петли.

Нарушение интрамурального кровотока легкой степени считалось в случае, если изображение артерии и вены исчезало у противобрыжечного края кишки.

Расположение изображения артерии и вены в середине между брыжечным и противобрыжечными краями расценивали как нарушение интрамурального кровотока средней степени. И, наконец, расположение уровня нарушений интрамурального кровотока у брыжечного края считали как тяжелой степени.

Исследования кровяного давления в интрамуральных сосудах в зоне внутриполостной гипертензии кишки у 10 больных показали, что эти показатели статистически значимо ниже ($P < 0,0001$), чем в норме (табл.2). Показатели интрамурального давления в стенке кишки в условиях серозного перитонита у 5 больных обнаружены еще ниже ($P < 0,0001$), чем при внутриполостном давлении (табл.3). Во всех случаях шовная полоса перемещена в дистальном или проксимальном направлении, где уровень интрамурального давления был достаточным для обеспечения жизнеспособности шовной полосы. Вычисляли индекс жизнеспособности шовной полосы для оценки гемоциркуляции. При индексе жизнеспособности выше 1 в шовной полосе формировали межкишечный анастомоз.

У 15 больных основной группы сформирован межкишечный анастомоз после резекции ректосигмоидного отдела толстой кишки при интрамуральном кровяном давлении $112,1 \pm 0,7/70,6 \pm 0,8$ мм.рт.ст. в дистальной шовной полосе при системном давлении $120,7 \pm 0,7/79,2 \pm 0,6$ мм.рт.ст. В проксимальной шовной полосе интрамуральное кровяное давление составило $122,3 \pm 1,3/80,5 \pm 1,8$ мм.рт.ст. при системном давлении $120,7 \pm 1,7/79,2 \pm 0,8$ мм.рт.ст. в зоне анастомоза (табл.4).

Соотношение насыщения кислородом гемоглобина артериальной крови у брыжечного края первой сохранённой интрамуральной артерии к системному насыще-

Таблица 2.
Интрамуральное давление сигмовидной ободочной кишки в зоне внутриполостного давления и после перемещения шовной полосы в мм.рт.ст.

Давление, $m \pm m$		Давление, $m \pm m$	
В норме, $n=15$		При внутриполостном давлении, $n=10$	
Интрамуральное	Общее	интрамуральное	Общее
$86,5 \pm 0,9/60,3 \pm 0,5$	$119,3 \pm 1,2/82 \pm 0,8$	$48,4 \pm 0,6/36,3 \pm 0,6$	$120,2 \pm 0,8/80 \pm 0,6$
		После перемещения дистально шовной полосы	
		$108,5 \pm 1,2/68,4 \pm 0,8$	$122,4 \pm 1,4/79,2 \pm 0,9$
		$P < 0,001$	

Таблица 3.
Интрамуральное давление в стенке сигмовидной ободочной кишки в условиях перитонита и после перемещения места шовной полосы в мм.рт.ст.

Давление, $m \pm m$		Давление, $m \pm m$	
В норме, $n=15$		В условиях перитонита, $n=5$	
Интрамуральное	Общее	интрамуральное	Общее
$86,5 \pm 0,9/60,3 \pm 0,5$	$119,3 \pm 1,2/82 \pm 0,8$	$38,3 \pm 0,6/30,1 \pm 0,5$	$120,7 \pm 2,1/79,4 \pm 0,6$
		После перемещения шовной полосы	
		$98,6 \pm 0,8/62 \pm 1$	$120,7 \pm 2,1/79,4 \pm 0,6$
		$P < 0,001$	

нию кислородом артериальной крови на пальце кисти больного нами названо кислородным индексом шовной полосы межкишечного анастомоза. В данном случае кислородный индекс выше единицы ($92 \% : 90 \% = 1,02$).

Для профилактики образования спаек у 15 больных основной группы применили искусственную синовиальную жидкость вископлюс 1 % — 0,04 мл на 1 кг веса больного в 20 мл физиологического раствора, который вводили в брюшную полость 1 раз в неделю через микроиригатор (патент RU 2736164), установленный в области оперативного вмешательства, а прозерин вводили внутримышечно. Наши исследования показали следующее: 1) повышение кровяного давления в интрамуральных сосудах кишки после введения вископлюса и прозерина; 2) после введения вископлюса наблюдается скольжение кишечных петель, после прозерина — кишечные сокращения.

Таблица 4.

Кровяное давление в зоне межкишечного анастомоза при резекции ректосигмоидного отдела кишки толстой в критической зоне P.Sudeck в мм.рт.ст. и насыщение кислородом гемоглобина артериальной крови (15 больных)

Место замера	Кровяное давление M±n		КИ	АИ	S _{pO₂} шовной полосы	S _{pO₂} общее	Шовная полоса
	Интрамуральное	Общее					
ПБР	112,1±0,7/ 70,6±0,8	120,7±1,7/ 79,2±0,6	K>1	A>1	92 %±1	90 %±1	Дистальная
БР	121,6±0,8/ 84±1	120,7±1,7/ 79,2±0,6					
ПБР	116,3±0,6/ 80,5±1,1	120,7±1,7/ 79,2±0,8	K>1	A>1	93 %±1	90 %±1	Проксимальная
БР	122,3±1,3/ 80,5±1,8	120,7±1,7/ 79,2±0,6					

Обозначения в таблице:

ПБР — противобрыжечный край;

БР — брыжечный край;

S_{pO₂} — насыщение кислородом гемоглобина артериальной крови;

АИ — артериальный индекс жизнеспособности шовной полосы

КИ — кислородный индекс жизнеспособности шовной полосы

У 15 больных основной группы, у которых выполнена резекция ректосигмоидного отдела толстой кишки и формирование межкишечного анастомоза с исследованием гемоциркуляции в шовной полосе и не было несостоятельности швов и спайкообразования.

У 12 больных контрольной группы с формированием межкишечного анастомоза после резекции ректосигмоидного отдела толстой кишки без исследования гемоциркуляции и без учёта критической зоны P.Sudeck установлена несостоятельность швов у 2 больных и у 5 больных обнаружено спайкообразование.

Выводы

1. Внутриполостная гипертензия при кишечной непроходимости и перитонит понижает интрамуральное давление в стенке сигмовидной ободочной кишки.
2. При резекции ректосигмоидного отдела толстой кишки в условиях кишечной непроходимости необходимо учитывать критическую зону P.Sudeck.
3. Межкишечные анастомозы необходимо формировать при артериальном и кислородном индексе жизнеспособности шовных полос выше или равной 1 после резекции ректосигмоидного отдела толстой кишки при кишечной непроходимости.
4. После резекции ректосигмоидного отдела толстой кишки и формирования межкишечных анастомозов в условиях кишечной непроходимости в критической зоне P.Sudeck введение раствора вископлуса и прозерина предупреждает спайкообразование в брюшной полости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агаев Э.К. Несостоятельность швов кишечных анастомозов у больных после экстренной и неотложной резекции кишки // Хирургия. — 2012. — №1. С.34–37.
2. Дарбизгаджиев Ш.О., Баулин А.А., Удалов Ю.Д., Баулина О.А., Баулин В.А. Факторы риска и методы профилактики несостоятельности толстокишечных анастомозов. — Пенза. — 2023. — Издательство ПГУ. — 86 с.
3. Пирогов А.В. Диагностика и лечение диагностических разрывов ободочной кишки при опухолевой толстокишечной непроходимости.: дисс... канд. мед. наук. — Санкт-Петербург, 2006. — 126 с.
4. Магомедов А.М., Рамазанов М.Р., Магомедов М.А., Рамазанова М.М. Способ предупреждения спайкообразования в брюшной полости после лапароскопической хирургической операции в эксперименте. Патент № RU 2736164. Оpubл. 12.11.2020. Бюл. № 32.
5. Рамазанов М.Р., Алиев Э.А., Магомедов А.М., Нестеров М.И. Способ определения жизнеспособности шовной полосы кишки. Патент № RU 2 687650. С2. Оpubл. 15.05.2019. Бюл. № 14.
6. Рамазанов М.Р. Индекс жизнеспособности шовной полосы — XIII съезд хирургов Дагестана. Махачкала, 1994г. — С. 192–194
7. Нестеров М.И., Рамазанов М.Р., Алиев Э.А., Абдурахманова З.М., Магомедов А.М. Аппарат для исследования сосудов полых органов во время хирургической операции. Патент RU 2581266 от 20.04.2016.
8. Сафаров Б.И. Комплексная диагностика и лечение острой спаечной тонкокишечной непроходимости: автореферат дисс.к.м.н. — Душанбе. — 2023. — 24 с.
9. Сигал М.З. Трансиллюминация при операциях на полых органах. -М. «Медицина», 1974, — 183 с.
10. Kruschewski M., Rieger H., Peh Len U. et al. Risk factors for clinical anastomotic leakage and postoperative mortality in elective surgery for rectal cancer // Int. J. Colorect. Dis. — 2007. — v.22. — №8. — p.919–927.
11. Sudeck P. Ueber die Gefäßversorgung des Mastdarmes in Hinsicht auf die operative Grangran // Munch.med., Wschr. — 1907. — v.54. — S.1314.

© Магомедов Амир-Али Магомедович (mr.amirali@mail.ru); Рамазанов Муталим Рамазанович (mutalim338@gmail.com);
Магомедов Магомед Ахмедович (magomed05@gmail.com); Абдурахманова Загидат Муталимовна (Z.M.abdurakhmanova@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

КЛИНИЧЕСКИЕ ПРЕДИКТОРЫ И ФАКТОРЫ РИСКА АНТИТУБЕРКУЛЕЗНОГО ЛЕКАРСТВЕННО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПОРАЖЕНИЯ ПЕЧЕНИ У ПАЦИЕНТОВ С КО-ИНФЕКЦИЕЙ ВИЧ/ТУБЕРКУЛЕЗ

Матин Абдул

Аспирант, врач инфекционист, ФГАОУ ВО
«Российский Национальный Исследовательский
Медицинский Университет им. Н.И. Пирогова»
matinusu11@gmail.com

Никитин Игорь Геннадьевич

доктор медицинских наук, профессор, ФГАОУ ВО
«Российский Национальный Исследовательский
Медицинский Университет им. Н.И. Пирогова»
nikitin@mail.ru

CLINICAL PREDICTORS AND RISK FACTORS OF ANTI-TUBERCULOSIS DRUG- INDUCED LIVER INJURY IN PATIENTS WITH HIV/TUBERCULOSIS CO-INFECTION

**Matin Abdul
I. Nikitin**

Summary. Drug-induced liver injury remains a serious complication of anti-tuberculosis therapy in patients with human immunodeficiency virus and tuberculosis co-infection. A prospective cohort study was conducted involving 412 patients with newly diagnosed co-infection who received standard first-line anti-tuberculosis therapy. A comprehensive assessment of clinical, laboratory, demographic, and immunological parameters was performed. Genotyping of polymorphisms in drug-metabolizing enzyme genes was carried out by polymerase chain reaction. The incidence of drug-induced liver injury was 11.4 percent. Independent predictors were CD4 lymphocyte count below 200 cells per microliter, body mass index below 18.5 kilograms per square meter, concurrent use of hepatotoxic antiretroviral agents, and elevated baseline alanine aminotransferase. Slow acetylator status of N-acetyltransferase 2 was associated with a fourfold increase in hepatotoxicity risk. The predictive model demonstrated an area under the ROC curve of 0.843, indicating high predictive ability. A slow acetylator status of N-acetyltransferase 2 was associated with a fourfold increase in the risk of hepatotoxicity. The developed comprehensive predictive model demonstrated an area under the ROC curve of 0.843, indicating high predictive ability.

Keywords: drug-induced liver injury; HIV/tuberculosis co-infection; clinical predictors; anti-tuberculosis therapy; antiretroviral therapy; predictors of hepatotoxicity; internal medicine.

Аннотация. Лекарственно-индуцированное поражение печени остается серьезным осложнением противотуберкулезной терапии у пациентов с ко-инфекцией вируса иммунодефицита человека и туберкулеза. Проведено проспективное когортное исследование с участием 412 пациентов с впервые диагностированной ко-инфекцией, получавших стандартную противотуберкулезную терапию первой линии. Выполнялась комплексная оценка клинических, лабораторных, демографических и иммунологических параметров. Дополнительно проводилось генотипирование полиморфизмов генов ферментов метаболизма лекарственных средств. Частота поражения печени составила 11,4 процента. Независимыми предикторами явились уровень CD4-лимфоцитов менее 200 клеток на микролитр, индекс массы тела менее 18,5 килограмм на метр квадратный, одновременный прием гепатотоксичных антиретровирусных препаратов и повышенный исходный уровень аланинаминотрансферазы. Медленный ацетиляторный статус N-ацетилтрансферазы 2 ассоциировался с четырехкратным увеличением риска гепатотоксичности. Прогностическая модель продемонстрировала площадь под ROC-кривой 0,843. Разработанная комплексная прогностическая модель продемонстрировала площадь под ROC-кривой 0,843, что свидетельствует о высокой предсказательной способности.

Ключевые слова: лекарственно-индуцированное поражение печени; ко-инфекция ВИЧ/туберкулез; клинические предикторы; противотуберкулезная терапия; антиретровирусная терапия; предикторы гепатотоксичности; внутренние болезни.

Введение

Туберкулез остается ведущей причиной смертности среди пациентов с ВИЧ-инфекцией, несмотря на достижения в антиретровирусной терапии [1]. Приблизительно 60 процентов новых случаев туберкулеза в эндемичных регионах регистрируется среди людей, живущих с ВИЧ [2]. Одновременное назначение противотуберкулезных и антиретровирусных препаратов сопряжено с существенным риском развития анти-туберкулезного лекарственно-индуцированного пора-

жения печени, частота которого варьирует от 4 до 27 процентов [3]. Это наиболее распространенная тяжелая нежелательная реакция, приводящая к прерыванию лечения и повышению летальности до 35 процентов в течение трех месяцев после госпитализации [4]. Патогенез является многофакторным процессом, включающим образование токсичных метаболитов, окислительный стресс, митохондриальную дисфункцию и иммуноопосредованные механизмы [5]. Изониазид, рифампицин и пиразинамид обладают различными механизмами гепатотоксичности, при этом их комбинация существенно

усиливает токсическое воздействие [6]. Изониазид метаболизируется N-ацетилтрансферазой 2 с образованием ацетилизониазида, который окисляется цитохромом P450 2E1 с формированием гепатотоксичных промежуточных соединений [7]. Генетический полиморфизм ферментов метаболизма обуславливает значительную межиндивидуальную вариабельность и предрасположенность к гепатотоксичности [8].

Клинические детерминанты включают низкий индекс массы тела, женский пол, пожилой возраст, употребление алкоголя, сопутствующие заболевания печени и ко-инфекцию вирусами гепатита [9]. При ко-инфекции ВИЧ/туберкулез дополнительными факторами риска выступают низкий уровень CD4-лимфоцитов, выраженная иммуносупрессия и одновременное применение гепатотоксичных антиретровирусных препаратов [10]. Нутритивный статус играет критическую роль, поскольку белково-энергетическая недостаточность приводит к истощению резервных возможностей печени и снижению антиоксидантной защиты [11]. Глубокая иммуносупрессия ассоциируется с повышенной уязвимостью к тяжелым формам гепатотоксичности [12].

Материалы и методы

Проспективное когортное исследование проводилось на базе специализированного туберкулезного диспансера в период с января 2021 года по декабрь 2023 года. Включены 412 пациентов с впервые установленным диагнозом активного туберкулеза легких и подтвержденной ВИЧ-инфекцией, получавших стандартную противотуберкулезную терапию первой линии.

Критерии включения: возраст старше 18 лет, бактериологически подтвержденный туберкулез легких, верифицированная ВИЧ-инфекция, отсутствие лекарственной устойчивости возбудителя и информированное согласие. Критерии исключения: хронические заболевания печени, включая гепатиты В и С, цирроз печени, систематическое употребление алкоголя более 40 граммов этанола в сутки для мужчин и 20 граммов для женщин, прием гепатотоксичных препаратов помимо противотуберкулезных и антиретровирусных, повышение активности печеночных трансаминаз более чем в два раза от верхней границы нормы. Все пациенты получали стандартную схему: изониазид 5 миллиграмм на килограмм, рифампицин 10 миллиграмм на килограмм, пиразинамид 25 миллиграмм на килограмм и этамбутол 15 миллиграмм на килограмм в течение интенсивной фазы два месяца с последующим переходом на изониазид и рифампицин в течение четырех месяцев. Антиретровирусная терапия инициировалась спустя две-восемь недель после начала противотуберкулезного лечения. Предпочтительные схемы включали комбинацию ингибиторов интегразы с нуклеозидными ингибиторами обратной транскриптазы.

Мониторинг функционального состояния печени включал определение активности аланинаминотрансферазы, аспартатаминотрансферазы, щелочной фосфатазы и концентрации общего билирубина на момент включения, еженедельно в течение первого месяца, каждые две недели во второй месяц и ежемесячно далее. Регистрировались клинические симптомы: желтуха, тошнота, рвота, абдоминальный дискомфорт. Проводилась оценка антропометрических показателей, включая индекс массы тела, нутритивный статус. Иммунологический статус оценивался определением абсолютного количества CD4-лимфоцитов методом проточной цитометрии, вирусной нагрузки ВИЧ методом полимеразной цепной реакции. Антитуберкулезное лекарственно-индуцированное поражение печени определялось согласно критериям Американского торакального общества: повышение аланинаминотрансферазы более чем в пять раз относительно верхней границы нормы, либо повышение аланинаминотрансферазы более чем в три раза в сочетании с клинической симптоматикой, либо повышение общего билирубина более чем в два раза при любом увеличении активности печеночных ферментов. Осуществлялось генотипирование полиморфизмов генов NAT2, CYP2E1, GSTM1 и GSTT1 путем забора венозной крови до начала терапии. Выделение геномной дезоксирибонуклеиновой кислоты проводилось методом сорбции на силикагеле.

Статистический анализ выполнялся с использованием SPSS версии 26.0, включая описательную статистику, однофакторный и многофакторный логистический регрессионный анализ для идентификации независимых предикторов, ROC-анализ для оценки дискриминационной способности прогностических моделей и построение номограмм. Количественные показатели сравнивались критерием Стьюдента для нормально распределенных данных и критерием Манна-Уитни для данных с отличным от нормального распределением. Качественные признаки сравнивались критерием хи-квадрат Пирсона или точным критерием Фишера. Статистически значимыми считались различия при значении вероятности ошибки менее 0,05.

Результаты исследования

Из 412 пациентов с ко-инфекцией ВИЧ/туберкулез антитуберкулезное лекарственно-индуцированное поражение печени развилось у 47 человек, что составило 11,4 процента. Средний возраст составил 37,8 плюс минус 9,2 года, мужчины составляли 68,7 процента. Пациенты с гепатотоксичностью характеризовались статистически значимо более низким индексом массы тела, более выраженной иммуносупрессией с медианой CD4-лимфоцитов 147 клеток на микролитр по сравнению с 312 клетками на микролитр в группе без гепатотоксичности, а также более высокой исходной активностью печеночных трансаминаз (таблица 1).

Таблица 1.

Демографические и клинические характеристики пациентов исследуемых групп

Показатель	Группа с ДИПП (n=47)	Группа без ДИПП (n=365)	p-значение
Возраст, годы (M±SD)	39,4±10,1	37,5±9,0	0,163
Мужской пол, n (%)	31 (66,0)	252 (69,0)	0,673
ИМТ, кг/м ² (M±SD)	17,8±2,3	20,4±3,1	<0,001
CD4-лимфоциты, кл/мкл (Me [Q1;Q3])	147 [89;218]	312 [198;467]	<0,001
Вирусная нагрузка ВИЧ, log копий/мл (M±SD)	5,2±0,8	4,9±1,1	0,089
АЛТ исходная, Ед/л (Me [Q1;Q3])	38 [26;52]	28 [20;36]	<0,001
АСТ исходная, Ед/л (Me [Q1;Q3])	41 [29;58]	30 [23;39]	<0,001
Билирубин общий исходный, мкмоль/л (M±SD)	12,4±3,8	11,2±3,2	0,023
Гемоглобин, г/л (M±SD)	104±18	112±16	0,002
Употребление алкоголя, n (%)	9 (19,1)	52 (14,2)	0,387
Курение, n (%)	28 (59,6)	215 (58,9)	0,930
АРВТ на момент включения, n (%)	19 (40,4)	168 (46,0)	0,485

Примечание: ДИПП — антитуберкулезное лекарственно-индуцированное поражение печени; ИМТ — индекс массы тела; АЛТ — аланинаминотрансфераза; АСТ — аспартатаминотрансфераза; АРВТ — антиретровирусная терапия; M±SD — среднее арифметическое и стандартное отклонение; Me [Q1;Q3] — медиана и интерквартильный размах.

Временные характеристики развития антитуберкулезного лекарственно-индуцированного поражения печени: 53,2 процента случаев зарегистрированы в течение первых двух недель, 78,7 процента к концу первого месяца, 91,5 процента в течение первых восьми недель терапии. Тяжелое течение с повышением аланинаминотрансферазы более чем в десять раз наблюдалось у 25,5 процента случаев. Летальный исход от острой печеночной недостаточности зарегистрирован у двух пациентов (внутригрупповая летальность 4,3 процента). Распределение ацетиляторного статуса N-ацетилтрансферазы 2 (таблица 2): быстрые ацетиляторы 28,4 процента, промежуточные 47,8 процента, медленные 23,8 процента. В группе с гепатотоксичностью доля медленных ацетиляторов достигала 57,4 процента,

статистически значимо превышая 19,2 процента в группе без гепатотоксичности. Отношение шансов развития поражения печени у медленных ацетиляторов по сравнению с быстрыми составило 6,06 (95-процентный доверительный интервал 2,53–14,52).

Таблица 2.

Распределение генотипов полиморфных генов ферментов метаболизма в исследуемых группах

Генотип/Фенотип	Группа с ДИПП (n=47)	Группа без ДИПП (n=365)	ОШ (95% ДИ)	p-значение
NAT2 ацетиляторный статус				
Быстрый ацетилятор	7 (14,9 %)	110 (30,1 %)	1,0 (референс)	—
Промежуточный ацетилятор	13 (27,7 %)	185 (50,7 %)	1,10 (0,44–2,79)	0,833
Медленный ацетилятор	27 (57,4 %)	70 (19,2 %)	6,06 (2,53–14,52)	<0,001
CYP2E1 генотип				
c1/c1 (дикий тип)	29 (61,7 %)	248 (67,9 %)	1,0 (референс)	—
c1/c2 (гетерозигота)	14 (29,8 %)	97 (26,6 %)	1,23 (0,63–2,42)	0,543
c2/c2 (гомозигота)	4 (8,5 %)	20 (5,5 %)	1,71 (0,55–5,33)	0,354
GSTM1 генотип				
Присутствует	25 (53,2 %)	230 (63,0 %)	1,0 (референс)	—
Делеция (null)	22 (46,8 %)	135 (37,0 %)	1,50 (0,82–2,74)	0,186
GSTT1 генотип				
Присутствует	32 (68,1 %)	275 (75,3 %)	1,0 (референс)	—
Делеция (null)	15 (31,9 %)	90 (24,7 %)	1,43 (0,75–2,75)	0,277
GSTM1/GSTT1 двойная делеция				
Нет	37 (78,7 %)	316 (86,6 %)	1,0 референс	—
Да	10 (21,3 %)	49 (13,4 %)	1,74 (0,82–3,71)	0,150

Примечание: ДИПП — антитуберкулезное лекарственно-индуцированное поражение печени; NAT2 — N-ацетилтрансфераза 2; CYP2E1 — цитохром P450 2E1; GSTM1 — глутатион-S-трансфераза M1; GSTT1 — глутатион-S-трансфераза T1; ОШ — отношение шансов; ДИ — доверительный интервал.

Полиморфизмы гена CYP2E1 не продемонстрировали статистически значимой ассоциации с риском развития антитуберкулезного лекарственно-индуцированного поражения печени в исследуемой когорте. Частота встречаемости гетерозиготного генотипа c1/c2 составила 29,8 процента в группе с гепатотоксичностью и 26,6 процента в группе без гепатотоксичности, при этом отношение шансов составило 1,23 при отсутствии статистической значимости. Аналогичным образом, полиморфизмы генов глутатион-S-трансферазы GSTM1 и GSTT1, несмотря на тенденцию к повышению риска при носительстве делеционных вариантов, не достигли уровня статистической значимости в качестве независимых предикторов гепатотоксичности в данной популяции. Однако следует отметить, что комбинированное носительство двойной делеции GSTM1 и GSTT1 демонстрировало тенденцию к увеличению риска с отношением шансов 1,74, что может свидетельствовать о потенциальном синергическом эффекте нарушения детоксикационных механизмов.

Многофакторный логистический регрессионный анализ позволил идентифицировать независимые предикторы развития антитуберкулезного лекарственно-индуцированного поражения печени у пациентов с ко-инфекцией ВИЧ/туберкулез, результаты которого представлены в таблице 3. В финальную модель были включены факторы, продемонстрировавшие статистическую значимость при однофакторном анализе или клиническую релевантность для развития гепатотоксичности. Медленный ацетиляторный статус N-ацетилтрансферазы 2 остался наиболее мощным независимым предиктором с скорректированным отношением шансов 4,21 при 95-процентном доверительном интервале от 1,89 до 9,37. Уровень CD4-лимфоцитов менее 200 клеток на микролитр ассоциировался с трехкратным увеличением риска развития гепатотоксичности с отношением шансов 3,14. Индекс массы тела менее 18,5 килограмм на метр квадратный, соответствующий критериям белково-энергетической недостаточности, демонстрировал скорректированное отношение шансов 2,67, что подчеркивает роль нутритивного статуса в патогенезе лекарственно-индуцированного поражения печени.

Повышенная исходная активность аланинаминотрансферазы более 40 единиц на литр также явилась значимым независимым предиктором с отношением шансов 2,34, что свидетельствует о важности оценки функционального состояния печени перед инициацией противотуберкулезной терапии. Одновременное применение гепатотоксичных антиретровирусных препаратов, к которым были отнесены нуклеозидные ингибиторы обратной транскриптазы первого поколения и ингибиторы протеазы, увеличивало риск развития гепатотоксичности в 2,18 раза. Женский пол демон-

Таблица 3.

Многофакторный логистический регрессионный анализ независимых предикторов антитуберкулезного ДИПП

Предиктор	Скорректированное ОШ	95% ДИ	p-значение
Медленный ацетилятор NAT2	4,21	1,89–9,37	<0,001
CD4-лимфоциты <200 кл/мкл	3,14	1,52–6,48	0,002
ИМТ <18,5 кг/м ²	2,67	1,24–5,73	0,012
Исходная АЛТ >40 Ед/л	2,34	1,15–4,76	0,019
Гепатотоксичная АРВТ	2,18	1,06–4,49	0,034
Женский пол	1,87	0,94–3,73	0,075
Возраст >50 лет	1,64	0,71–3,79	0,245
Гемоглобин <100 г/л	1,58	0,78–3,21	0,203

Примечание: ДИПП — антитуберкулезное лекарственно-индуцированное поражение печени; ОШ — отношение шансов; ДИ — доверительный интервал; NAT2 — N-ацетилтрансфераза 2; ИМТ — индекс массы тела; АЛТ — аланинаминотрансфераза; АРВТ — антиретровирусная терапия. В модель включены переменные с $p < 0,10$ при однофакторном анализе. Площадь под ROC-кривой модели составила 0,843 (95 % ДИ: 0,788–0,898).

стрировал тенденцию к повышению риска с отношением шансов 1,87, однако данная ассоциация не достигла уровня статистической значимости в многофакторной модели. Дискриминационная способность разработанной прогностической модели, оцениваемая по площади под ROC-кривой, составила 0,843 с 95-процентным доверительным интервалом от 0,788 до 0,898, что свидетельствует о высокой предсказательной точности модели и возможности ее применения для стратификации риска в клинической практике внутренних болезней. На основании выявленных независимых предикторов была разработана балльная шкала риска развития антитуберкулезного лекарственно-индуцированного поражения печени, представленная в таблице 4. Каждому предиктору присваивался балл, пропорциональный его вкладу в общий риск согласно коэффициентам логистической регрессии. Пациенты стратифицировались на группы низкого, умеренного, высокого и очень высокого риска в зависимости от суммарного количества баллов. В группе низкого риска, объединявшей пациентов с суммой баллов от 0 до 2, частота развития гепатотоксичности составила 2,8 процента. Группа умеренного риска с суммой баллов от 3 до 5 характеризовалась частотой гепатотоксичности 8,4 процента. Пациенты группы высокого риска с суммой баллов от 6 до 8 демонстрировали частоту развития антитуберкулезного лекарственно-индуцированного поражения печени 24,6 процента. Наконец, группа очень высокого риска, включавшая пациентов с суммой баллов 9 и более, характеризовалась частотой

гепатотоксичности 48,3 процента, что требует особенно тщательного мониторинга функции печени и рассмотрения альтернативных терапевтических стратегий.

Таблица 4.

Балльная шкала риска развития антитуберкулезного ДИПП при ВИЧ/ТБ ко-инфекции

Фактор риска	Баллы
NAT2 ацетиляторный статус	
Быстрый ацетилятор	0
Промежуточный ацетилятор	1
Медленный ацетилятор	4
CD4-лимфоциты	
≥200 кл/мкл	0
<200 кл/мкл	3
Индекс массы тела	
≥18,5 кг/м ²	0
<18,5 кг/м ²	2
Исходная АЛТ	
≤40 Ед/л	0
>40 Ед/л	2
Антиретровирусная терапия	
Не гепатотоксичная	0
Гепатотоксичная	2
Категория риска (сумма баллов)	Частота ДИПП
Низкий риск (0–2 балла)	2,8 %
Умеренный риск (3–5 баллов)	8,4 %
Высокий риск (6–8 баллов)	24,6 %
Очень высокий риск (≥9 баллов)	48,3 %

Примечание: ДИПП — антитуберкулезное лекарственно-индуцированное поражение печени; NAT2 — N-ацетилтрансфераза 2; АЛТ — аланинаминотрансфераза. Баллы рассчитаны на основе коэффициентов многофакторной логистической регрессии. Максимальная сумма баллов — 13.

Анализ биохимических параметров продемонстрировал преимущественно гепатоцеллюлярный тип повреждения с медианным соотношением аланинаминотрансферазы к щелочной фосфатазе, превышающим 5. Холестатический и смешанный типы составляли 12,8 и 19,1 процента. У 78,7 процента пациентов отмечалась полная нормализация активности печеночных трансаминаз в течение четырех-восьми недель после отмены

гепатотоксичных препаратов, что подтверждает причинно-следственную связь согласно шкале RUCAM. Клиническое течение характеризовалось значительной вариабельностью: бессимптомное течение у 42,6 процента пациентов, желтуха у 31,9 процента, диспептические расстройства у 57,4 процента, системные проявления у 14,9 процента, ассоциированные с более тяжелым течением и худшим прогнозом. Результаты обосновывают целесообразность комплексной оценки клинических, иммунологических и метаболических факторов риска для идентификации лиц с повышенным риском гепатотоксичности, требующих усиленного мониторинга или рассмотрения альтернативных терапевтических режимов. Необходим мультидисциплинарный подход с взаимодействием инфекционистов, фтизиатров, гепатологов и клинических фармакологов для оптимизации терапевтических стратегий и минимизации риска жизнеугрожающих осложнений.

Заключение

Результаты демонстрируют, что антитуберкулезное лекарственно-индуцированное поражение печени представляет серьезное осложнение у пациентов с ко-инфекцией ВИЧ/туберкулез, встречающееся в 11,4 процента случаев с потенциально жизнеугрожающими последствиями, включая острую печеночную недостаточность и летальный исход. Данные свидетельствуют о многофакторной природе, при которой клинические детерминанты взаимодействуют с иммунологическими и метаболическими факторами риска. Выраженная иммуносупрессия с уровнем CD4-лимфоцитов менее 200 клеток на микролитр идентифицирована как критический клинический предиктор, позволяющий стратифицировать пациентов по степени риска на этапе планирования терапии. Белково-энергетическая недостаточность с индексом массы тела ниже 18,5 килограмм на метр квадратный продемонстрировала независимую ассоциацию с повышенным риском гепатотоксичности. Одновременное применение гепатотоксичных антиретровирусных препаратов создает дополнительную метаболическую нагрузку, что требует предпочтительного использования схем на основе ингибиторов интегразы с более благоприятным профилем безопасности. Медленный ацетиляторный статус N-ацетилтрансферазы 2 обуславливает более чем четырехкратное увеличение риска печеночного повреждения. Разработанная балльная шкала риска продемонстрировала высокую дискриминационную способность с площадью под ROC-кривой 0,843. Частота гепатотоксичности варьирует от 2,8 процента в группе низкого риска до 48,3 процента в группе очень высокого риска. Преимущественно гепатоцеллюлярный паттерн повреждения отражает прямое токсическое воздействие реактивных метаболитов на гепатоциты. Критический период первых восьми недель, на который приходится более 90 процентов случаев

гепатотоксичности, определяет необходимость максимально интенсивного мониторинга. Внедрение системы стратификации риска позволит оптимизировать тактику ведения, обеспечивая дифференцированный подход к мониторингу. Пациенты группы высокого и очень

высокого риска требуют еженедельного контроля печеночных показателей в течение первых двух месяцев терапии и готовности к быстрой модификации схемы. Необходим мультидисциплинарный подход с привлечением специалистов различных профилей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Boyles T., Berhanu R.H., Gogela N., Gomes H., Levin T., Mendelson N., Pretorius A., Reid H., Rossouw L., Swanepoel P., Wasserman C., Maartens M.-Y. Management of drug-induced liver injury in people with HIV treated for tuberculosis: 2024 update // *South African Journal of HIV Medicine*. — 2024. — Vol. 25, № 1. — P. a1558. DOI: 10.4102/sajhivmed.v25i1.1558
2. World Health Organization. Global tuberculosis report 2023. — Geneva: WHO, 2023.
3. Schutz C., Marais S., Burton R., Harms G., Kenyon C., Maartens G. Burden of antituberculosis and antiretroviral drug-induced liver injury at a secondary hospital in South Africa // *South African Medical Journal*. — 2012. — Vol. 102, № 6. — P. 506–511. DOI: 10.7196/SAMJ.5650
4. Saukkonen J.J., Cohn D.L., Jasmer R.M., Schenker S., Jereb J.A., Nolan C.M., Peloquin C.A., Gordin F.M., Nunes D., Strader D.B., Bernardo J., Venkataraman R., Sterling T.R. An official ATS statement: Hepatotoxicity of antituberculosis therapy // *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. — 2006. — Vol. 174, № 8. — P. 935–952. DOI: 10.1164/rccm.200510-1666ST
5. Habtewold A., Amogne W., Makonnen E., Yimer G., Nyagero J., Bertilsson L., Burhenne J., Diczfalussy U., Aklillu E. Anti-Tuberculosis Drug Induced Hepatotoxicity among TB/HIV Co-Infected Patients at Jimma University Hospital, Ethiopia: Nested Case-Control Study // *PLoS ONE*. — 2013. — Vol. 8, № 5. — P. e64622. DOI: 10.1371/journal.pone.0064622
6. Yimer G., Ueda N., Habtewold A., Amogne W., Suda A., Riedel K.D., Burhenne J., Aderaye G., Lindquist L., Makonnen E., Aklillu E. Pharmacogenetic and pharmacokinetic biomarker for efavirenz based ARV and rifampicin based anti-TB drug induced liver injury in TB-HIV infected patients // *PLoS ONE*. — 2011. — Vol. 6, № 12. — P. e27810. DOI: 10.1371/journal.pone.0027810
7. Cho H.-J., Koh W.-J., Ryu Y.-J., Ki C.-S., Nam M.-H., Kim J.-W., Lee S.-Y. Genetic polymorphisms of NAT2 and CYP2E1 associated with antituberculosis drug-induced hepatotoxicity in Korean patients with pulmonary tuberculosis // *Tuberculosis (Edinburgh, Scotland)*. — 2007. — Vol. 87, № 6. — P. 551–556. DOI: 10.1016/j.tube.2007.05.012
8. Cai Y., Yi J., Zhou C., Shen X. Pharmacogenetic Study of Drug-Metabolising Enzyme Polymorphisms on the Risk of Anti-Tuberculosis Drug-Induced Liver Injury: A Meta-Analysis // *PLoS ONE*. — 2012. — Vol. 7, № 10. — P. e47769. DOI: 10.1371/journal.pone.0047769
9. Khan S., Mandal R.K., Elsbali A.M., Dar S.A., Jawed A., Wahid M., Mahto H., Lohani M., Mishra B.N., Akhter N., Rabaan A.A., Haque S. Pharmacogenetic association between NAT2 gene polymorphisms and isoniazid induced hepatotoxicity: trial sequence meta-analysis as evidence // *Bioscience Reports*. — 2019. — Vol. 39, № 1. — P. BSR20180845. DOI: 10.1042/BSR20180845
10. Singla N., Gupta D., Birbian N., Singh J. Association of NAT2, GST and CYP2E1 polymorphisms and anti-tuberculosis drug-induced hepatotoxicity // *Tuberculosis (Edinburgh, Scotland)*. — 2014. — Vol. 94, № 3. — P. 293–298. DOI: 10.1016/j.tube.2014.02.003
11. Liu Q., Huang L., Yan H., Zong Z., Chen Z., Wu X., Chen L., Lan Y. Clinical risk factors for moderate and severe antituberculosis drug-induced liver injury // *Frontiers in Pharmacology*. — 2024. — Vol. 15. — Article 1406454. DOI: 10.3389/fphar.2024.1406454
12. Zhang S., Dong N., Wang L., Lu Y., Chen X. Clinical Features of Anti-Tuberculosis Drug-Induced Liver Injury and Related Risk Factors: A Retrospective Study from a Large TB Centre in China // *Infection and Drug Resistance*. — 2025. — Vol. 18. — P. 179–191. DOI: 10.2147/IDR.S493241
13. Bizuneh F.K., Bizuneh T.K., Masresha S.A., Kidie A.A., Arage M.W., Sirage N., Abate B.B. Tuberculosis-associated mortality and risk factors for HIV-infected population in Ethiopia: a systematic review and meta-analysis // *Frontiers in Public Health*. — 2024. — Vol. 12. — Article 1386113. DOI: 10.3389/fpubh.2024.1386113
14. Gedefie A., Seid A., Molla Fenta G., Tilahun M., Shibabaw A., Ali A. Predictors of severe hepatotoxicity among retroviral infected adults on HAART regimen in Ilubabor Zone, Southwest Ethiopia // *Scientific Reports*. — 2024. — Vol. 14, № 1. — Article 8539. DOI: 10.1038/s41598-024-57900-7
15. Gandhi R.T., Landovitz R.J., Sax P.E., и др. Antiretroviral Drugs for Treatment and Prevention of HIV in Adults: 2024 Recommendations of the International Antiviral Society-USA Panel // *JAMA*. — 2024. DOI: 10.1001/jama.2024.24543
16. Mushanyama T., Khabo P., Chihota B., Mulenga W., Meyer A.-C., Machona M., Adeniyi O.V. HIV–TB Coinfection: Current Therapeutic Approaches and Drug Interactions // *Pharmaceuticals*. — 2024. — Vol. 17, № 3. — Article 390. DOI: 10.3390/ph17030390
17. Alisson R.G. и др. Drug-induced liver injury: A 2023 update // *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B: Critical Reviews*. — 2023. — Vol. 26, № 8. — P. 488–527. DOI: 10.1080/10937404.2023.2261848
18. Li L., Chen Y., Li W., Jiang W., Zhu H., Duan Y., Li Z., Zhou Y., Gao S., Wang M., Zheng Y. Research Progress of Pharmacogenomics in Drug-Induced Liver Injury // *Frontiers in Pharmacology*. — 2021. — Vol. 12. — Article 735260. DOI: 10.3389/fphar.2021.735260

© Матин Абдул (matinusu11@gmail.com); Никитин Игорь Геннадьевич (nikitin@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВРОЖДЕННАЯ АНОМАЛИЯ РАЗВИТИЯ МОЧЕВЫВОДЯЩИХ ПУТЕЙ

CONGENITAL MALFORMATION URINARY TRACT

**A. Popova
B. Sklyarov
P. Machalin
A. Kardanov
A. Skobeleva**

Summary. The aim of this study was to theoretically substantiate and study the effect of immunosuppressive therapy on the clinical effectiveness of drugs aimed at reducing creatinine levels and maintaining body functions. As part of the work, a comprehensive analysis of various medicines, their impact on clinical indicators and the overall effectiveness of therapy was carried out. The experimental results showed a positive effect of immunosuppressive therapy and the studied drugs on creatinine reduction, which confirms their importance in clinical practice. The data obtained can serve as a basis for further research and the development of recommendations for optimizing immunosuppressive therapy in patients with impaired renal function.

Keywords: anomaly, vesicoureteral-pelvic reflux, creatinine, urea, immunosuppressive therapy, obstructive megaureter.

Попова Анастасия Георгиевна

ТГУ им. Державина, г. Тамбов
anasteusha_00@mail.ru

Скляр Богда Александрович

Врач-ординатор, Российский национальный
исследовательский медицинский университет
имени Н.И. Пирогова, г. Москва
b.sklyarov@mail.ru

Мачалин Павел Александрович

Врач-уролог, Городская клиническая
больница им. С.С. Юдина г. Москвы
machalin.pavel@gmail.com

Карданов Ахмед Мухамедович

Врач-ординатор, РНИМУ им. Н.И. Пирогова, г. Москва
kardanovakhmed@mail.ru

Скобелева Анна Александровна

Ассистент, ТГУ им Державина, г. Тамбов
sheine17@yandex.ru

Аннотация. В данном исследовании была поставлена цель теоретически обосновать и изучить влияние иммуносупрессивной терапии на клиническую эффективность препаратов, направленных на снижение уровня креатинина и поддержание функций организма. В рамках работы проведен комплексный анализ различных лекарственных средств, их воздействие на клинические показатели и общую эффективность терапии. Результаты эксперимента показали положительное влияние иммуносупрессивной терапии и изучаемых препаратов на снижение креатинина, что подтверждает их значимость в клинической практике. Полученные данные могут служить основой для дальнейших исследований и разработки рекомендаций по оптимизации иммуносупрессивной терапии у пациентов с нарушениями функции почек.

Ключевые слова: аномалия, пузырно-мочеточниково-лоханочный рефлюкс, креатинин, мочевины, иммуносупрессивная терапия, обструктивный мегауретер.

Введение

Аномалии — это отклонение от нормального строения организма, возникающее в процессе внутриутробного развития или, реже, послеутробного развития. Они занимают значительное место среди врожденных патологий человека (около 30 %) [1]. Частота врожденных пороков вариабельна и зависит от критериев отнесения состояний к порокам, включая иногда даже врожденные опухоли [2]. Врожденную опухоль можно выявить внутриутробно либо в течение первых трёх месяцев жизни ребёнка. Их доля невелика — около 1,5–2 %, встречаемость колеблется от 1 случая на 12 500 до 1 на 27 500 новорождённых [3].

Детская урология-андрология существенно отличается от урологии-андрологии взрослых, что связано прежде всего с преимущественно врождённым характером патологии и анатомо-физиологическими особенностями организма ребёнка. По количеству и разнообразию аномалий развития органов мочевой системы занимают первое место среди пороков всех органов и систем, их удельный вес среди всех эмбрио- и фетопатий превышает 40 % [4]. В развитии окончательной почки большое значение имеет семейство генов PAX. При мутации гена PAX2 у человека может развиваться заболевание, при котором имеют место почечная дисплазия, пузырно-мочеточниковый рефлюкс (ПМР) [5].

Пузырно-мочеточниковый рефлюкс (ПМР) — процесс патологического заброса мочи из мочевого пузыря обратно по мочеточникам в лоханки и чашечки почек. Является частым пороком мочевого пузыря у детей (0,4–1,8 %) [6]. Первичный ПМР возникает вследствие врожденной аномалии пузырноуретерального соустья, вторичный рефлюкс вызывается повышением внутрипузырного давления из-за анатомической или функциональной инфравезикальной обструкции, так же он возникает на фоне воспалительных заболеваний мочевого пузыря, происходит развитие пиелонефрита, повреждается почка и происходит образование рубцов [7].

Выбор метода лечения во многом зависит от причины нарушения функции пузырно-уретерального сегмента (порок развития, хронический воспалительный процесс в мочевом пузыре или сочетание этих факторов). В подавляющем большинстве наблюдений, по данным цистоскопического исследования и интраоперационного осмотра мочевого пузыря, причиной ПМР в гипоплазированную почку служит порок развития мочеточника. В случае констатации хронического цистита (чаще встречается у девочек) как одной из причин возникновения ПМР больным исходно следует проводить консервативную терапию, направленную на ликвидацию воспалительного процесса в мочевом пузыре при постоянном контроле за функциональным состоянием почки. Одновременно при показаниях проводится лечение вульвовагинита. Вопрос выбора тактики лечения в каждом конкретном случае решается индивидуально.

Показаниями к консервативному лечению служат:

- интермиттирующий ПМР в гипоплазированную почку или в обе почки;
- ПМР I–II степени в гипоплазированную почку или в обе почки. При выявлении инфравезикальной обструкции сначала выполняется операция, направленная на ее ликвидацию. В отсутствие положительного эффекта от консервативного лечения в течение 6–8 месяцев или при отрицательной динамике показано оперативное лечение.

Показания к проведению антирефлюксных операций:

- отсутствие эффекта от консервативной терапии при интермиттирующем ПМР в гипоплазированную почку или в обе почки, ПМР I–II степени в гипоплазированную почку или в обе почки;
- наличие ПМР III–V степени в гипоплазированную почку или в обе почки. При двустороннем ПМР антирефлюксная операция выполняется одномоментно.

Показания к нефруретерэктомии в детском возрасте рассматриваются в следующих клинических ситуациях:

- полная потеря функции гипоплазированной почкой;

- сочетание нескольких неблагоприятных прогностических признаков, определяющих исход лечения: значительное уменьшение размеров гипоплазированной почки (менее 30% возрастной нормы), тяжелая степень нарушения функции аномальной почки (снижение вклада в общее накопление менее 10 %), наличие ультразвуковых и рентгенологических признаков вторичного сморщивания гипоплазированной почки, выраженное нарушение уродинамики, частые (более 4 раз в год) и тяжелые атаки пиелонефрита, не поддающиеся консервативной терапии [8].

Врожденный мегауретер — расширение мочеточника, сопровождающееся нарушением его опорожнения, нередко приводит к значительному нарушению функции почек с исходом в хроническую болезнь почек, особенно при двустороннем поражении [9]. Под первичным обструктивным мегауретером (ПОМУ) понимают врожденное расширение мочеточника, развившееся в результате функционального или органического препятствия в самой стенке предпузырного сегмента мочеточника при доказанном отсутствии пузырно-мочеточникового рефлюкса (ПМР), инфравезикальной обструкции, неврогенных дисфункций мочевого пузыря [10]. Первичный обструктивный мегауретер (ПОМ) возникает из-за нарушения строения нижнего отдела мочеточника, приводящего к сужению мочеиспускательного канала и последующему расширению мочевых путей с ухудшением функции поражённой почки. Распространенность ПОМ составляет 15–25 % среди обструктивных поражений мочевых путей. Наиболее эффективным методом лечения считается реимплантация мочеточника с антирефлюксной защитой. Несмотря на внедрение современных малоинвазивных технологий, единого подхода к выбору оптимального способа оперативного вмешательства у маленьких детей пока нет. Необходимы дальнейшие научные исследования для разработки стандартизированных протоколов лечения, эффективность которых была бы доказана клиническими испытаниями [11].

Иммунотропные лекарственные средства — это класс препаратов, влияющих на иммунные реакции через воздействие на иммунокомпетентные клетки. Они делятся на иммуностимуляторы, иммуносупрессоры и иммуномодуляторы, которые корректируют отдельные звенья иммунного ответа [12].

Лапароскопическая донорская нефрэктомия (ЛДНЭ) имеет преимущества перед открытой операцией, включая менее выраженный послеоперационный болевой синдром и более короткий восстановительный период, при равных показателях функции аллотрансплантата. Несмотря на технические усовершенствования, ЛДНЭ остается сложной процедурой, требующей высокой

квалификации хирурга и глубокого знания анатомии почечных сосудов. Необходимо соблюдать стандарты безопасности для донора и получения функционирующего аллотрансплантата. Хотя ЛДНЭ занимает больше времени и требует дополнительных ресурсов, затраты могут компенсироваться меньшей продолжительностью госпитализации и нетрудоспособности. С момента внедрения ЛДНЭ число трансплантаций от живых доноров увеличилось более чем на 100 % в специализированных учреждениях [13].

Цель. На примере пациентки исследовать, как снизить риск инфекций, особенно учитывая состояние после трансплантации.

Материал и методы. Инструментальное исследование:

1. Ультразвуковое исследование почек, Цель исследования: Определение размеров почек.
2. Ультразвуковое исследование трансплантата почки, Цель исследования: Определение размеров трансплантата.
3. ЭКГ, Цель исследования: Оценка сердечной активности.
4. Ультразвуковое исследование мочевыводящих путей Цель исследования: Определение размера
5. Ультразвуковое исследование почечных артерий

Цель исследования: исключить тромбоз сосудов.

Лабораторное исследование:

1. Мочевина.
2. Мочевая кислота.
3. Креатин
4. Клинический анализ крови.
5. Клинический анализ мочи.
6. Общий калий, магний, натрий и кальций.
7. Неорганический фосфор.
8. Глюкоза.
9. Альфа-амилаза.
10. Холестерин.
11. Белковые фракции.

Результаты исследования

Пациент возраста 28 лет, родился в 1997 г. Жалобы пациентки. Боли в низу живота, слабость, головная боль. Анамнез жизни: Место рождения — Московская область. г. Люберцы. Образование: высшее. Бытовые условия: Нормальные. Наследственный анамнез: неизвестно.

Анамнез заболевания: по результатам проведенной работы — опроса, анализа амбулаторных карт и физического осмотра — удалось оценить динамическую картину заболевания.

В детском возрасте была выявлена врожденная аномалия развития мочевыводящих путей: пузырно-мочеточниковый рефлюкс и правосторонний обструктивный мегаурет. В 1998 году, в возрасте одного года, пациент находился в нефрологическом отделении №1 (патология трансплантированной почки) Городской клинической больницы №52 (ГКБ №52) в Москве, где была выполнена нефрэктомия справа в связи с развитием гнойных осложнений на фоне врожденных патологий. В дальнейшем у пациента наблюдалось рецидивирующее течение пиелонефрита единственной левой почки (Пиелонефрит — это неспецифическое инфекционное заболевание почек, вызываемое различными бактериями. Острая форма заболевания проявляется повышением температуры, симптомами интоксикации и болями в поясничной области.).

В 2017 году была выполнена аллогенная трансплантация трупной почки. После трансплантации развилась прогрессирующая дисфункция трансплантата, в связи с чем была проведена биопсия, которая выявила острый канальцевый некроз и сосудистое отторжение. Для лечения была проведена пульс-терапия метипредом и введение тимоглобулина в дозе 1,5 мг/кг в сутки в течение 3–14 дней. Уровень креатинина снизился с 600 до 300 мкмоль/л за две недели. Однако была отмечена лейкопения, что привело к отмене ММФ (микофенолата мофетил — иммунодепрессивное средство). По данным УЗДГ (Допплерография — это ультразвуковое обследование сосудов.) сосудов были выявлены признаки стеноза артерии, после чего было проведено стентирование артерии трансплантата, что способствовало снижению уровня креатинина до 200 мкмоль/л.

В мае 2019 года у пациента наблюдалось снижение диуреза и появление отеков. Уровень креатинина составил 185 мкмоль/л, мочевина — 15,3 ммоль/л. При обследовании была выявлена острая задержка мочи; при дренировании было эвакуировано 900 мл мочи. Урологом была диагностирована хроническая задержка мочи и дисфункция органов малого таза. Пациенту был назначен калимин в дозе 1–3 таблетки (60–180 мг) 2–4 раза в день в течение недели. Через две недели при выписке уровень креатинина составил 179 мкмоль/л, функция трансплантата находилась на уровне 200–250 мкмоль/л.

В феврале 2020 года пациент был госпитализирован в нефрологическое отделение №1 из-за повышения артериального давления до 180/110 мм рт. ст., так как проблемы с почками могут вызывать гипертонию. По лабораторным данным за период с мая 2019 года по февраль 2020 года были отмечены гипонатриемия (121 мкмоль/л), гиперурикемия (602 мкмоль/л), уровень креатинина — 397 мкмоль/л и тяжелая железодефицитная анемия (Hb 70 г/л, железо 2,6 мкмоль/л). По данным УЗДС (ультразвуковое дуплексное сканирование — метод ультразвукового исследования, который позволяет

дать оценку состоянию кровеносных сосудов и кровотоку в них.) артерии были полностью проходимы. Также у пациента отмечались боли в голеностопном суставе и отёки; был диагностирован подагрический артрит, проводилась гипоурикемическая терапия (это лечение подагры с помощью препаратов, снижающих уровень мочевой кислоты. Цели такой терапии: снижение мочевой кислоты до целевого уровня (0,36 ммоль/л); уменьшение очагов накопления уратов в организме; снижение размеров тофусов; сокращение частоты приступов подагрического артрита.). При выписке уровень креатинина составил 231 мкмоль/л.

В конце 2020 года пациент снова был госпитализирован в ГКБ им. С.П. Боткина в связи с прогрессирующей дисфункцией почечного трансплантата. Уровень креатинина повысился до 360 мкмоль/л, мочевины — 23,6 ммоль/л, мочевая кислота — 681 мкмоль/л, лейкоциты — 6,5 тыс., тромбоциты — 288 тыс., в общем анализе мочи была выявлена лейкоцитурия (500 кл/мкл). С учётом лейкоцитурии и выраженной дисфункции трансплантата был диагностирован пиелонефрит трансплантата. Назначена антибактериальная терапия Ципрофлоксацином по 200 мг 2 раза в сутки на 7 дней. Также, учитывая быстро прогрессирующую дисфункцию, был сдан анализ на ВК (Анализ мочи на ВК представляет собой исследование на наличие в моче микробактерий туберкулеза, которое назначается при подозрениях на туберкулез и в случаях плохо поддающихся лечению заболеваниях мочеполовой системы пациента.) и JC-нефропатию (или нефропатия с изменениями в почках, ассоциированными с вирусом JC (JCV), относится к заболеванию почек, которое связано с инфекцией вирусом JC. Этот вирус обычно не вызывает симптомов у здоровых людей, но у пациентов с ослабленной иммунной системой (например, у людей с ВИЧ/СПИДом или после трансплантации органов) он может активироваться и вызвать различные патологии.) — результаты оказались отрицательными.

На фоне проводимой терапии была купирована атака пиелонефрита трансплантата: уровень креатинина снизился с 325 до 239,5 мкмоль/л, мочевины — с 23 до 12,6 ммоль/л. Функция трансплантата стабилизировалась.

В 2021 году пациент находился на лечении в неврологическом отделении в связи с прогрессирующей дис-

функцией трансплантата и подозрением на острый криз отторжения. Однако данные за криз получены не были; вероятно, дисфункция была обусловлена нефротоксичностью ингибиторов кальциневрина (циклоsporина А и такролимуса). В отделении проводилась коррекция иммуносупрессивной терапии (терапия с целью подавления нежелательных иммунных реакций организма. Иммуносупрессивная терапия применяется для лечения аутоиммунных болезней, то есть болезней, при которых иммунная система организма атакует его собственные органы и ткани. При трансплантации органов иммуносупрессивная терапия необходима для предотвращения отторжения трансплантированного органа), антибактериальная, антигипертензивная, гастропротективная и симптоматическая терапия с положительным эффектом: увеличилось мочеотделение и уменьшились отёки. При выписке уровень креатинина составил 189 мкмоль/л. Пациенту было назначено медикаментозное лечение: адваграф 5 мг, метипред 8 мг, клопидогрел 75 мг, моксонидин 0,2 мг три раза в сутки, омез 20 мг и лерканидипин. Через полгода была проведена повторная иммуносупрессивная терапия, которая показала положительный эффект. В связи с этим было принято решение проводить иммуносупрессивную терапию каждые полгода. В 2023 году уровень креатинина снизился до 160 мкмоль/л, состояние пациента улучшилось, и иммуносупрессивная терапия была назначена раз в год.

Выводы

В данной статье подчёркивается актуальность иммуносупрессивной терапии, несмотря на свою высокую эффективность, остается недостаточно распространенной в клинической практике из-за высокой стоимости и ограниченного доступа для пациентов. Примером служит пациент, который уже пять лет находится на учете после трансплантации почки. Он ежегодно проходит курс иммуносупрессивной терапии и регулярно сдает анализы каждые три месяца, а также проходит ультразвуковое исследование сосудов и посещает своего лечащего врача. Строгое соблюдение режима приема назначенных таблеток подчеркивает важность комплексного подхода к лечению и поддержанию здоровья. Этот случай иллюстрирует необходимость повышения доступности иммуносупрессивной терапии для улучшения качества жизни пациентов после трансплантации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бронников А.М., Гуляева А.С. Предиктивный анализ на стадии планирования государственных контрактов со встречными инвестиционными обязательствами // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2023. Т. 13. № 4-1. С. 13–270. В. Калмин,
2. Бойчук А.В. Инструменты привлечения инвестиций в экономику региона в условиях санкций: реализация инфраструктурных проектов с помощью офсетных контрактов // Финансовые рынки и банки. 2024. № 1 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/instrumenty-privlecheniya-investitsiy-v-ekonomiku-regiona-v-usloviyah-sanktsiy-realizatsiya-infrastrukturnyh-proektov-s-pomoschyu>.

3. Alamo L., Beck-Popovic M., Gudinchet F., Meuli R. Congenital tumors: imaging when life just begins // Insights into Imaging. 2011. Vol. 2. P. 1 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://insightsimaging.springeropen.com/articles/10.1007/s13244-011-0073-8>
4. Разин М.П., Галкин В.Н., Сухих Н.К. Детская урология-андрология: Учебное пособие. Ярославль: Ярославская государственная медицинская академия, 2011. 128 с. С. 6 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://book.bsmi.uz/web/kitoblar/152370480.pdf>
5. Даминова М.А., Сафина А.И., Сатрутдинов М.А., Хамзина Г.А. Морфофункциональные особенности органов мочевой системы у детей, родившихся недоношенными и маловесными // Казанская государственная медицинская академия Минздрава России. 2013. С. 1 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://med-click.ru/uploads/files/docs/morfofunktsionalnye-osobennosti-organov-mochevoy-sistemy-u-detey-rodishihhsya-nedonoshennymi-i-malovesnymi.pdf>
6. Зоркин С.Н., Барсегян Е.Р., Туров Ф.О., Шахновский Д.С. Эндоскопическая коррекция пузырно-мочеточникового рефлюкса у детей. Информационные материалы. Москва: НМИЦ здоровья детей Минздрава России, 2020. С. 6 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://nczd.ru/wp-content/uploads/2023/08/endo-korreksiya-2020.pdf?ysclid=ma1d0v1cxx879149210>
7. Полховский В.Н., Бурко В.Д., Скобеж И.А. Пузырно-мочеточниковый рефлюкс у детей. Минск: Белорусский государственный медицинский университет, кафедра урологии, 2010. С. 4–6 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://rep.bsmu.by/bitstream/handle/BSMU/3938/Пузырно-мочеточниковый%20рефлюкс%20у%20детей.pdf?sequence=1&isAllowed=y&ysclid=ma1dhrwsd2516271701>
8. Колобова Л.М., Дутов В.В., Романов Д.В., Поздняков К.В. Пузырно-мочеточниковый рефлюкс в гипоплазированную почку у детей. Москва, 2015. С. 10–11 [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.monikiweb.ru/sites/default/files/page_content_files/Kolobova_PMR.pdf?ysclid=ma1diurbi677542112
9. Барская М.А., Гасанов Д.А., Терёхин С.С., Мелкумова Е.Г., Бахраков А.Н., Алексеева И.Н., Картавцев С.Ф., Ерёмин П.В. Подход к хирургическому лечению врождённого обструктивного мегауретера у детей. 2015. С. 1 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://s.applied-research.ru/pdf/2015/12-8/8162.pdf>
10. Юшко Е.И. Первичный обструктивный мегауретер у детей. Минск, 2020. С. 4–5 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://rep.bsmu.by/bitstream/handle/BSMU/29522/978-985-21-0619-1.Image.Marked.pdf?sequence=1&isAllowed=y&ysclid=ma1ejdu7nr463249221>
11. Зоркин С.Н., Сальников В.Ю., Туров Ф.О., Шахновский Д.С. Лечение первичного обструктивного мегауретера у детей. Москва, 2021. С. 6–7 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://nczd.ru/wp-content/uploads/2023/08/megaureter-2021.pdf?ysclid=ma1egt4psx42125898>
12. Бизунок Н.А., Рашкевич О.С., Волинец Б.А., Крючок В.Г. Иммуноотропные (иммунотропные) лекарственные средства. 2020. С. 3 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://rep.bsmu.by/bitstream/handle/BSMU/34891/978-985-21-0924-6.Image.Marked.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
13. Перлин Д.В., Сапожников А.Д., Александров И.В., Кретов М.А. Лапароскопическая донорская нефрэктомия: учебное пособие для клинических интернов, ординаторов и врачей, обучающихся в системе дополнительного медицинского образования. Волгоград, 2016. С. 10 [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.volgmed.ru/uploads/files/2016-3/54242-uchebnoe_posobie_laparoskopicheskaya_donorskaya_nefrektomiya.pdf

© Попова Анастасия Георгиевна (anasteusha_00@mail.ru); Складов Богдан Александрович (b.skladov@mail.ru);
 Мачалин Павел Александрович (machalin.pavel@gmail.com); Карданов Ахмед Мухамедович (kardanovakhmed@mail.ru);
 Скобелева Анна Александровна (sheine17@yandex.ru)
 Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОККЛЮЗИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ЗУБНЫХ РЯДАХ ПРИ ГЕНЕРАЛИЗОВАННОЙ ПОВЫШЕННОЙ СТИРАЕМОСТИ ТВЕРДЫХ ТКАНЕЙ ЗУБОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТИПА ПРИКУСА

OCCLUSAL CHANGES IN THE DENTITION WITH GENERALIZED INCREASED ABRASION OF THE HARD TISSUES OF THE TEETH, DEPENDING ON THE TYPE OF BITE

**A. Pospelov
S. Kretchetov
D. Yermilin
K. Averina**

Summary. Increased abrasion of the hard tissues of the teeth (PSTT) is a polyethological disease with a relatively rapid development, which is irreversible, leading to malocclusion. *Goal.* To analyze the changes occurring with the occlusal surfaces of the dentition in the generalized form of PSTT, depending on the type of bite and severity. *Materials and methods.* The condition of the hard tissues of the teeth was determined by the method of Goldberg H.G.V. (1976), according to the method of Khamitova N.H. (1986), the OCG index was calculated. *Research results* with an increase in the degree of erasure of the hard tissues of teeth, the values of the erasure index for all types of bite increase, reaching the highest with a straight bite, the lowest with an open bite, regardless of the type of bite, as the pathology develops, the index values for the upper jaw begin to prevail. With a generalized form of PSTT and complete dentition, the values of the OCG index approach 100 %. *Conclusion.* There was a tendency to increase the values of the erasure and OCG indices depending on the severity of the pathological process, as well as the effect of the type of bite on their magnitude.

Keywords: increased erasability, occlusal changes, teeth, hard tissues, abrasion index.

Поспелов Андрей Николаевич

кандидат медицинских наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Саратовский государственный медицинский
университет имени В.И. Разумовского»
ortoped_ne@mail.ru

Кречетов Сергей Александрович

кандидат медицинских наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Саратовский государственный медицинский
университет имени В.И. Разумовского»
krechet-sergei@yandex.ru

Ермилин Даниил Романович

Ассистент, Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Саратовский государственный медицинский
университет имени В.И. Разумовского»
stomat.edr@mail.ru

Аверина Ксения Михайловна

Ассистент, Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Саратовский государственный медицинский
университет имени В.И. Разумовского»
frolkina.ksusha@mail.ru

Аннотация. Повышенная стираемость твердых тканей зубов (ПСТТЗ) — полиэтиологическое заболевание, со сравнительно быстрым развитием, имеющим необратимый характер, приводящим к патологии прикуса. *Цель.* Проанализировать изменения, происходящие с окклюзионными поверхностями зубных рядов при генерализованной форме PSTTЗ в зависимости от типа прикуса и степени тяжести. *Материал и методы.* Состояние твердых тканей зубов определялось по методике Goldberg H.G.V. (1976), по методике Хамитовой Н.Х. (1986) высчитывали индекс ОКГ. *Результаты исследований* с увеличением степени стирания твердых тканей зубов происходит рост значений индекса стёртости при всех видах прикуса, достигая наибольших при прямом, наименьших — при открытом, не зависимо от вида прикуса по мере развития патологии начинают преобладать показатели индекса для верхней челюсти. При генерализованной форме PSTTЗ и целостных зубных рядах значения индекса ОКГ приближаются к 100 %. *Выводы.* Выявлена склонность к увеличению значений индексов стертости и ОКГ в зависимости от степени тяжести патологического процесса, а также влияния вида прикуса на их величину.

Ключевые слова: повышенная стираемость, окклюзионные изменения, зубы, твердые ткани, индекс стертости.

Введение

Повышенная стираемость твердых тканей зубов (ПСТТЗ) — полиэтиологическое заболевание, со сравнительно быстрым развитием, имеющим необратимый характер, приводящим к патологии прикуса [1], [2], [3].

Данное заболевание встречается в 4 % наблюдений у лиц в возрасте 25–30 лет, увеличивается до 23 % в 30–40 лет и достигает 35 % к 40–50 годам жизни пациентов [4].

В исследованиях ряда авторов отмечается, что при ПСТТЗ развиваются окклюзионные нарушения, вызывающие дисфункцию не только жевательной мускулатуры и ВНЧС, но и всей ЗЧС. Такие больные встречаются в 35 % наблюдений среди лиц старше 40 лет и нуждаются в оказании ортопедического лечения, при котором необходимо учитывать причины, вызывающие развитие повышенной стираемости и происходящие при этом морфологические изменения в тканях зубов и пародонта [5], [6], [7].

Конфигурация окклюзионных кривых при ПСТТЗ определяется кинематикой ВНЧС, либо имеет атипичный характер, причем изменения обусловлены степенью стирания зубов, при более выраженном стирании на верхней челюсти сагиттальная окклюзионная кривая изгибается вверх. Из-за неравномерного стирания твердых тканей зубов, в сочетании с частичной потерей зубов и зубоальвеолярного удлинения, окклюзионные поверхности приобретают волнистую форму [8].

В процессе ПСТТЗ боковые поверхности зубов подвергаются постепенному истиранию, а окклюзионные поверхности смещаются под различными углами: к щекам на нижней челюсти и к нёбу на верхней. Это явление, известно как «обратная сфера». Ввиду того, что боковые движения нижней челюсти при ПСТТЗ более широкие, чем при сохранившихся зубных рядах, происходит растяжение связок ВНЧС. Увеличение жевательной поверхности требует больше усилий для пережевывания пищи, что в результате приводит к утомляемости жевательной мускулатуры. [9].

Неустойчивое положение нижней челюсти, возникающее вследствие неравномерного стирания зубов, может привести к формированию смещенного прикуса, нарушению лицевой симметрии и аномальному положению суставных головок ВНЧС. [10].

Это отклонение влечет за собой изменение положения суставных дисков, приводящее к новым нагрузкам на височно-нижнечелюстной сустав [11].

Деформации зубного ряда отражаются не только на конфигурации жевательных поверхностей, но и способны ограничивать движения нижней челюсти. Препятствия в ее перемещении чаще всего проявляются в вертикальной плоскости, усложняя процесс откусывания и измельчения пищи [12].

Ввиду этого, недостаточно иметь представление о глубине поражения и форме стирания, необходим анализ изменений, происходящих с окклюзионными поверхностями зубных рядов в зависимости от типа прикуса и тяжести патологии [13].

Цель

Проанализировать изменения, происходящие с окклюзионными поверхностями зубных рядов при генерализованной форме ПСТТЗ в зависимости от типа прикуса и степени тяжести.

Материал и методы

Было обследовано 67 человек в возрасте 40–59 лет с генерализованной формой ПСТТЗ. Состояние твердых тканей исследовали в области восьми зубов, по два из каждого сегмента по методике Goldberg H.G.V. (1976): 1 степень — небольшое истирание бугров, 2 — истирание в пределах эмали, 3 — обнажение дентина, 4 — обнажение глубоких слоев дентина, 5 — вскрытие пульпы. Подсчет осуществлялся по формуле:

$$I_{\text{ст}} = \frac{\sum C_1}{n} \quad (1)$$

($\sum C_1$ — сумма степеней стирания твердых тканей, n — количество зубов)

По методике Хамитовой Н.Х. (1986) высчитывали индекс ОКГ. Качество контакта определялось: в переднем отделе — штрих, в боковом — множественный контакт. Яркие отпечатки свидетельствовали о повышенной нагрузке, нечеткие — о недогруженности указанных групп зубов. Количественный показатель оценивался в баллах: 0 — нет отпечатка, 2 — четкая точка, 3 — в переднем отделе штрих, в боковом множественный контакт, площадь. Индекс ОКГ вычисляли по формуле:

$$\text{ОКГ} = \frac{\sum \text{сумма баллов}}{3 \times 24} \quad (2)$$

Полученные данные подвергались обработке методом вариационной статистики с расчетом критерия достоверности Стьюдента.

Основные результаты

Следует отметить, что при глубоком прикусе, за счёт преобладания вертикальных движений нижней челю-

сти, происходит истончение коронок передних зубов вертикально, а на нёбной поверхности образуется форма истирания в виде ступеньки. В боковом отделе зубного ряда плоскость стирания идет в тангенциальном направлении.

При прямом прикусе фасетки стирания имеют гладкую полированную поверхность или образуются ячейки, узур, что обусловлено неравномерным стиранием различных слоёв эмали и дентина. Поверхность истирания за счет преобладания сагиттальных и трансверсальных движений нижней челюсти располагается в горизонтально во всех отделах зубного ряда и приводит к уменьшению вертикальных размеров коронки естественных зубов.

При ортогнатическом прикусе наблюдается смешанная форма истирания, так как ему свойственны движения нижней челюсти в полном объёме и характерно вертикальное направление фасеток стирания на нёбной поверхности верхних резцов, а на нижних — горизонтальное или несколько наклонное в вестибулярную сторону. В области боковых зубов — горизонтальное. Фасетки имеют форму ячеек, узур, реже гладкую полированную поверхность.

При открытом прикусе наблюдается горизонтальная форма стираемости, фасетки имеют гладкую полированную поверхность.

В 16,2 % наблюдений ПСТТЗ выявлялась при интактных зубных рядах, а в 83,8 % — при дефектах в зубных рядах, причем у большинства из них встречались деформации зубных рядов, которые охарактеризованы в таблице 1.

Таблица 1.

Характер деформаций зубных рядов при ПСТТЗ

деформации зубных рядов							
вертикальные		горизонтальные		по I типу*		по II типу*	
абс. ч.	%	абс. ч.	%	абс. ч.	%	абс. ч.	%
59	88,10	8	11,90	39	58,20	28	41,80

Источник: Составлено автором на основании проведенных исследований

Примечание: * использовалась классификация В.А. Пономарёвой, где по I типу деформации зубных рядов происходят с зубоальвеолярным удлинением, а по II типу с обнажением цемента корня.

Из данных таблицы 1 следует, что наиболее часто встречаются вертикальные деформации зубных рядов по I типу. При II типе деформаций наблюдалось их сочетание с заболеваниями пародонта. Отсюда следует, что потеря зубов приводит не только к функциональной

перегрузке оставшихся пар антагонистов, но и к деформации зубных рядов.

Деформации зубных рядов, вызывают блокирование сагиттальных и трансверсальных движений нижней челюсти, вызывая нарушение артикуляции. На выдвинувшиеся зубы увеличивается жевательная нагрузка, вызывая функциональную перегрузку их пародонта и патологические изменения с преобладанием воспалительных и дистрофических явлений.

В 28 случаях при центральной окклюзии выявлялось боковое смещение нижней челюсти, в 19 — вправо, а в 9 — влево. В положении относительного физиологического покоя смещение нижней челюсти не отмечалось, что, по всей видимости, свидетельствует о преобладании процесса стирания или отсутствия зубов на одной из сторон.

При генерализованной форме повышенной стираемости и глубоком прикусе в переднем отделе фасетки истирания имеют вертикальное направление, окклюзионный контакт осуществлялся по всей их площади. На верхних резцах они распространяются по нёбной поверхности от десневого края к режущему без сохранения их анатомии. В области нижних резцов при II степени стирания фасетки распространяются от режущего края до экватора по их вестибулярной поверхности.

На верхних клыках фасетки истирания распространяются по нёбной поверхности без сохранения анатомической формы, имеют вертикальный наклон и более выражены в дистальной части, рвущие бугры уплощаются. Рвущие бугры клыков нижней челюсти также уплощаются, фасетки стирания идут вертикально с вестибулярной стороны и при II степени доходят до уровня экватора, окклюзионный контакт осуществляется по всей их площади.

У премоляров верхней челюсти при I степени стирания фасетки располагаются вертикально в области медиального и дистального скатов нёбных бугров, при II степени они сливаются и доходят до уровня экватора. Вершины щёчных бугров уплощаются, фасетки стирания распространяются по всей поверхности их нёбных скатов с исчезновением фиссур второго порядка при I степени и первого порядка при II степени.

Щёчные бугры премоляров нижней челюсти уплощаются, фасетки стирания, имеют вертикальное направление и идут по вестибулярной поверхности. При II степени они доходят до уровня экватора, кроме того, фасетки стирания распространяются по вестибулярным скатам язычных бугров с исчезновением фиссур второго порядка при I степени и первого — при II степени стирания, без сохранения анатомической формы окклюзионной поверхности.

На нёбных скатах нёбных бугров моляров верхней челюсти фасетки истирания сливаются с вершинами, которые уплощаются и имеют незначительный дистальный наклон, на нёбных скатах щёчных бугров фасетки распространяются по всей поверхности и переходят на их вершины. При I степени стирания исчезают фиссуры второго порядка, а при II — все фасетки сливаются между собой и имеют нёбный наклон, исчезают фиссуры первого порядка, не сохраняется анатомическая форма окклюзионной поверхности, окклюзионный контакт осуществляется по всей площади фасеток стирания.

На молярах нижней челюсти фасетки стирания располагаются вертикально по вестибулярной поверхности медиальных и дистальных щёчных бугров и в области вестибулярных скатов язычных бугров без сохранения фиссур второго порядка при I степени стирания. При II степени фасетки стирания сливаются с исчезновением фиссур первого порядка и доходят до уровня экватора с вестибулярной стороны без сохранения анатомической формы окклюзионной поверхности.

При генерализованной форме стираемости и прямом прикусе в области резцов и клыков верхней и нижней челюстей фасетки истирания распространяются горизонтально. При II степени они находятся на уровне экватора, а при III — на уровне десневого края, окклюзионный контакт осуществляется по всей плоскости фасеток стирания.

У премоляров верхней челюсти уплощаются вершины нёбного и щёчного бугров до уровня эмалевых валиков, при II степени исчезают фиссуры первого порядка и фасетки сливаются между собой, доходя до уровня экватора без сохранения анатомической формы окклюзионной поверхности, а при III степени — до уровня десневого края.

У премоляров нижней челюсти вершины щёчных бугров уплощаются до уровня эмалевых валиков на вестибулярных скатах язычных бугров. При II степени исчезают фиссуры первого, а при III степени — плоскость стирания доходит до уровня десны, окклюзионный контакт осуществляется по всей площади фасеток.

Вершины медиальных и дистальных нёбных бугров моляров верхней челюсти уплощаются, при II степени стирания фасетки сливаются между собой с исчезновением фиссур первого порядка без сохранения анатомической формы окклюзионной поверхности, а при III степени уровень стирания доходит до десневого края.

На молярах нижней челюсти вершины щёчных бугров уплощаются, при II степени истирания фасетки сливаются с исчезновением фиссур первого порядка, которые частично сохраняются только между медиаль-

ными и дистальными язычными буграми. При III степени стирания фасетки полностью сливаются между собой без сохранения анатомической формы окклюзионной поверхности и доходят до уровня десневого края. Окклюзионный контакт осуществляется по всей площади фасеток стирания.

При генерализованной форме повышенной стираемости и ортогнатическом прикусе в области резцов верхней челюсти фасетки истирания идут в вертикальной плоскости и распространяются по нёбной поверхности без сохранения анатомической формы. У нижних резцов фасетки истирания располагаются в горизонтальной плоскости с вестибулярным наклоном, выраженность которого зависит от степени тяжести патологического процесса.

Рвущие бугры верхних клыков уплощаются, горизонтальная фасетка стирания сливается с вертикальной по дистальной нёбной поверхности. На нижней челюсти рвущие бугры клыков уплощаются в горизонтально с вестибуло-дистальным наклоном.

Вершины нёбных бугров премоляров верхней челюсти уплощаются с распространением фасеток по нёбной поверхности, что сопровождается при I степени стирания исчезновением продольных валиков и фиссур второго порядка. При II степени стирания уплощаются вершины щёчных бугров премоляров, фасетки сливаются между собой с исчезновением фиссур первого порядка без сохранения анатомической формы окклюзионной поверхности.

У премоляров нижней челюсти в горизонтальной плоскости уплощаются вершины щёчных бугров до уровня эмалевых валиков и исчезают фиссуры второго порядка на вестибулярных скатах язычных бугров при I степени стирания, а при II — фасетки сливаются с исчезновением фиссур первого порядка без сохранения анатомической формы. Окклюзионный контакт осуществляется по всей их поверхности.

Фасетки стирания с нёбных скатов нёбных бугров моляров верхней челюсти переходят на их вершины, которые уплощаются с сохранением фиссур первого порядка, фасетки стирания на нёбных скатах щёчных бугров распространяются по всей поверхности с исчезновением фиссур второго порядка и переходят на их вершины при I степени стирания. При II степени вершины щёчных бугров уплощаются, фасетки сливаются между собой с исчезновением фиссур первого порядка без сохранения анатомической формы окклюзионной поверхности.

У моляров нижней челюсти вершины щёчных бугров уплощаются с сохранением между ними фиссур первого порядка, фасетки истирания распространяются по ве-

стибулярным скатам язычных бугров, переходя на их вершины с исчезновением фиссур второго порядка при I степени стирания. При II степени стирания фасетки сливаются между собой в горизонтальной плоскости с исчезновением фиссур первого порядка без сохранения анатомической формы окклюзионной поверхности. Окклюзионный контакт осуществляется по всей площади фасеток истирания.

Таким образом, изучение состояния окклюзионных поверхностей зубных рядов при ПСТТЗ показало, что в переднем отделе за счёт фасеток стирания происходит, в зависимости от вида прикуса, укорочение или истончение коронок зубов, выраженность изменений которых зависит от степени стирания. В боковых отделах зубных рядов при I степени стирания частично сохраняется анатомическая форма окклюзионной поверхности с исчезновением фиссур второго порядка, при II степени асетки сливаются между собой с исчезновением фиссур первого порядка и анатомической формы окклюзионной поверхности, при III — плоскость стирания доходит до уровня десны.

Интенсивность стираемости твёрдых тканей зубов оценивалась с помощью $I_{\text{ст}}$, результаты отражены в таблице 2.

Таблица 2.

Значение $I_{\text{ст}}$ при генерализованной форме ПСТТЗ в зависимости от вида прикуса и степени стирания

вид прикуса	степень стирания	локализация, значение в баллах		
		справа	слева	общий
ортогнатический	I	3,01+0,58	2,43+0,28	2,74+0,12
	II	3,39+0,05	3,28+0,21	3,34+0,15
	III	4,51+0,18	4,21+0,12	4,32+0,16
прямой	II	3,85+0,45	3,55+0,7	3,71+0,43
	III	4,47+0,21	4,47+0,23	4,47+0,15
глубокий	I	3,00+0,32	3,06+0,31	3,06+0,20
	I	3,60+0,31	3,90+0,35	3,81+0,29
открытый	III	2,63	3,75	3,19

Источник: Составлено автором на основании проведенных исследований

Из представленных данных следует, что с увеличением степени стирания твёрдых тканей зубов происходит рост значений индекса стёртости при всех видах прикуса, достигая наибольших при прямом, наименьших — при открытом. Данное различие связано с индивидуальным строением ВНЧС, резцовым перекрытием и направлением силы тяги жевательной мускулатуры, что определяет характер движений нижней челюсти.

Так же, выявлялись значения индекса стёртости от типа челюсти, данные представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Значения $I_{\text{ст}}$ при генерализованной ПСТТЗ для верхней и нижней челюстей в зависимости от вида прикуса, степени стирания

степень стирания	тип челюсти	вид прикуса, значения в баллах			
		ортогнатический	прямой	глубокий	открытый
I	в/ч	2,66+0,23	—	2,88+0,12	—
	н/ч	2,75+0,07	—	3,31+0,35	—
II	в/ч	3,30+0,14	3,82+0,74	3,68+0,44	—
	н/ч	3,30+0,42	3,67+0,52	3,83+0,25	—
III	в/ч	4,48+0,21	4,51+0,26	—	3,25
	н/ч	4,31+0,24	4,42+0,20	—	3,13

Источник: Составлено автором на основании проведенных исследований

Анализ данных таблицы 3 показывает, что не зависимо от вида прикуса по мере развития патологии начинают преобладать показатели индекса для верхней челюсти. Так при I степени они больше для зубного ряда нижней челюсти, при II — приближаются к значениям для зубного ряда верхней челюсти, а при III — начинают преобладать на верхней челюсти.

Характеристика окклюзионных контактов, представленная в таблице 4, определялась при помощи индекса ОКГ по методике Хамитовой Н.Х.

Полученные данные выявляют зависимость индекса ОКГ от вида прикуса, так при прямом прикусе его значение наибольшее 80,90+4,30 %, а при открытом наименьшее 48,60 %.

Таблица 4.

Значения индекса ОКГ в зависимости от вида прикуса

вид прикуса	кол-во наблюдений	локализация, значение в %		
		справа	слева	общий
ортогнатический	27	75,90+7,30	71,30+7,01	73,60+7,11
прямой	20	81,91+4,50	79,90+4,10	80,90+4,30
глубокий	19	77,89+6,43	75,80+5,10	77,80+4,60
открытый	1	50	47,20	48,60

Источник: Составлено автором на основании проведенных исследований

Выводы

Установлено, что при ПСТТЗ в переднем отделе зубного ряда в зависимости от вида прикуса за счёт фасеток стирания происходит укорочение или истончение коронковой части, выраженность изменений которых связана со степенью тяжести патологического процесса. В боковых отделах зубных рядов при I степени стирания частично сохраняется анатомическая форма окклюзионной поверхности с исчезновением фиссур второго порядка, при II степени стирания фасетки сливаются между собой с исчезновением фиссур первого порядка и анатомической формы окклюзионной поверхности, при III степени — плоскость стирания доходит до уровня десневого края. Характер расположения фасеток стирания обуславливается артикуляционными движениями нижней челюсти, что напрямую связано с видом прикуса.

С увеличением степени тяжести ПСТТЗ значения индекса ОКГ сохраняют тенденцию к росту, но за счёт частичного отсутствия зубов, они по сравнению с аналогичными ситуациями при целостных зубных рядах меньше.

Выполненные исследования показали, что выявлена прямая зависимость значений индексов стертости и ОКГ от степени тяжести патологического процесса, а также было установлено влияние вида прикуса на их величину таблицы.

Установлено, что при ПСТТЗ происходит рост его значений в зависимости от степени тяжести патологического процесса, достигая при III степени стирания от 4,3+0,16 до 4,47+0,15 баллов. Значения индекса стертости независимо от вида прикуса преобладают у зубного ряда нижней челюсти. С увеличением степени тяжести повышенной стираемости зубов начинают преобладать значения индексов стертости для верхнего зубного ряда.

Кроме того, с нарастанием степени тяжести ПСТТЗ наблюдается увеличение значений индекса ОКГ, что свидетельствует о формировании плоскостного контакта, причём оказывает влияние наличие и протяжённость дефектов зубных рядов. Так, если при прямом прикусе и целостных зубных рядах его значение при II степени равно 94,2+0,6 %, то при дефектах в зубных рядах аналогичной степени стирания — 68,7+20,6 %.

Вместе с тем вид прикуса оказывает влияние на значения индексов стертости и ОКГ, но за некоторым исключением оно не достоверно. При боковом смещении нижней челюсти значения индекса стертости и ОКГ больше на стороне смещения.

При обследовании пациентов было выявлено, что в 42 наблюдениях индекс ОКГ больше выражен с правой стороны зубного ряда, в 17 — с левой, а в 8 — с обеих сторон равен между собой. При боковом смещении нижней челюсти на стороне смещения индекс ОКГ 76,70+9,90 %, а на противоположной — 61,60+7,80 %.

Таким образом, выяснилось, что параметры окклюзионных контактов зависят от вида прикуса, а уровень нарушений — от тяжести течения патологии, причем локализация фасеток стертости обуславливается артикуляционными движениями нижней челюсти. Выявлена склонность к увеличению значений индексов стертости и ОКГ в зависимости от степени тяжести патологического процесса, а также влияния вида прикуса на их величину. Кроме того, на значение индекса ОКГ оказывает влияние наличие дефектов зубных рядов, их протяжённость. В результате ПСТТЗ форма окклюзионных кривых индивидуализируется, выраженность зависит от степени тяжести и характера деформаций зубных рядов, могут быть минимальными или резко выраженными и сопровождаться функциональными нарушениями зубочелюстной системы.

ЛИТЕРАТУРА

- Исаков Э.О., Калбаев А.А., Кулукеева А.Т. и др. Глубокий прикус — как этиологический фактор заболеваний пародонта и особенности его ортопедического лечения // Современная стоматология. 2021. №1 (82). С. 32–36.
- Тимошина М.Д., Емелина Е.С., Зангиева О.Т. и др. Оценка функционального состояния височно-нижнечелюстного сустава у артистов балета в различных возрастных группах // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2023. №2. С. 63–66. DOI: 10.24412/2075-4094-2023-2-1-6.
- Толстова И.М. Патологическая стираемость зубов: причины, последствия и методы лечения // Вестник науки. 2024. Т. 5. №12 (81). С. 998–1002.
- Казанцев М.В., Исаева Н.В. Повышенная стираемость зубов среди трудоспособного населения: распространенность, факторы риска, профилактика // Профилактическая медицина — 2022. Сб. научных трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Под ред. А.В. Мельцера, И.Ш. Якубовой. Санкт-Петербург. 2022. С. 92–97.
- Калмин О.В., Корецкая Е.А. Размерные характеристики зубов у лиц зрелого возраста при разной степени стертости твердых тканей // Морфологические ведомости. 2021. Т. 29. №2. С. 27–33.
- Степанов Д.А., Лейбенко С., Степанов Е.А. и др. Изменения в зубочелюстной системе при повышенной стираемости зубов // Стоматология для всех. № 3 (92). 2020. С. 30–35. DOI: 10.35556/idr-2020-2(91)30-34.
- Левчик Е.В., Ушницкий И.Д., Юркевич А.В. и др. Клиническая значимость патологической стираемости зубов в дисфункции височно-нижнечелюстного сустава // Актуальные проблемы и перспективы развития стоматологии в условиях севера. Изд-во: Издательский дом СВФУ. 2019. С. 82–85.

8. Николаева В.Е. Возрастные изменения зубов: клиническая значение для профилактической и терапевтической практики // Вестник науки. 2025. Т. 5. №6 (87). С. 921–925.
9. Акопян Р.А. Взаимосвязь патологии височно-нижнечелюстного сустава с нарушениями окклюзии зубов и зубных рядов // Бюллетень медицинских Интернет-конференций 2017. Т. 7. № 9. С. 1478–1479.
10. Хватова В.А. Клиническая гнатология. Изд-во: Медицина. М. 2005. 296 с.
11. Коннов В.В. Ортодонтическое и ортопедическое лечение взрослых пациентов с различными вариантами височно-нижнечелюстного сустава // Автореферат диссертации доктора медицинских наук. 14.00.21. Волгоград. 2008. 34 с.
12. Маргвелашвили В.В. Клинико-лабораторное обоснование методов ортопедического лечения различных форм патологической стираемости зубов // Автореферат диссертации доктора медицинских наук. 14.00.21. Акционерное общество открытого типа «Стоматология». 1995. 32 с.
13. Поспелов А.Н. Окклюзионные нарушения в зубных рядах при повышенной стираемости твердых тканей зубов и их ортопедическое лечение // Автореферат диссертации кандидата медицинских наук. 14.00.21. Волгоград. 2000. 22 с.

© Поспелов Андрей Николаевич (ortoped_ne@mail.ru); Кречетов Сергей Александрович (krechet-sergei@yandex.ru);
 Ермилин Даниил Романович (stomat.edr@mail.ru); Аверина Ксения Михайловна (frolkina.ksusha@mail.ru)
 Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ФОКУСИРОВАННАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ АБЛАЦИЯ В ЛЕЧЕНИИ МИОМЫ МАТКИ. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

FOCUS ULTRASONIC ABLATION IN THE TREATMENT OF UTERINE FIBROIDS. A LITERATURE REVIEW

**N. Rukhlyada
D. Rossolko
T. Prokhorovich
T. Libova
I. Vorobtsova**

Summary. Uterine fibroids remain one of the leading gynecological pathologies affecting a significant proportion of women of reproductive age. The disease is characterized by chronic pelvic pain, heavy menstrual bleeding, infertility and habitual miscarriage, which significantly worsens the quality of life of patients. Epidemiological studies show that fibroids are diagnosed in 10–30 % of women, with a peak detection age of about 33 years. Traditional treatment methods, including surgical removal of nodes and hormonal therapy, have serious limitations, such as invasiveness, risk of complications and the likelihood of tumor recurrence. The results of the study show that organ-preserving approaches have been actively developing in recent decades, among which focused ultrasound ablation under magnetic resonance imaging (FUS-MRI) occupies a special place. This review is devoted to the analysis of clinical efficacy, safety, indications and limitations of FUS ablation, with an emphasis on long-term results and impact on reproductive function.

Keywords: uterine fibroids, reproductive health, miscarriage, focused ultrasound ablation.

Рухляда Николай Николаевич

доктор медицинских наук, профессор, Санкт-Петербургский Государственный Педиатрический Медицинский Университет Минздрава России
nickolasr@mail.ru

Россолько Дмитрий Сергеевич

кандидат медицинских наук, Санкт-Петербургский Государственный Педиатрический Медицинский Университет Минздрава России
drossolko@mail.ru

Прохорович Татьяна Ивановна

кандидат медицинских наук, Санкт-Петербургский Государственный Педиатрический Медицинский Университет Минздрава России
tatyana.prohorovich@yandex.ru

Либова Татьяна Александровна

кандидат медицинских наук, Санкт-Петербургский Государственный Педиатрический Медицинский Университет Минздрава России
Libova@mail.ru

Воробцова Ирина Николаевна

кандидат медицинских наук, Санкт-Петербургский Государственный Педиатрический Медицинский Университет Минздрава России
Ririna-1979@yandex.ru

Аннотация. Миома матки остаётся одной из ведущих гинекологических патологий, поражающей значительную часть женщин репродуктивного возраста. Заболевание характеризуется хроническими тазовыми болями, обильными менструальными кровотечениями, бесплодием и привычным невынашиванием беременности, что существенно ухудшает качество жизни пациенток. Эпидемиологические исследования показывают, что миома диагностируется у 10–30 % женщин, с пиком выявления в возрасте около 33 лет. Традиционные методы лечения, включая хирургическое удаление узлов и гормональную терапию, имеют серьёзные ограничения, такие как инвазивность, риск осложнений и вероятность рецидивов роста опухоли. Результаты проведенного исследования показывают, что в последние десятилетия активно развиваются органосохраняющие подходы, среди которых особое место занимает фокусированная ультразвуковая абляция под контролем магнитно-резонансной томографии (ФУЗ-МРТ). Данный обзор посвящён анализу клинической эффективности, безопасности, показаний и ограничений ФУЗ-абляции, с акцентом на отдалённые результаты и влияние на репродуктивную функцию.

Ключевые слова: миома матки, репродуктивное здоровье, невынашивание беременности, фокусированная ультразвуковая абляция.

Миома матки остаётся одной из ведущих гинекологических патологий, поражающей значительную часть женщин репродуктивного возраста. Заболевание характеризуется хроническими тазовыми болями, обильными менструальными кровотечениями, бесплодием и привычным невынашиванием беременности, что существенно ухудшает качество жизни пациенток [31]. Эпидемиологические исследования показывают, что миома диагностируется у 10–30 % женщин, с пиком выявления в возрасте около 33 лет [26]. Традиционные методы лечения, включая хирургическое удаление узлов и гормональную терапию, имеют серьёзные ограничения, такие как инвазивность, риск осложнений и вероятность рецидивов роста опухоли [6]. В последние десятилетия активно развиваются органосохраняющие подходы, среди которых особое место занимает фокусированная ультразвуковая абляция под контролем магнитно-резонансной томографии (ФУЗ-МРТ). Данный обзор посвящён анализу клинической эффективности, безопасности, показаний и ограничений ФУЗ-абляции, с акцентом на отдалённые результаты и влияние на репродуктивную функцию, включая данные диссертации Малышевой Я.Р. [18].

Миома матки представляет собой доброкачественную гормонозависимую опухоль, возникающую в результате гипертрофии и пролиферации мышечной и соединительной тканей миометрия. Основными факторами риска считаются гормональный дисбаланс, наследственная предрасположенность, а также неблагоприятные экологические и социальные условия, включая позднюю реализацию репродуктивной функции [7]. Современные исследования подчёркивают роль эстрогенов и прогестерона в патогенезе миомы, которые стимулируют пролиферацию клеток миометрия через активацию специфических рецепторов. Кроме того, молекулярно-генетические механизмы, такие как мутации в генах, регулирующих клеточный цикл, также играют важную роль в формировании опухоли [8]. В последние годы отмечается тенденция к «омоложению» заболевания, что связано с изменением репродуктивного поведения женщин, таких как рождение первого ребёнка после 30 лет. Клинические проявления миомы варьируются от бессимптомного течения до выраженных симптомов, включая хроническую тазовую боль, маточные кровотечения и репродуктивные нарушения, что требует индивидуального подхода к выбору терапевтической стратегии [21]. Бессимптомные миомы часто обнаруживаются случайно во время профилактических осмотров, тогда как симптоматические формы могут существенно ограничивать повседневную активность пациенток, вызывая необходимость активного лечения. Например, обильные кровотечения могут привести к анемии, а давление крупных узлов на соседние органы — к нарушению функции мочевого пузыря или кишечника.

Традиционные методы лечения миомы матки делятся на хирургические и консервативные. Хирургическое вмешательство, такое как миомэктомия (удаление миоматозных узлов) или гистерэктомия (удаление матки), остаётся наиболее результативным подходом для устранения симптомов и опухоли. Однако эти методы связаны с рисками послеоперационных осложнений, таких как инфекции, кровотечения и утрата репродуктивной функции [6]. Миомэктомия, выполняемая через лапаротомический, лапароскопический или гистерорезектоскопический доступ, является предпочтительным выбором для женщин, планирующих беременность. Лапаротомия применяется при множественных крупных узлах, что обеспечивает полный доступ к матке, но связана с более длительным восстановительным периодом и риском спаечного процесса. Лапароскопическая миомэктомия минимизирует травматичность, но требует высокой квалификации хирурга и может быть ограничена при сложной локализации узлов, например, при интрамуральных миомах с глубоким расположением [2]. Гистерорезектоскопия используется преимущественно для субмукозных миом, позволяя удалять узлы через полость матки с минимальной инвазивностью, но её применение ограничено размером и количеством узлов. Гистерэктомия, хотя и эффективна для устранения симптомов, приводит к полной потере репродуктивной функции и может сопровождаться синдромом постгистерэктомии, включающим психологические и физиологические последствия, такие как депрессия, снижение либидо и гормональные нарушения [17]. Консервативное лечение, основанное на применении гормональных препаратов, таких как агонисты гонадотропин-рилизинг-гормона или мифепристон, направлено на подавление роста опухоли, но часто сопровождается побочными эффектами, включая тромбозы, нарушения функции печени и рецидивы после отмены терапии [12]. Например, мифепристон эффективен для временного уменьшения узлов, но его длительное применение ограничено из-за риска системных осложнений, таких как эндометриальная гиперплазия. Эмболизация маточных артерий (ЭМА), внедрённая в клиническую практику в 1995 году, представляет собой минимально инвазивный метод, позволяющий уменьшить размеры узлов и выраженность симптомов у 80–90 % пациенток. Процедура включает катетеризацию бедренной артерии и введение микрочастиц для блокировки кровотока в маточных артериях, что приводит к регрессии узлов [13]. Однако ЭМА может вызывать осложнения, такие как постэмболизационный болевой синдром, недостаточность функции яичников и аллергические реакции на контрастное вещество [32,33]. Кроме того, данные исследований указывают на потенциальное негативное влияние ЭМА на репродуктивные исходы, включая снижение вероятности наступления беременности, что ограничивает её использование у женщин, заинтересованных в сохранении фертильности [20].

Фокусированная ультразвуковая абляция под контролем МРТ появилась в начале 2000-х годов как инновационный неинвазивный метод лечения миомы матки. Метод основан на использовании высокоинтенсивного ультразвука, который фокусируется на опухолевых узлах, вызывая их термическое разрушение без повреждения окружающих тканей [15]. В 2004 году ФУЗ-МРТ была одобрена для клинического применения Федеральным агентством США (USFDA) и Российской Федеральной службой по надзору в сфере здравоохранения с использованием системы ExAblate [18]. Процедура проводится под контролем МРТ, что обеспечивает высокую точность воздействия и минимальный риск для здоровых тканей. Технически процедура включает предварительное планирование с помощью МРТ для определения расположения узлов, после чего ультразвуковые волны направляются на целевую зону, вызывая локальный нагрев до 60–80°C, что приводит к коагуляционному некрозу ткани опухоли. Ключевые преимущества метода включают отсутствие необходимости в общей анестезии, минимальный восстановительный период и возможность проведения лечения в амбулаторных условиях. В России ФУЗ-абляция была впервые применена в 2007 году в ФГАУ «Лечебно-реабилитационный центр» Минздрава РФ, что стало важным шагом в развитии органосохраняющих технологий [16]. Метод особенно привлекателен для пациенток, стремящихся избежать инвазивных процедур, таких как хирургическое вмешательство, и минимизировать риски послеоперационных осложнений. Технические аспекты процедуры требуют наличия специализированного оборудования, такого как система ExAblate, и квалифицированного персонала, способного точно настраивать параметры ультразвукового воздействия. Ограничения метода включают высокую стоимость оборудования и необходимость проведения МРТ-диагностики, что может ограничивать доступность процедуры в некоторых медицинских учреждениях.

Клиническая эффективность ФУЗ-абляции подтверждена рядом исследований, демонстрирующих значительное уменьшение размеров миоматозных узлов и выраженности симптомов, таких как кровотечения и тазовая боль, у 70–90 % пациенток. Метод особенно эффективен при единичных миоматозных узлах размером до 5–7 см с субсерозной или интрамуральной локализацией, тогда как при множественных узлах или субмукозных миомах результаты могут быть менее стабильными [18]. Исследования показывают, что ФУЗ-абляция позволяет достичь улучшения качества жизни за счёт устранения основных симптомов без необходимости инвазивного вмешательства. Пациентки отмечают снижение интенсивности менструальных кровотечений и уменьшение болевого синдрома уже в течение первых месяцев после процедуры. Однако, как отмечено в диссертации Малышевой Я.Р., воздействие ультразвука не обеспечивает полного разрушения ткани узла, что

приводит к рецидивам роста миомы в сроки от 6 до 12 месяцев у значительной части пациенток [18]. Гистологический анализ удалённых узлов после ФУЗ-абляции выявляет зоны некроза, отёка и фиброза стромы, что может влиять на структуру миометрия и состоятельность рубца при последующей миомэктомии, если она требуется как дополнительный метод лечения [18]. Эти данные подчёркивают необходимость тщательного отбора пациенток и разработки чётких критериев для применения метода. Например, пациентки с единичными узлами и отсутствием репродуктивных планов имеют более высокие шансы на устойчивый результат, тогда как при сложных анатомических вариантах миомы эффективность может быть ниже. Кроме того, исследования показывают, что эффективность процедуры зависит от таких факторов, как плотность ткани узла и его кровоснабжение, что требует предварительной оценки с помощью МРТ для определения пригодности пациентки к ФУЗ-абляции.

Вопрос влияния ФУЗ-абляции на репродуктивную функцию остаётся одной из ключевых проблем, вызывающих дискуссии в медицинском сообществе. Первоначально метод рекомендовался преимущественно для женщин, завершивших репродуктивные планы, из-за ограниченных данных о его безопасности для фертильности [24]. Это было связано с отсутствием проспективных исследований, оценивающих влияние процедуры на менструальную функцию, гормонпродуцирующую активность яичников и рецептивность эндометрия. Однако в последние годы зарегистрированы случаи успешных беременностей после ФУЗ-абляции, включая роды через естественные родовые пути без осложнений. Например, в одном из исследований сообщалось о 64 % случаев отсутствия мертворождений или рождения детей с низкой массой тела после процедуры [18]. Тем не менее, высокий процент кесаревых сечений (до 70 % в некоторых работах) объясняется как социальными факторами, такими как страх пациенток перед разрывом матки, так и недостатком данных о безопасности вагинальных родов после ФУЗ-абляции [18]. Сравнительные исследования с миомэктомией демонстрируют, что последняя обеспечивает более высокую вероятность успешных естественных родов (от 25 до 80 %), но может быть связана с риском нарушения целостности матки во время операции [14]. Например, нарушение целостности полости матки при миомэктомии увеличивает риск осложнений при родах, что делает кесарево сечение предпочтительным вариантом в таких случаях. Малышева Я.Р. в своей диссертации подчёркивает, что ФУЗ-абляция как монотерапия не рекомендована для женщин, планирующих беременность, поскольку вероятность наступления беременности повышается только при комбинации с повторными процедурами или другими методами лечения, такими как миомэктомия или гормональная терапия [18]. Ретроспективные данные показывают, что у 19 % женщин, планирующих беременность после ФУЗ-абляции,

она наступает, но в большинстве случаев требуется кесарево сечение из-за отсутствия стандартизированных рекомендаций по ведению родов [18]. Эти выводы подчёркивают необходимость дальнейших исследований для оценки репродуктивных исходов и разработки протоколов ведения таких пациенток. Например, требуется изучение влияния ФУЗ-абляции на эндометрий и его рецептивность, чтобы определить, как процедура влияет на имплантацию эмбриона и течение беременности.

Ограничения ФУЗ-абляции включают отсутствие чётко сформулированных показаний и противопоказаний, а также недостаток проспективных исследований, оценивающих долгосрочные эффекты. Абсолютными противопоказаниями к процедуре являются беременность, активные инфекционные процессы и подозрение на злокачественные новообразования матки или придатков [6]. Относительные противопоказания включают коагулопатию, аллергические реакции на контрастное вещество и почечную недостаточность. Кроме того, отсутствие стандартизированных алгоритмов предоперационной подготовки и ведения пациенток затрудняет оценку отдалённых результатов метода. Влияние ФУЗ-абляции на менструальную функцию, гормонпродуцирующую активность яичников и рецептивность эндометрия также остаётся недостаточно изученным, что требует дополнительных исследований [18]. Например, некоторые исследования указывают на сохранение нормальной функции яичников после процедуры, что является важным преимуществом по сравнению с ЭМА, где риск недостаточности яичников выше [13]. Однако отсутствие данных о долгосрочных изменениях в эндометрии ограничивает возможности прогнозирования репродуктивных исходов. Техническая сложность процедуры, требующая дорогостоящего оборудования и квалифицированного персонала, также ограничивает доступность метода в некоторых регионах. Например, необходимость использования МРТ-аппаратуры высокого разрешения и специализированных ультразвуковых систем делает ФУЗ-абляцию дорогостоящей процедурой, что может быть барьером для её широкого внедрения.

Перспективы развития ФУЗ-абляции связаны с совершенствованием техники, разработкой критериев отбора пациенток и проведением сравнительных исследований с другими органосохраняющими методами, такими как миомэктомия и ЭМА. Особое внимание уделяется изучению долгосрочных репродуктивных исходов, чтобы определить возможность применения метода у женщин молодого возраста, заинтересованных

в сохранении фертильности. Данные исследований подтверждают, что ФУЗ-абляция не оказывает негативного влияния на функцию яичников, что является важным преимуществом по сравнению с ЭМА [18]. Однако для расширения показаний к применению метода необходимы проспективные исследования с большим числом пациенток и длительным периодом наблюдения. Важным направлением является также оптимизация технических аспектов процедуры, таких как повышение точности ультразвукового воздействия и минимизация риска рецидивов. Например, разработка новых протоколов МРТ-навигации может улучшить результаты при сложных анатомических вариантах миомы. Кроме того, интеграция ФУЗ-абляции с другими методами, такими как гормональная терапия или минимально инвазивные хирургические техники, может повысить её эффективность, особенно у пациенток с множественными узлами или репродуктивными планами. Например, комбинированное использование ФУЗ-абляции с гормональной терапией может замедлить рецидив роста узлов, что позволит продлить терапевтический эффект. Также перспективным направлением является изучение влияния процедуры на микроциркуляцию матки и её долгосрочные последствия для репродуктивной функции, что требует междисциплинарного подхода с привлечением специалистов в области радиологии, гинекологии и репродуктологии.

В заключение, фокусированная ультразвуковая абляция под контролем МРТ представляет собой перспективный неинвазивный метод лечения миомы матки, демонстрирующий высокую эффективность при симптоматических единичных узлах. Метод позволяет значительно улучшить качество жизни пациенток за счёт устранения основных симптомов без необходимости инвазивного вмешательства. Однако ограниченная эффективность при множественных узлах, вероятность рецидивов и недостаток данных о репродуктивных исходах делают ФУЗ-абляцию менее предпочтительным выбором для женщин, планирующих беременность, без применения дополнительных методов лечения [18]. Дальнейшие исследования необходимы для уточнения показаний, оптимизации техники и оценки долгосрочных эффектов, что позволит шире внедрять метод в клиническую практику. Разработка стандартизированных критериев отбора пациенток и протоколов ведения после процедуры станет ключевым шагом для повышения доступности и безопасности ФУЗ-абляции. В перспективе метод может стать важной частью комплексного подхода к лечению миомы матки, особенно в сочетании с другими органосохраняющими технологиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адамян Л.В. Миома матки: диагностика, лечение и реабилитация: клинические рекомендации по ведению больных. М., 2015. 95 с.
2. Адамян Л.В., Зарубиани З.Р., Киселев С.И. Лапароскопия и гистерорезектоскопия в хирургическом лечении миомы матки у женщин детородного возраста. Акушерство и гинекология, 1997, № 3, с. 40–44.
3. Бабунашвили Е.Л. Репродуктивный прогноз при миоме матки: Автореф. дис. канд. мед. наук. М., 2004. 24 с.
4. Бокерия Л.А., Алекаян Б.Г. Рентгеноэндоваскулярная хирургия заболеваний магистральных сосудов. Под ред. Л.А. Бокерия, Б.Г. Алекаян, М. Анри. М., 2008. 598 с.
5. Ботвин М.А. Современные аспекты реконструктивно-пластических операций у больных миомой матки репродуктивного возраста. Автореф. дис. докт. мед. наук. М., 1999. 51 с.
6. Бреусенко В.Г., Краснова И.А., Капранов С.А. Спорные вопросы эмболизации маточных артерий при миоме матки. Вопросы гинекологии, акушерства и перинатологии, 2005, т. 4, № 4, с. 44–48.
7. Вихляева Е.М. Руководство по диагностике и лечению лейомиомы матки. М.: МЕДпресс-информ, 2004. 400 с.
8. Гарькавцева Р.Ф., Гарькавцев И.В. Молекулярно-генетические аспекты злокачественных новообразований. Вестник РАМН, 1999, № 2, с. 38–44.
9. Демьянова Т.Н., Переделкина О.Н., Богданова Н.Л., Елгина С.И. Эндоскопия в диагностике и лечении миомы матки. Материалы IX всероссийского форума «Мать и дитя». М., 2007, с. 383–384.
10. Ибрагимова Д.М., Доброхотова Ю.Э. Спорные вопросы патогенеза миомы матки и лечения больных этим заболеванием. Российский вестник акушера-гинеколога, 2011, № 2, с. 37–43.
11. Ищенко А.И., Ботвин М.А., Ланчинский В.И. Миома матки: этиология, патогенез, диагностика, лечение. М.: Издательский дом Видар, 2010, с. 6–9, 19–27.
12. Карева Е.Н. Мифепристон и миома матки. Актуальные обзоры. Фарматека, 2010, № 14, с. 18–30.
13. Кокорева Н.И. Сравнительный анализ органосохраняющих методов лечения больных миомой матки: дис. канд. мед. наук: 14.01.01. М., 2015. 21–22 с.
14. Коржуев С.И. Репродуктивная функция женщин после консервативной миомэктомии: дис. канд. мед. наук: 14.00.01. М., 2008. 131 с.
15. Кулаков В.И., Кира Е.Ф. Термическая абляция миоматозных узлов фокусированным ультразвуком — новый метод неинвазивной хирургии. Акушерство и гинекология, 2006, № 5, с. 3–5.
16. Лядов К.В., Сидорова И.С. Дистанционная неинвазивная абляция тканей фокусированным ультразвуком под контролем магнитно-резонансной томографии в лечении миомы матки. Руководство для врачей. М., 2008.
17. Макаров О.В., Сметник В.П., Доброхотова Ю.Э. Синдром постгистерэктомии. М., 2000. 8 с.
18. Малышева Я.Р. Отдаленные результаты лечения миомы матки путем ФУЗ-абляции: дис. ... канд. мед. наук: 14.01.01. Москва, 2020. 103 с.
19. Мампория Н.М. Сосуды матки. Тбилиси, 1958, с. 75–80.
20. Мухамедьянов И.Ф. Эндоваскулярная ЭМА в лечении миомы матки: дис. канд. мед. наук: 14.01.17. Уфа, 2010. 114 с.
21. Новик А.А. и др. Оценка качества жизни больного в медицине. Клиническая медицина, 2000, № 2, с. 10–12.
22. Петракова С.А., Буянова С.Н., Мгелиашвили М.В. Возможности миомэктомии в коррекции репродуктивного здоровья женщин с миомой матки. Российский вестник акушера-гинеколога, 2009, № 1, с. 30–35.
23. Политова А.К. Оптимизация хирургического лечения больных миомой матки: дис. докт. мед. наук: 14.01.01. М., 2012. 251 с.
24. Радзинский В.Е., Тотчиев Г.Ф. Миома матки: курс на органосохранение. Информационный бюллетень. М.: Редакция журнала Status Praesens, 2014, с. 15, 17.
25. Рич Г. Лапароскопическая миомэктомия. Под ред. В.И. Кулакова, Л.В. Адамян. Эндоскопия в диагностике и лечении патологии матки. М., 1997, том 1, с. 139–149.
26. Савельева Г.М., Краснова И.А., Бреусенко В.Г. Современные подходы к ведению больных с миомой матки. Международный медицинский журнал, 2001, № 4, т. 7, с. 22–28.
27. Савицкий Г.А. Миома матки: проблемы патогенеза и патогенетической терапии. 3-е изд. СПб.: ЭЛБИ-СПб, 2003. 236 с.
28. Савицкий Г.А., Савицкий А.Г. Миома матки: проблемы патогенеза и патогенетической терапии. СПб., 2000. 235 с.
29. Самойлова Т.Е. Неоперативные методы лечения миомы матки. Лечащий врач, 2010, № 3, с. 53–60.
30. Самойлова Т.Е. Оптимизация лечения больных лейомиомой матки у женщин репродуктивного возраста: дис. докт. мед. наук: 14.00.01. М., 2006. 312 с.
31. Рухляда Н.Н., Крылов К.Ю., Новиков Е.И., Прохорович Т.И., Коновалова М.В., Воробцова И.Н. Наружные и внутренние кровотечения в акушерско-гинекологической практике. Пособие для врачей / Санкт-Петербург, 2018. Сер. Библиотека педиатрического университета.
32. Гайдуков С.Н., Коновалова М.В., Воробцова И.Н. Профилактика инфекционных осложнений после эмболизации маточных артерий при миоме матки. В сборнике: Актуальные вопросы фундаментальной, клинической медицины и фармации. Сборник научных статей по материалам научно-практической конференции с международным участием, посвященной 25-летию Института медицинского образования Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого. Под редакцией В.Р. Вебера, Р.А. Сулиманова. 2018. С. 147–151.
33. Васильев В.В., Воробцова И.Н., Коновалова М.В., Курдынов Л.В., Шалоня Н.В. Патогенетические особенности эндогенной интоксикации после эмболизации маточных артерий при лечении миомы матки. Вестник Новгородского государственного университета. 2021. № 3 (124). С. 27–29.

© Рухляда Николай Николаевич (nickolasr@mail.ru); Россолюк Дмитрий Сергеевич (drossolko@mail.ru);
 Прохорович Татьяна Ивановна (tatyana.prohovich@yandex.ru); Либова Татьяна Александровна (Libova@mail.ru);
 Воробцова Ирина Николаевна (Ririna-1979@yandex.ru)
 Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ «ГЕСТАЦИОННОГО» ПРОЦЕССА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СРОКА ПОЯВЛЕНИЯ И СТЕПЕНИ ТЯЖЕСТИ ПРЕЭКЛАМПСИИ

FEATURES OF THE COURSE OF THE «GESTATIONAL» PROCESS DEPENDING ON THE TIME OF APPEARANCE AND SEVERITY OF PREECLAMPSIA

I. Simanov

Summary. In this article, a clinical analysis of the features of the appearance of the first clinical symptoms of preeclampsia and the duration of this pathology until the moment of delivery is carried out, taking into account the course of the «gestational» process in 440 patients of childbearing age.

The results of the study showed that the appearance of symptoms of preeclampsia depended on its severity. Of the complications of the course of the «gestational process» in this pathology, toxicosis of the pregnant woman, the threat of pregnancy termination, premature birth in combination with symptoms of high hypertension and proteinuria should be noted.

Knowing the timing of the appearance of the first clinical symptoms of preeclampsia and, accordingly, the factor of the duration of this pathology will allow you to develop optimal tactics for the management of such patients, which will significantly reduce the number of complications. In addition, knowledge of these processes will make it possible to predict the regression of these symptoms after childbirth and to develop optimal methods of rehabilitation therapy.

Keywords: preeclampsia, toxicosis of a pregnant woman, threat of abortion, premature birth.

Симанов Игорь Викторович

кандидат медицинских наук, доцент,
Пятигорский медико-фармацевтический институт —
филиал ФГБОУ ВО ВолгГМУ Минздрава России
simigor1@rambler.ru

Аннотация. В данной статье проведен клинический анализ особенностей появления первых клинических симптомов преэклампсии и длительности данной патологии до момента родов с учетом течения «гестационного» процесса у 440 пациенток фертильного возраста.

Результаты исследования показали, что появление симптомов преэклампсии зависело от ее степени тяжести. Из осложнений течения «гестационного процесса» при данной патологии следует отметить токсикоз беременной, угрозу прерывания беременности, преждевременные роды в сочетании с симптомами высокой гипертензии и протеинурии.

Знание сроков появления первых клинических симптомов преэклампсии и соответственно фактора длительности данной патологии позволит разработать оптимальную тактику ведения таких пациенток, что значительно снизит количество осложнений. Кроме того, знание этих процессов позволит прогнозировать регрессию этих симптомов после родов и выработать оптимальные методы восстановительной терапии.

Ключевые слова: преэклампсия, токсикоз беременной, угроза прерывания беременности, преждевременные роды.

Введение

Выраженность симптомов преэклампсии имеют большое практическое значение. Далеко не всегда данная патология протекает в сочетании отеков, протеинурии и гипертензии. Очень часто отмечается манифестация только одного клинического проявления преэклампсии [1, с. 45; 2, с. 213].

По данным литературы, за последнее десятилетие у нас в стране и в целом в мире, отмечается рост числа преэклампсий на фоне хронических соматических заболеваний [10, с. 15].

Клинические проявления данной патологии могут быть различными. Наиболее стойким клиническим сим-

птомов преэклампсии считается гипертензия. Согласно современным представлениям, нарушение гемодинамики во время беременности является второй непосредственной причиной материнской и перинатальной заболеваемости. Распространенность гипертензии и связанную с ней нарушение гемодинамики наблюдает-ся у каждой четвертой беременной с преэклампсией [7, с. 10; 12, с. 1012].

Нередки случаи развития при данной патологии высокой протеинурии и генерализованных отеков, что в значительной степени ухудшает течение «гестационного» процесса и в дальнейшем исходы заболевания [4, с. 28; 5].

Кроме того, клинические симптомы преэклампсии не исчезают сразу после родоразрешения, а создают предпосылки для обострения в дальнейшем, вплоть до развития экстрагенитальной патологии после родов [9, с. 222].

Знание этих процессов позволит разработать оптимальную тактику ведения таких пациенток, как на амбулаторном, так и стационарном звене оказания помощи, что значительно снизит количество осложнений во время беременности и после родов.

Цель

Цель и задачи исследования — изучение особенностей течения «гестационного процесса» в зависимости от сроков появления первых клинических симптомов преэклампсии и степени тяжести данной патологии.

Материалы и методы исследования

У 440 пациенток с преэклампсией фертильного возраста проведен клинический анализ особенности течения «гестационного процесса» в зависимости от сроков появления первых клинических симптомов преэклампсии (основная группа исследования). 200 пациенток без преэклампсии составили контрольную группу.

Количество обследованных пациенток в зависимости от степени тяжести преэклампсии представлено в таблице 1.

Таблица 1.

Количество обследованных пациенток с преэклампсией

Степень тяжести преэклампсии	Без заболеваний	Наличие фоновых заболеваний
«умеренная» (n=377)	240(100 %)	137 (68.5 %)
«тяжелая» (n=63)	—	63 (31.5 %)
Итого: (n=440)	n=240	n=200

Критерии отбора пациенток в основную группу исследования: возраст от 16 до 41 лет, отсутствие вредных привычек (алкоголизм, курение, наркомания) и преэклампсии в предыдущих беременностях, наличие преэклампсии различной степени тяжести в настоящей беременности.

Критерии отбора в контрольную группу: «репродуктивный» возраст, отсутствие вредных привычек и преэклампсии.

При анализе данных срока появления клинических симптомов преэклампсии учитывались следующие сроки беременности: от 22 до 30 недель беременности, от 31 до 34 недель, от 35 до 38 недель.

Длительность течения преэклампсии от 1 до 3 недель — «короткое» течение, от 4 до 6 недель — «не длительное», более 6 недель — «длительное».

При оценке степени тяжести преэклампсии учитывались: характер отеков, уровень протеинурии, показатели артериального давления.

Полученные цифровые данные исследования были обработаны параметрическими методами оценки достоверности.

Результаты и их обсуждение

Среди обследуемых были представители разных возрастных категорий. Но возрастной состав в зависимости от степени тяжести преэклампсии был различным (табл. 2).

Таблица 2.

Возраст пациенток с преэклампсией

Степень тяжести преэклампсии	до 18 лет	19–30 лет	старше 30 лет
«умеренная» n=377	35 (9.3 %)	254 (67.4 %)	88 (23.3 %)
«тяжелая» n=63	10 (16.7 %)	33 (55 %)	20 (31.8 %)
Итого: n=440	n=45	n=287	n=108

В группе пациенток с «умеренной» формой данной патологии преобладали лица фертильного возраста в первую беременность. При тяжелой преэклампсии возрастало количество беременных старше 30 лет.

Срок беременности, при котором были диагностированы первые клинические проявления преэклампсии имел важное диагностическое значение, так как определял длительность течения данной патологии до родов.

В проведенном исследовании установлено, что при тяжелой преэклампсии наблюдалось «раннее» начало заболевания (табл. 3).

Таблица 3.

Сроки появления первых клинических симптомов преэклампсии

Степень тяжести преэклампсии	Сроки появления симптомов преэклампсии		
	35–38 недель	31–34 недели	24–30 недель
«умеренная» (n=377)	114 (30.2 %)	228 (60.5 %)	35 (9.3 %)
«тяжелая» (n=63)	5 (7.9 %)	15 (23.8 %)	43 (68.3 %)
Итого: (n=440)	n=119	n=243	n=78

При анализе данных табл. 3 в целом по группе исследования у большинства пациенток (82.3 %) с преэклампсией было отмечено появление ее первых клинических симптомов в сроке от 31 до 38 недель беременности.

При «умеренной» форме больше половины (60.5 %) обследуемых имели клинические проявления преэклампсии в сроке от 31 до 34 недель беременности. При «тяжелой» — у большинства пациенток симптомы данной патологии диагностировались раньше (от 24 до 30 недель беременности).

Клинические проявления преэклампсии зависели от ее степени тяжести (табл. 4).

Таблица 4.

Клинические симптомы преэклампсии в зависимости от ее степени тяжести

Степень тяжести преэклампсии	Клинические симптомы преэклампсии		
	отеки	протеинурия	гипертензия
«умеренная» (n=377)	304 (81.4 %)	45 (11.9 %)	28 (7.4 %)
«тяжелая» (n=63)	14 (22.2 %)	30 (47.6 %)	19 (30.2 %)
Итого: (n=440)	n=318	n=75	n=47

При «умеренной» форме данной патологии у большинства пациенток (81.4 %) преобладали отеки на нижних конечностях, у каждой десятой была умеренная протеинурия и гипертензия. При «тяжелой» — у половины отмечалась высокая протеинурия, у каждой пятой — отеки носили генерализованный характер, а у каждой третьей — была высокая гипертензия (табл. 4).

Огромное диагностическое значение для пациенток с преэклампсией имеют особенности течения «гестационного» процесса [3, с. 29; 6, с. 194; 8, с. 204; 11, с. 37].

Анализ данных проведенного исследования показал, что среди осложнений «гестационного процесса» на первом месте был токсикоз беременной. Клинические проявления данного осложнения зависели от степени тяжести преэклампсии.

У каждой третьей пациентки с «умеренной» формой преэклампсии преобладал токсикоз легкой степени тяжести. У половины пациенток с «тяжелой» — умеренный токсикоз. Наиболее частая рвота беременной была отмечена у 20,9 % обследуемых с длительностью течения преэклампсии от 6 недель и более.

По данным исследования, на втором месте среди осложнений «гестации» при преэклампсии была угроза прерывания беременности и преждевременные роды. Эти осложнения также зависели от срока появления клинических симптомов данной патологии и ее степени тяжести.

Угроза прерывания беременности в сроке от 6 до 18 недель беременности была у каждой третьей пациентки с «умеренной» преэклампсией и у половины — «тяжелой». При «тяжелой» форме данное осложнение клинически протекало тяжело — сопровождалось кровянистыми выделениями из половых путей, сильными болями внизу живота.

Преждевременные роды во второй половине беременности были у каждой десятой пациентки с «умеренной» преэклампсией и у каждой третьей с «тяжелой» в сроке от 29 до 35 недель беременности, которые сочетались с высокой протеинурией и гипертензией. Преждевременные роды были также отмечены у каждой второй пациентки с длительностью течения преэклампсии от 6 недель и более.

Преждевременная отслойка нормально расположенной плаценты наблюдалась у 6 из 63 пациенток с «тяжелой» длительно текущей преэклампсией на фоне гипертонической болезни 2 степени. У 4 из 6 беременных преждевременная отслойка плаценты была «полной», клинически сопровождалась обильным кровотечением и рождением детей в тяжелом состоянии.

При анализе данных показателей контрольной группы исследования установлено, что течение беременности у большинства лиц протекало без осложнений, что не превышало показателей в общей популяции.

Следует отметить, что угроза прерывания беременности и преждевременные роды в контроле были отмечены только у лиц с высоким инфекционным индексом и отягощенным инфекционным анамнезом.

Заключение

Знание сроков манифестации клиники преэклампсии позволит разработать оптимальную тактику ведения таких пациенток, что значительно снизит количество «гестационных» осложнений. Кроме того, знание этих процессов позволит выработать оптимальные методы восстановительной терапии после родов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенова А.Н. Преэклампсия и современные методы ее прогнозирования //Forcipe. — 2020. — Т.3. — №51. — С. 44–45.
2. Белоцерковцева Л.Д., Шахнавазова А.М. Анализ статей и диссертаций по теме «Преэклампсия» за последние 5 лет. В сборнике: Фундаментальные и прикладные проблемы здоровья сбережения человека на Севере. Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции. Сургут. — 2022. — С. 205–215.
3. Габдрахманова Э.Р. Беременность и роды у женщин с преэклампсией. В сборнике: Актуальные вопросы теоретической и практической медицины. Материалы 89 Всероссийской студенческой научно-практической конференции с международным участием. Уфа. — 2024. — С. 28–31.
4. Дельсуз С.Ф. Анализ особенностей клинического течения преэклампсии. В книге: МНСК-2020. Медицина. Материалы 58-й Международной научной студенческой конференции. — 2020. — С. 27–28.
5. Киселева Н.И., Жукова Н.П., Арестова И.М., Малаховская Е.А. Преэклампсии в современных условиях. В сборнике: Достижения фундаментальной клинической медицины и фармации. Материалы 80-ой научной сессии, посвященной 90-летию образования ВГМУ. Витебск. — 2025.
6. Мордовина И.И. Иванова П.А. Особенности течения беременности при ранней и поздней преэклампсии. В сборнике: Фундаментальные и прикладные проблемы здоровья сбережения человека на Севере. Сборник материалов VI Всероссийской научно-практической конференции. Редактор А.А. Исаев. Сургут. — 2022. — С. 192–196.
7. Нагоев Т.М., Муминова К.Т., Ходжаева З.С., Холин А.М., Зиганшина М.М., Козлова А.А., Мартиросян Я.О. Материнская гемодинамика и преэклампсия // Акушерство и гинекология. — 2020. — №1. — С. 5–11.
8. Олимова Ф.З., Додхоева М.Ф., Волдошова С.Ш., Салохиддинова Г.Н. Особенности течения гестационного процесса при повторной тяжелой преэклампсии. В книге: XIX Международный конгресс по репродуктивной медицине. Материалы конгресса. Москва. — 2025. — С. 204–206.
9. Родионова А.М., Бондарук Е.А., Голосов К.А. Преэклампсия в послеродовом периоде: особенности течения, акушерская тактика. В книге: XVIII Международный конгресс по репродуктивной медицине. Сборник тезисов. Москва. — 2024. — С. 221–222.
10. Сюндюкова Е.Г., Чулков В.С., Рябкина М.Г. Преэклампсия: современное состояние проблемы //Доктор.Ру. — 2021. — Т.20. — №1. — С. 11–16.
11. Сахарова А.В., Маркелова Ю.В., Соколова Е.А., Сухотина Н.В. Современные аспекты выявления и ведения беременных с преэклампсией //Медицинская сестра. — 2024. — Т.26. — №1. — С. 35–39.
12. Усмонова Г.А. Оценка изменений гемодинамики у женщин с тяжелой преэклампсией //Экономика и социум. — 2023. — № 12-2 (115). — С. 1010–1013.

© Симанов Игорь Викторович (simigor1@rambler.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

КОРРЕКЦИЯ ОБРАЗА ЖИЗНИ И ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОГО СТАТУСА У ПАЦИЕНТОВ С ВЫСОКИМ РИСКОМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОСТРОГО КОРОНАРНОГО СИНДРОМА НА ФОНЕ СИНДРОМА НЕДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ ДИСПЛАЗИИ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ

LIFESTYLE MODIFICATION AND PSYCHOEMOTIONAL STATUS CORRECTION IN PATIENTS AT HIGH RISK OF ACUTE CORONARY SYNDROME AGAINST THE BACKGROUND OF UNDIFFERENTIATED CONNECTIVE TISSUE DYSPLASIA SYNDROME

**O. Sultanova
E. Chernysheva
T. Chivirgina
S. Iskhakov
Z. Suleymanova
D. Sugaliyev**

Summary. Aim of the study: To assess the impact of lifestyle modification and psycho-emotional correction on the risk of developing acute coronary syndrome (ACS) in patients with undifferentiated connective tissue dysplasia syndrome (UCTDS) who are at high risk of cardiovascular complications. *Materials and methods:* The study was conducted as a prospective controlled experiment involving 117 patients with high risk indicators for ACS development on the background of UCTDS. All patients underwent clinical and laboratory assessments, biochemical blood tests, and instrumental examinations. The diagnosis of UCTDS was made based on clinical guidelines, using the questionnaire by Elykumov V.A. and Kopylov A.N. The patients' anxiety levels were assessed by having participants complete the standard Spielberger-Hanin Anxiety Self-Assessment Scale. Statistical analysis of the results was performed using IBM software with STATISTICA 28.0. *Results:* The study confirmed the efficacy of a comprehensive program of lifestyle changes and psycho-emotional correction in patients at high risk of CVD. Over two years, participants who underwent this program showed a significant reduction in the number of acute coronary events — 6.8 % compared to 14.7 % in the control group, indicating a decreased risk (risk coefficient 0.46, $p=0.019$). *Conclusion:* The study demonstrated a significant reduction in anxiety and stress states among participants.

Keywords: acute coronary syndrome, connective tissue dysplasia, cardiovascular diseases, psychoemotional correction, lifestyle modification.

Султанова Оксана Эседуллаевна

кандидат медицинских наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации
oksanka.sultanova@mail.ru

Чернышева Елена Николаевна

доктор медицинских наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации
lena.chernysheva@inbox.ru

Чивиргина Татьяна Вячеславовна

Ассистент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации
tanushka1096@mail.ru

Исхаков Султан Адыгамович

ординатор кардиологии ФПО, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации
na_maile@mail.ru

Сулейманова Загидат Вадимовна

ординатор кардиологии ФПО, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации
zagidat.suleymanova.2002@bk.ru

Сугалиев Даурен Радмирович

ординатор кардиологии ФПО, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации
ktsuaakuka@mail.ru



Введение

Синдром недифференцированной дисплазии соединительной ткани (СНДСТ) представляет собой комплексную проблему здравоохранения, характеризующуюся разнообразием фенотипических проявлений, включая расстройства сердечно-сосудистой системы. По оценкам исследователей, около 10–15 % населения имеют признаки СНДСТ, однако большинство случаев остаются не выявленными или недооценёнными врачами [2; 5; 11; 15].

Среди наиболее серьёзных последствий СНДСТ выделяются ОКС, включая инфаркт миокарда и нестабильную стенокардию. Высокий риск возникновения этих событий обусловлен особенностями строения сосудистой стенки, такими как слабость коллагенового каркаса, нарушение синтеза эластина и повышенный риск образования атеросклеротических бляшек [3; 6; 8; 9]. Кроме того, дополнительные факторы риска, такие как низкая физическая активность, неправильное питание, вредные привычки и хронический стресс, дополнительно повышают опасность сердечно-сосудистых осложнений [10]. Смертность от болезней системы кровообращения за 2024 год по данным ГБУЗ Астраханской области «Ме-

Аннотация. Цель исследования: оценить влияние модификации образа жизни и коррекции психоэмоционального статуса на риск возникновения острого коронарного синдрома (ОКС) у пациентов с синдромом недифференцированной дисплазии соединительной ткани (СНДСТ), находящихся в группе высокого риска сердечно-сосудистых осложнений. *Материалы и методы:* Исследование было выполнено в форме проспективного контролируемого эксперимента с участием 117 пациентов, имеющих высокие показатели риска развития ОКС на фоне СНДСТ. Всем пациентам определялись клинико-лабораторные; биохимические показатели крови; проводились также инструментальные исследования. Диагностика СНДСТ проводилась на основании клинических рекомендаций — анкетирование по Елыкову В.А. и Копылову А.Н. Уровень тревожности пациентов определялся путём заполнения участниками исследования стандартной анкеты Спилбергера-Ханина («Шкала самооценки тревожности»). Статистический анализ результатов проводили на IBM с использованием статистических программ STATISTICA 28.0. *Результаты исследования:* настоящее исследование подтвердило эффективность комплексной программы по изменению образа жизни и психоэмоциональной коррекции у пациентов, находящихся в группе высокого риска ССЗ. В течение двух лет у участников, прошедших такую программу, наблюдалось значительное снижение количества острых коронарных событий — 6,8 % по сравнению с 14,7 % в контрольной группе, что свидетельствует о снижении риска (коэффициент риска 0,46, $p=0,019$). *Заключение:* в рамках исследования значимое уменьшение тревожных и стрессовых состояний.

Ключевые слова: острый коронарный синдром, дисплазия соединительной ткани, заболевания сердечно-сосудистой системы, психо-эмоциональная коррекция, модификация здорового образа жизни.

дицинский информационно-аналитический центр» составила 5414 человек, непосредственно от острого коронарного синдрома 3 человека, от инфаркта миокарда 294, 28 человек от повторного инфаркта миокарда.

Согласно недавним эпидемиологическим исследованиям, распространённость ССЗ среди пациентов с СНДСТ достигает 25–30 %, тогда как общая заболеваемость населения составляет лишь около 10 % [17; 18]. Помимо этого, высокое количество хронических стрессов и психоэмоциональных расстройств среди таких пациентов усиливает негативные последствия для здоровья [1; 4; 7; 13; 14; 16].

Цель исследования

Изучить влияние целенаправленной коррекции образа жизни и психоэмоционального статуса на снижение риска развития ОКС у пациентов с СНДСТ.

Материалы и методы

Клинические данные проведённого исследования получены в ПСО ГКБ № 3 имени С.М. Кирова в 2019–2024 гг. Пациентами подписаны и предоставлены добровольные информированные согласия об участии в исследовании.

довании. Всего обследовано 117 пациентов в возрасте от 40 до 65 лет имеющих высокие показатели риска развития ОКС на фоне СНДСТ. Основными критериями группы высокого риска ОКС являются: наличие документированного инфаркта миокарда в прошлом; повторяющиеся эпизоды стабильной или нестабильной стенокардии; наличие поражения трёх и более коронарных артерий при ангиографии; положительные тестовые пробы с нагрузкой (нагрузочные ЭКГ-тесты, стресс-эхо-КГ); подтверждённая гиперхолестеринемия, сахарный диабет, артериальная гипертензия, ожирение. Вторичные критерии включали лабораторные показатели (уровень холестерина, гликемия, высокое АД), функциональные способности, индекс массы тела и оценку психоэмоционального благополучия.

При наличии хотя бы двух вышеуказанных критериев пациенты автоматически попадают в категорию высокого риска. Основным методом оценки был сравнительный анализ динамики показателей качества жизни и частоты сердечно-сосудистых событий до и после внесения изменений в образ жизни.

Все пациенты были случайным образом разделены на две группы: экспериментальная группа (n=59) и контрольная группа (n=58). Участники экспериментальной группы получали индивидуальный план коррекции образа жизни, включавший диету с низким содержанием насыщенных жиров и простых углеводов, ежедневную физическую активность средней интенсивности, тренинг по управлению стрессом и отказ от вредных привычек. А участники контрольной группы продолжали получать стандартную терапевтическую поддержку и рекомендации по образу жизни без специализированных программ и позволила оценить естественный ход событий и динамику заболеваний у пациентов с высоким риском, не получавших специальную индивидуализированную стратегию оздоровления. Наблюдение длилось два года. Основное измеряемое событие определялось как любое новое проявление острого коронарного синдрома.

Всем пациентам определялись клиничко-лабораторные (общий анализ крови; общий анализ мочи); биохимические показатели крови (креатинин, печеночные пробы, липидный спектр, глюкоза); содержание микроэлементов (Mg, K, Ca); маркеры некроза миокарда (количественное определение тропонина I, MB — фракции креатинфосфокиназы); коагулограмма и проводились инструментальные исследования (ЭКГ в 12 стандартных отведениях), холтеровское мониторирование ритма сердца и программы анализа MT-200, эхокардиоскопия на аппарате, селективная коронароангиография. Диагностика СНДСТ проводилась на основании клинических рекомендаций [12]: клиническая часть — анкетирование по Елыкову В.А. и Копылову А.Н. (обнаружение 6 и более стигм дисэмбриогенеза) [10]; лабораторная

часть — проводилось определение уровня антител человека к коллагенам II и III типа методом ИФА (окси-пролин (OP)) с помощью коммерческой тест-системы (каталожный номер CEA808Ge фирмы «Иммунотэкс», г. Ставрополь, Ставропольский край) согласно прилагаемой к ней инструкции. Уровень тревожности пациентов определялся путём заполнения участниками исследования стандартной анкеты Спилбергера-Ханина («Шкала самооценки тревожности»). Данная методика широко используется в психологии и психиатрии для количественного измерения уровня тревожности у взрослых. Процедура проведения опроса выглядит следующим образом — пациенту предлагается заполнить стандартный бланк анкеты, содержащий серию утверждений, отражающих чувство тревоги, беспокойство, напряженность и другие компоненты тревожности, каждое утверждение оценивается пациентом по четырех балльной шкале (от 1 до 4), где 1 означает полное отсутствие признака, а 4 — ярко выраженный признак. Суммируются баллы по каждому пункту, что даёт суммарный показатель уровня тревожности. Так же психологическое состояние оценивали с помощью и метода Холмса-Рея («Шкала социальной адаптации»). Оно проходило в несколько этапов: 1 этап — интервью или анкетирование: специалист задает конкретные вопросы или заполняет анкету, которая включает пункты, касающиеся различных сфер социальной жизни — семейных отношений, работы, взаимоотношений с окружающими, уровня ответственности и т.д.; 2 этап — оценка ответов: ответы оцениваются по специально разработанной системе баллов или градациям, каждый пункт шкалы имеет определенные критерии, которые позволяют установить степень адаптации; 3 этап — подсчет итогового балла: на основе полученных ответов суммируются баллы, после чего определяют уровень социальной адаптации человека (например, низкий, средний или высокий). 4 этап — интерпретация результатов, на основании итогового балла делается вывод о степени социальной адаптации, а также выявляются возможные проблемы или зоны риска. Этот метод позволяет объективно измерить уровень адаптации человека к социальной среде, выявить конкретные проблемные области, которые требуют внимания или коррекции, обеспечивает матрицу для мониторинга динамики изменений в процессе реабилитации или психологической работы. Общие критерии оценки по баллам следующие: нормальный уровень адаптации: от 40 до 50 — свидетельствует о хорошей социальной адаптированности; от 30 до 40 баллов — лёгкое нарушение или преддверие патологии; менее 30 баллов — патологический уровень (значительные трудности с адаптацией).

В данном исследовании для снижения психоэмоционального напряжения у пациентов экспериментальной группы использовались следующие эффективные методы: регулярные техники релаксации и дыхания (вклю-

чали выполнение дыхательных упражнений и освоение техник глубокого дыхания, направленных на снятие нервного напряжения и активацию парасимпатической нервной системы, эти упражнения проводились под контролем специалиста и входили в состав регулярных занятий, назначаемых пациентам экспериментальной группы); тренировка саморегуляции и когнитивно-поведенческие техники, проводились регулярные сессии с психологом, направленные на развитие навыков преодоления стресса, осознание негативных мыслей и конструктивное реагирование на стрессовые ситуации); физическая активность (прогулки на свежем воздухе, йога, плавание); социальная поддержка и группы взаимопомощи (пациенты имели доступ к программам групповой поддержки, где могли поделиться своим опытом и получить социальную поддержку от сверстников, столкнувшихся с подобными проблемами). Эти рекомендации помогали пациентам формировать новые полезные привычки, снижать уровень стресса и поддерживать оптимальный образ жизни, способствующий профилактике ССЗ и улучшению общего самочувствия.

Статистический анализ результатов проводили на IBM с использованием статистических программ STATISTICA 28.0., достоверность различий между группами проверялась с помощью t-теста Стьюдента и критерия χ^2 Пирсона.

Основные этапы исследования включали: сбор демографических данных и медицинской истории; полноценное медицинское обследование всех участников; реализация специализированной программы коррекции образа жизни, включавшей изменения рациона питания, увеличение двигательной активности, снижение потребления табачных изделий и алкогольных напитков, внедрение техник управления стрессом и практик расслабления.

Результаты исследования

За два года наблюдения зарегистрировано всего 42 случая острых коронарных событий (инсульт — 24 случая, инфаркт миокарда — 18 случаев): в основной группе отмечено 15 случаев (6,8 %), в контрольной группе — 27 случаев (14,7 %). Коэффициент риска возникновения ОКС в основной группе составил 0,46 (95 % — доверительный интервал: 0,24–0,89, $p = 0,019$).

Динамика биохимических и лабораторных показателей пациентов двух групп: экспериментальной и контрольной представлены в таблице 1.

Эти результаты подтверждают значительное положительное влияние программы коррекции на липидный профиль пациентов, что играет критически важную роль в снижении риска развития острых коронарных событий.

Таблица 1.

Динамика биохимических и лабораторных показателей

Показатель	Экспериментальная группа	Контрольная группа	p-значения
Общий холестерин (мг/дл)	180 ± 15 (–18,2 %)	230 ± 20 (–4,5 %)	<0,001
ЛПНП (мг/дл)	100 ± 10 (–28,6 %)	135 ± 15 (–3,6 %)	<0,001
Артериальное давление (мм рт. ст.)	130/80 (–7,1 %)	135/85 (–3,6 %)	0,01
Индекс массы тела (кг/м ²)	26 (–10,3 %)	28 (–3,4 %)	<0,001

Примечание: отрицательное значение в скобках означает процентное снижение показателя относительно начального уровня.

В результате прохождения программы коррекции образа жизни и психоэмоционального статуса у пациентов экспериментальной группы произошло следующее изменение уровня артериального давления. Среднее систолическое артериальное давление (САД) снизилось с 140 мм рт. ст. до 130 мм рт. ст., что составляет абсолютное снижение на 10 мм рт. ст. или относительное снижение на 7,1 % ($p=0,01$); среднее диастолическое артериальное давление (ДАД) снизилось с 90 мм рт. ст. до 80 мм рт. ст., что равно абсолютному снижению на 10 мм рт. ст. или относительному снижению на 11,1 % ($p=0,01$).

Таким образом, благодаря внедрению программы коррекции в экспериментальной группе удалось достичь заметного и статистически значимого снижения уровня артериального давления, что имеет важное значение для профилактики сердечно-сосудистых осложнений.

В результате участия в программе коррекции образа жизни и психоэмоционального статуса у пациентов экспериментальной группы произошло следующее изменение индекса массы тела (ИМТ). Начальный ИМТ 29 кг/м², итоговый ИМТ 26 кг/м². Это означает абсолютное снижение ИМТ на 3 кг/м² или относительное снижение на 10,3 %, что оказалось статистически значимым ($p<0,001$).

Таким образом, реализованная программа позволила эффективно снизить избыточную массу тела, что положительно повлияло на общую сердечно-сосудистую нагрузку и качество жизни пациентов.

Психологическое состояние оценивали с помощью анкеты Спилбергера-Ханина («Шкала самооценки тревожности») и метода Холмса-Рея («Шкала социальной адаптации»). До начала исследования средний уровень

тревожности и стресса был одинаковым в обеих группах — средний балл по Спилбергеру — 45 баллов, социальный стресс (шкала Холмса-Рея) — более 40 баллов. В таблице 2 представлены результаты, полученные после двух лет наблюдения.

Таблица 2.

Изменения психоэмоционального состояния пациентов

Параметры оценки	Экспериментальная группа (n=59)	Контрольная группа (n=58)	p-значение
Уровень тревожности (шкала Спилбергера-Ханина)	28 (–37,8 %)	40 (–11,1 %)	<0,001
Социальный стресс (шкала Холмса-Рея)	12 (–40,0 %)	30 (–15,0 %)	<0,001

Примечание: отрицательное значение в скобках обозначает процентное снижение уровня тревожности и стресса.

Данные представленные в таблицах ясно указывают на существенные преимущества программы коррекции образа жизни и психоэмоционального статуса, используемой в экспериментальной группе, по сравнению с обычной терапией в контрольной группе. Эти изменения сопровождались значительным снижением риска развития острых коронарных событий и повышением качества жизни пациентов. В экспериментальной группе, проходившей программу коррекции образа жизни и психоэмоционального статуса, среднее значение уровня тревожности, оцененного по шкале Спилбергера-Ханина, претерпело значительное снижение: начальное значение уровня тревожности: 45 баллов; финальное значение уровня тревожности: 28 баллов; абсолютное снижение составило 17 баллов, что равняется относительному снижению на 37,8 % ($p < 0,001$). Таким образом, применяемые меры привели к выраженному и статистически значимому улучшению психоэмоционального состояния пациентов экспериментальной группы.

Заключение

Результаты данного исследования подтверждают эффективность программы модификации образа жизни

и психоэмоциональной коррекции у пациентов с высоким сердечно-сосудистым риском. В течение двух лет у участников экспериментальной группы отмечено значительное снижение частоты возникновения ОКС — 6,8 % против 14,7 % в контрольной группе, что соответствует коэффициенту риска 0,46 ($p = 0,019$). Программа способствовала улучшению биохимических и лабораторных показателей: существенно снизились уровни общего холестерина и ЛПНП (на 18,2 % и 28,6 % соответственно, $p < 0,001$), повысилась эффективность контроля артериального давления (снижение на 7,1 % и 11,1 %, $p = 0,01$), а также снизился индекс массы тела на 10,3 % ($p < 0,001$). Психоэмоциональное состояние участников экспериментальной группы значительно улучшилось: уровень тревожности снизился на 37,8 %, стресс — на 40 % ($p < 0,001$). Дополнительные меры, включающие дыхательные практики, когнитивно-поведенческую терапию и социальную поддержку, помогли справиться с эмоциональным напряжением, что свидетельствует об их высокой эффективности. Постоянное соблюдение режима дыхательных практик обеспечивало стабильное снижение уровня тревожности, улучшение сна и повышение общего энергетического потенциала, что отражалось в значимом улучшении качества жизни и лабораторных показателей, что подтверждено результатами анкетирования и статистическими расчетами. В ходе исследования выявилось значительное снижение риска развития острых коронарных событий у участников программы, улучшение липидного профиля, снижение артериального давления и массы тела, статистически значимое уменьшение уровней тревожности и стресса, полезное влияние комплексной психоэмоциональной поддержки и коррекции образа жизни на качество жизни пациентов. Эти данные свидетельствуют о важности внедрения комплексных программ модификации образа жизни и психоэмоциональной коррекции в клиническую практику для профилактики и лечения ССЗ, особенно у пациентов с высоким риском развития ОКС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов А.С. Психоэмоциональные аспекты профилактики сердечно-сосудистых заболеваний // Кардиология. — 2018. — № 3. — С. 45–52.
2. Иванова Н.А., Петров В.В. Современные подходы к диагностике и лечению дисплазии соединительной ткани // Клиническая медицина. — 2021. — № 4. — С. 45–52.
3. Иванова Е.В., Смирнов П.А. Влияние модификации образа жизни на состояние пациентов с гипертонической болезнью // Российский журнал кардиологии. — 2019. — № 5. — С. 34–41.
4. Кузнецова Н.В., Левина М.А. Психологическая поддержка больных с ишемической болезнью сердца // Вестник психологии и педагогики. — 2020. — № 7. — С. 58–65.
5. Кузнецова М.В., Дмитриев И.А. Факторы риска развития дисплазии соединительной ткани у детей // Педиатрия. — 2023. — № 2. — С. 20–27.
6. Логинов В.Ю. Основы профилактики сердечно-сосудистых заболеваний. — М.: Медицинское информационное агентство, 2017. — 320 с.

7. Михайлов П.В., Романов А.С. Комплексные программы по снижению уровня тревожности у пациентов с ИБС // Журнал практической кардиологии. — 2021. — Т. 29, № 2. — С. 122–128.
8. Назарова О.В., Григорьев А.С. Новые методы терапии при заболеваниях соединительной ткани // Медицинский журнал. — 2024. — № 1. — С. 5–12.
9. Новиков А.В. Модификация образа жизни при профилактике АГ и ИБС // Российский медико-биологический журнал. — 2019. — № 10. — С. 78–84.
10. Орлова Т.Ю., Федорова И.А. Роль физической активности в управлении симптомами дисплазии соединительной ткани // Вестник спортивной медицины. — 2021. — № 3. — С. 66–70.
11. Пастухов Ю.В., Алексеева Е.В. Биомеханические особенности пациентов с дисплазией соединительной ткани // Травматология и ортопедия. — 2022. — Т. 86, № 2. — С. 88–94.
12. Патент на изобретение № 2665387 Российская Федерация. Способ диагностики дисплазии соединительной ткани: заявл. 04.05.2017; опубл. 29.08.2018 / Елыкомова В.А., Копылова А.Н.
13. Попова Т.И., Зайцева И.П. Эффективность психоэмоциональной терапии у пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями // Вестник клинической психологии. — 2020. — № 4. — С. 23–30.
14. Рассадина В.В. Психологические методы оценки личности. М.: Академический проект, 2015, с. 120–125.
15. Смирнова Е.П., Колесников В.Ю. Генетические аспекты дисплазии соединительной ткани: новые перспективы // Журнал генетики и наследственности. — 2022. — Т. 58, № 3. — С. 112–119.
16. Тарасов Ю.И. Психоэмоциональные факторы риска развития сердечно-сосудистых заболеваний // Вестник научных исследований. — 2022. — № 1. — С. 15–22.
17. Федорова Ю.Б., Григорьева Е.А. Лечение и профилактика ишемической болезни сердца: современные подходы // Медицинский вестник. — 2020. — № 6. — С. 17–24.
18. Фролов А.В., Сергеева Н.В. Проблемы диагностики и профилактики дисплазии соединительной ткани у взрослых // Кардиология и ревматология. — 2023. — № 6. — С. 101–108.

© Султанова Оксана Эседуллаевна (oksanka.sultanova@mail.ru); Чернышева Елена Николаевна (lena.chernysheva@inbox.ru);
Чивиргина Татьяна Вячеславовна (tanushka1096@mail.ru); Исхаков Султан Адыгамович (na_maile@mail.ru);
Сулейманова Загидат Вадимовна (zagidat.suleymanova.2002@bk.ru); Сугалиев Даурен Радмирович (ktsuaakuka@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕЧЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ С ХРОНИЧЕСКИМ КАТАРАЛЬНЫМ ГИНГИВИТОМ ПУТЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ В КОМПЛЕКСНУЮ ТЕРАПИЮ ОЗВУЧЕННОГО 0,05% РАСТВОРА ХЛОРГЕКСИДИНА БИГЛЮКОНАТА

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF PATIENT TREATMENT WITH CHRONIC CATARRHAL GINGIVITIS BY INCLUDING THE ANNOUNCED 0.05% SOLUTION OF CHLORHEXIDINE BIGLUCONATE IN COMPLEX THERAPY

**M. Tk hazaplizheva
F. Batyrbekova
L. Kardanova
K. Shkhagapsoeva
K. Kardanova**

Summary. The use of antimicrobial agents in the form of rinses and mouthwashes has a short-term therapeutic effect due to washout by saliva and gingival fluid, necessitating the use of local antimicrobial delivery systems to ensure prolonged action.

One such method is the use of a 0.05 % solution of chlorhexidine bigluconate. In our study, we treated patients with chronic catarrhal gingivitis, dividing them into two groups: Group 1, the study group, which received treatment with a 0.05 % solution of chlorhexidine bigluconate; Group 2, the control group, which received a 0.05 % solution of chlorhexidine bigluconate in the form of rinses and mouthwashes. The obtained results demonstrate the effectiveness of the 0.05 % chlorhexidine bigluconate solution compared to the conventional method, substantiating the feasibility of this method.

Keywords: gingivitis, treatment, ultrasound, chlorhexidine bigluconate.

Тхазаплизева Марина Тулевна

Доцент,

ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова», г. Нальчик

mar_tul25@mail.ru

Батырбекова Фатима Рашидовна

Доцент,

ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова», г. Нальчик

batyrbekovaf@mail.ru

Карданова Лариса Владимировна

Доцент,

ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова», г. Нальчик

kard-77@yandex.ru

Шхагапсоева Карина Аслановна

Доцент,

ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова», г. Нальчик

Karina.denta@mail.ru

Карданова Карина Хасанбиевна

Доцент,

ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова», г. Нальчик

kardanovakarina@mail.ru

Аннотация. Применение антимикробных препаратов в виде полосканий и ротовых ванночек оказывает кратковременный лечебный эффект ввиду вымывания слюной и десневой жидкостью, что обуславливает использование локальных систем доставки противомикробных препаратов для обеспечения пролонгированного действия.

Одним из таких методов является применение озвученного 0,05 % раствора хлоргексидина биглюконата. В нашей работе проведено лечение пациентов с хроническим катаральным гингивитом, которые были разделены на 2 группы: 1 группа — основная, в которой проводилась обработка озвученным 0,05 % раствором хлоргексидина биглюконата; 2 — группа контрольная, в лечении которой применялся 0,05 % раствор хлоргексидина биглюконата в виде полосканий и ванночек. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применения озвученного 0,05 % раствора хлоргексидина биглюконата по сравнению с общепринятым методом, что обосновывает целесообразность применения данного метода.

Ключевые слова: заболевания пародонта, лечение, ультразвук, хлоргексидин биглюконат.

Актуальность

Одну из наиболее актуальных проблем стоматологии, имеющей социальную значимость, являются воспалительные заболевания пародонта (ВЗП), что обусловлено высокой распространённостью и тяжёлыми изменениями в тканях пародонта и организма больного в целом, поражением лиц молодого возраста. Интактный пародонт встречается лишь в 2–10 % наблюдений, пародонтит средней степени тяжести — в 25–45 %, тяжелой степени — в 5–20 % наблюдений, при этом распространённость заболеваний пародонта в возрастной группе 35–44 лет по миру составляет 94,3 % [11,13].

По данным ВОЗ, очень высокий уровень заболеваний пародонта отмечается в возрасте 35–44 лет (65–98 %) и 15–19 лет (55–89 %).

Прогрессирующий характер течения, недостаточная эффективность применяемых методов терапии ставят проблему лечения данной патологии в ряд общемедицинских [1; 4]. Наиболее частым заболеванием тканей пародонта является гингивит, наблюдающийся у лиц не старше 30 лет.

В настоящее время доказана определяющая роль микробиоты полости рта в патогенезе болезней пародонта. Микробный налет (бляшка), ассоциации микроорганизмов и продукты их метаболизма являются этиопатогенетическими факторами, индуцирующими воспалительный процесс в тканях пародонта. При этом основную пародонтопатогенную роль играют не строго специфические виды микроорганизмов, а различные их сочетания. Но, основная роль принадлежит анаэробным микроорганизмам: *Actinobacillus actinomycetemcomitans*, *Porphyromonas Gingivalis*, *Prevotella intermedia* и др. [2,10].

В этой связи основной целью терапии заболеваний пародонта является эрадикация его возбудителей и устранение отрицательных последствий их воздействия на окружающие ткани [14], важным этапом которого является медикаментозная терапия [3].

Отечественный рынок лекарственных средств для местного лечения воспалительных заболеваний пародонта представлен многочисленным набором препаратов, которые обладают противовоспалительным, антимикробным, антисептическим свойствами [5,6].

Однако, традиционная терапия эффективна не во всех случаях, что показывают клинические исследования [7,8,9]. Применение антимикробных препаратов в виде полосканий и ротовых ванночек оказывает кратковременный лечебный эффект ввиду вымывания слюной и десневой жидкостью, что обуславливает использование локальных систем доставки противомикробных

препаратов для обеспечения пролонгированного действия [12]. В связи с этим представляется необходимым совершенствование применяемых лекарственных средств и форм их введения.

Цель

Повышение эффективности лечения воспалительных заболеваний пародонта, в частности хронического катарального гингивита, путем использования озвученного 0,05% раствора хлоргексидина биглюконата.

Материалы и методы

В исследовании принимали участие 200 человек в возрасте от 19 до 25 лет с хроническим генерализованным гингивитом, из них 110 женщин и 90 мужчины. Всем больным проводилось стоматологическое обследование, с помощью основных методов (опрос, визуальный осмотр полости рта) и дополнительных (индексная оценка гигиенического состояния полости рта и индексная оценка состояния тканей пародонта). Для выявления зубных отложений на поверхности зубов и объективной оценки гигиенического состояния полости рта, также эффективности гигиенических мероприятий использовали упрощенный индекс гигиены ИГР-У (ОHI-S). Для определения выраженности воспалительного процесса и его локализации применяли пробу Шиллера-Писарева, основанную на прижизненной окраске гликогена десны, содержание которого увеличивается при воспалении. Данная проба выражается в баллах в виде йодного числа. Количественная оценка интенсивности и распространенности воспалительного процесса в десне проводилась с помощью папиллярно-маргинально-альвеолярного индекса гингивита — РМА. Воспалительный процесс оценивали по степени окрашивания десны йод-содержащим раствором. Ранние признаки воспаления можно определить по наличию симптома кровоточивости при зондировании десневой борозды. Индекс кровоточивости определяли по методу Н.Р.Мuhlemann, S.Son.

Эти пробы также служили тестом для оценки эффективности лечения. Критериями контроля состояния тканей пародонта являлись: наличие болевого синдрома, гиперемии, отека, наличие и выраженность кровоточивости, индексная оценка.

Эффективность лечения оценивали по клиническим данным: исчезновение болевого синдрома, уменьшение кровоточивости, гиперемии, отека и динамики изменения индексов, которые определяли при контрольных осмотрах на 3, 5, 7 сутки и по окончании лечения — 10 суток.

Критериями здоровой десны являются розовый цвет, заостренные верхушки десневых сосочков, плотность тканей, отсутствие кровоточивости.

Все данные вносились в карту обследования стоматологического пациента.

В комплексе лечения для инактивации бактерий микробного налета (зубной бляшки) использовали 0,05% раствор хлоргексидина биглюконата.

Пациенты были рандомизированы на 2 группы: 1-я группа — основная (100 человек) в лечении которых использовали озвученный 0,05 % раствор хлоргексидина биглюконата и 2-я группа — контрольная (100 человек), которым проводилась обработка 0,05 % раствором хлоргексидина биглюконата в виде полосканий и ванночек 2 раза в день.

Хлоргексидин — местный антисептик, оказывает длительный антибактериальный эффект. Раствор хлоргексидина биглюконата эффективен в отношении широкого перечня микроорганизмов: *Bacteroides fragilis*, *Neisseria gonorrhoeae*, *Trichomonas vaginalis*, *Gardnerella vaginalis*, *Chlamidia* spp., *Treponema pallidum*, *Ureaplasma* spp.

Ультразвуковое лечение (ультразвуковая кавитация) относится к физическим методам. Способ ультразвуковой обработки полости рта заключается в том, что озвученный раствор подается на рану посредством эшелонов аэрозольных частиц, которые образуются на торце работающего инструмента, слетающих с него и ударяющихся о раневую поверхность с частотой ультразвука. Акустические волны при этом, последовательно распространяются в тканях. Под действием ультразвука, в жидкой среде возникает кавитация, в результате которой образуются свободные радикалы, обладающие высокой антисептической активностью. При этом повышается скорость и глубина проникновения лекарственных веществ в ткани, а также максимальная концентрация. Метод ультразвуковой аэрозольной обработки позволяет совместить антибактериальное действие 0,05 % раствора хлоргексидина биглюконата и ультразвука с процессом механической очистки.

Результаты и обсуждение

Пациенты обеих групп предъявляли жалобы на кровоточивость десен при чистке зубов и при приеме жесткой пищи, неприятный привкус во рту, зуд десен. Общее состояние не нарушено. Осмотр полости рта выявил обилие мягкого зубного налета в пришеечной области практически всех групп зубов. Выявлены признаки воспаления десны, характерные для катарального гингивита средней степени тяжести, такие как, отек, гиперемия, выраженный цианоз слизистой оболочки десны, кровоточивость при зондировании. По показателям индекса ИГР-У (ОHI-S) гигиеническое состояние полости рта в среднем составило 5,2 балла, что соответствует плохому

уровню гигиены. Определение йодного числа по пробе Шиллера-Писарева в среднем составило 4,9 балла, что оценивается как умеренно выраженный воспалительный процесс. Индекс РМА у обследуемой группы пациентов выявил значительную распространенность воспалительного процесса — 46 %, что соответствовало гингивиту средней степени тяжести. Кровоточивость десны по методу Н.Р.Мuhlemann, S.Son выявлена у всех обследуемых в той или иной степени.

На фоне проводимого лечения на 10 сутки отмечен положительный эффект в обеих группах. Отсутствовали жалобы на кровоточивость при чистке зубов и при приеме пищи. Визуально не определялись отечность и гиперемия, зондирование не вызывало кровоточивости.

Гигиеническое состояние полости рта у всех исследуемых пациентов значительно улучшилось, что подтверждается показателем редукции индекса ИГР-У (ОHI-S), который в течение 10 дней снизился на 4,3 балла и достиг значения 0,9 в среднем, что соответствует хорошему уровню гигиены.

В результате проведенного лечения определено снижение йодного числа по пробе Шиллера-Писарева до 0 баллов (окраска десны — бледно-желтая) и индекса РМА до 0,6 балла, что свидетельствует об отсутствии воспалительного процесса.

Однако, в основной группе положительная динамика наблюдалась в более ранние сроки, где в ходе лечения использовали методику обработки слизистой оболочки озвученным 0,05 % раствором хлоргексидина биглюконата: на 2–3 сутки пациенты практически не предъявляли жалоб. Клинические признаки (отек, гиперемия и кровоточивость при зондировании) значительно уменьшились. У 4 пациентов воспалительные явления сохранялись в области десневых сосочков отдельных зубов. Индекс ИГР-У (ОHI-S) снизился до 2,1 балла (удовлетворительный уровень гигиены полости рта), йодное число по пробе Шиллера-Писарева снизилось и составило 2,3 балла (слабовыраженный процесс воспаления). Значение индекса РМА снизилось до 25,2 % в среднем (ограниченная распространенность воспалительного процесса).

Во второй группе положительная динамика отмечается только спустя 5–6 суток. Значение индекса ИГР-У (ОHI-S) снизился до 2,4 балла (удовлетворительный уровень гигиены полости рта), йодное число по пробе Шиллера-Писарева снизилось и составило 2,3 балла (слабовыраженный процесс воспаления). Значение индекса РМА снизилось до 26,2 % в среднем.

Выводы

1. Результаты проведенного исследования свидетельствуют об эффективности применения озву-

ченного 0,05 % раствора хлоргексидина биглюконата в комплексном лечении хронического генерализованного катарального гингивита.

2. Применение озвученного 0,05 % раствора хлоргексидина значительно снижает сроки лечения хронического катарального гингивита, что определяется уменьшением клинически выраженных

симптомов воспаления, а также показателями индексной оценки.

Это позволяет рекомендовать озвученный 0,05% раствор хлоргексидина в практику при лечении хронического катарального гингивита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахкамова Т.М. Оптимизация комплексного лечения хронического генерализованного пародонтита: автореферат дисс. ... канд. мед. наук. — Казань, 2007.
2. Борисов Л.Б., Фрейдлин И.С. Микробиология и иммунология в стоматологии. Л., 1987. 81 с.
3. Воронина А.И. Оптимизация консервативного лечения хронического генерализованного пародонтита легкой и средней степени тяжести с использованием различных антибактериальных средств: автореферат дисс. ... канд. мед. наук. — Н. Новгород, 2011.
4. Гриценко Е.А., Суетенков Д.Е. и соавт. Основные аспекты этиологической профилактики пародонтопатий у детей и подростков // Саратовский научно-медицинский журнал. — 2011. — Т. 7. — № 1. — С. 234–239.
5. Грудянов А.И. и др. Антимикробная и противовоспалительная терапия в пародонтологии. — М.: МИА, 2004. — 79 с.
6. Грудянов А.И., Александровская И.Ю., Курзунина В.Ю. Изучение клинической эффективности лечебно-профилактических средств линии «Асепта при лечении воспалительных заболеваний пародонта» // Пародонтология 2008 №3(48) с.55–57
7. Грудянов А.И. Заболевания пародонта. М.: Мединформ агент 2009, 315–336
8. Леонова Л.Е., Павлова Г.А., Омарова Л.В., Баранников В.Г., Кириченко Л.В., Варанкина С.А. Комплексное лечение хронического генерализованного гингивита с использованием минералотерапии. / Стоматология №2, 2015. Стр. 10–12
9. Лемецкая Т.И. Лечение воспалительных заболеваний пародонта. М. Практика 2003, 55–58.
10. Лукиных Л.М., Жулев Е.Н., Чупрунова И.Н. Болезни пародонта. Нижний Новгород: Изд-во НГМА, 2005. — 322 с.
11. Почтаренко В.А. Изучение влияния генетического полиморфизма человека на особенности течения воспалительных заболеваний пародонта: дисс. ... канд. мед. наук. — М., 2005.
12. Соловьева О.В. Эффективность комплексного лечения больных хроническим пародонтитом с местным применением новых форм антибактериальных препаратов пролонгированного действия: автореферат дисс. ... канд. мед. наук. — М., 2005.
13. Янушевич О.О. Заболевания пародонта. — М., 2010. — 168 с.
14. Унанян А.А. Обоснование комбинированного антибактериального и иммуномодулирующего лечения хронических болезней пародонта: автореферат дисс. ... канд. мед. наук. — М., 2011.

© Тхазаплизева Марина Тулевна (mar_tul25@mail.ru); Батырбекова Фатима Рашидовна (batyrbekovaf@mail.ru);
Карданова Лариса Владимировна (kard-77@yandex.ru); Шарапсоева Карина Аслановна (Karina.denta@mail.ru);
Карданова Карина Хасанбиевна (kardanovakarina@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

Наши авторы

Abaev Yu. — Postgraduate, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design

Abdurakhmanova Z. — Assistant, Dagestan State Medical University

Andreev A. — National Research University ITMO

Averina K. — Assistant, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky»

Azab M. — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg Russia

Batyrbekova F. — Associate Professor, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Bayyr D. — Postgraduate, Katanov Khakass State University

Belomestnov S. — MD, PhD, Associate Professor, Ural State Medical University of the Russian Ministry of Health; Obstetrician-gynecologist, Yekaterinburg Clinical Perinatal Center

Blinov N. — oncologist of the abdominal department № 1 of the Samara Regional Clinical Oncology Center

Borisova E. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, (Yakutsk)

Boshchenko V. — MD, Associate Professor, Siberian State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation

Butakov V. — Junior Researcher, PhD Student, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences»

Butyrskaya T. — PhD of Biology, docent, Russian State Social University

Chernysheva E. — Doctor of Medical Sciences, Astrakhan State Medical University Ministry of Health of Russia

Chivirgina T. — Assistant, Astrakhan State Medical University Ministry of Health of Russia

Chudnov I. — Post-graduate student, Moscow City University

Chumarnaya T. — MD, PhD, Biology Doctor of Medical Sciences, Senior Researcher, V.S. Markhasin Laboratory of

Our authors

Mathematical Physiology, Institute of Immunology and Physiology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Dulesov A. — doctor of technical sciences, assistant professor, Katanov Khakass State University

Frolov S. — PhD, Head of Abdominal department № 1 of Samara Regional Clinical Oncology Center

Galimov R. — Postgraduate Student, Khanty-Mansiysk State Medical Academy; X-ray Endovascular Diagnostics and Treatment Physician, Khanty-Mansiysk District Clinical Hospital

Gaulika S. — postgraduate student, cardiovascular surgeon, Khanty-Mansiysk State Medical Academy, Surgut, Russia

Gorgun A. — X-ray Endovascular Diagnostics and Treatment Physician, Khanty-Mansiysk District Clinical Hospital

Gorshenina M. — Resident, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosova», (Yakutsk)

Gryzlov V. — Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I

Gural A. — doctor of the highest category, urologist-oncologist, Tomsk Regional Oncology Dispensary; assistant of the Department of General and Pediatric Urology-Andrology, Siberian State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation

Guseinova N. — Kabardino-Balkarian State University Medical Academy

Hoylaarak Z. — senior Lecturer, Tuva State University

Idrisova L. — Candidate of Medical Sciences, Pyatigorsk Medical and Pharmaceutical Institute a branch of the Volgograd State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation

Ilyin R. — PhD Student, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration

Iskhakov S. — Resident, Head of the Department of Cardiology FPO, Astrakhan State Medical University Ministry of Health of Russia

Kaganov O. — Doctor of Science, professor, Samara State Medical University; main researcher in Samara Regional Clinical Oncology Center

Karavaev V. — Postgraduate student, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin», Yekaterinburg

Kardanov A. — Resident urologist, Pirogov Russian National Research Medical University

Kardanova A. — Kabardino-Balkarian State University Medical Academy

Kardanova K. — Associate Professor, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Kardanova L. — Associate Professor, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Kardanova M. — Candidate of Medical Sciences, Kabardino-Balkarian State University

Kishkinova O. — Senior Lecturer, K.I. Skryabin Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology

Korzhuk V. — Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg Russia

Krepak I. — Financial University under the Government of the Russian Federation; Head of information security group, LLC «Klinika Bud Zdorov»

Kretchetov S. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky»

Krivokhizhin I. — postgraduate student, Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra «Surgut State University»; Oncologist at Surgut Regional Clinical Hospital, Surgut, Russia

Ksenofontov A. — Obstetrician-gynecologist, State Budgetary Healthcare Institution of the Sverdlovsk Region «Yekaterinburg Clinical Perinatal Center»

Kurovsky S. — Head of the Research Department of LLC «Higher School of Education»

Ledovskaya E. — Candidate of Technical Sciences, Russian Technological University MIREA, Moscow

Libova T. — MD, PhD, Saint Petersburg State Pediatric Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation

Lityagin S. — Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Lomteva N. — Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, FSBEI of HE «Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev»

Machalin P. — Urologist, Yudin City Clinical Hospital, Moscow

Magomedov A. — MD, PhD, Head of the Surgical Department of the Federal Healthcare Institution Medical and Sanitary Unit of the Republic of Dagestan, Major of the Medical Service, Assistant, Dagestan State Medical University

Magomedov M. — MD, Dagestan State Medical University

Marinina I. — PhD of Biology, docent, Russian State Social University

Matin Abdul — Postgraduate student, infectious disease physician, FGAOU VO «Russian National Research Medical University named after N.I. Pirogov»

Mishin D. — Head of the Editorial and Publishing Department of LLC «Higher School of Education»

Molchanov A. — Doctor of Medical Sciences, Head of the Department of Surgery, Khanty-Mansiysk State Medical Academy, Khanty-Mansiysk, Russia

Morgunov D. — cardiovascular surgeon, Head of the department OHLSNRS and EX District Cardiology Dispensary Center for Diagnostics and Cardiovascular Surgery

Mustafayev A. — Urologist Federal Medical Biomedical Center named after A.I. Burnazyan FMBA of Russia

Nevolin F. — Post-graduate student, Moscow City University (MCU)

Nikishov S. — Doctor of Economics, Associate Professor, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration

Nikitin I. — Doctor of Medical Sciences, Professor, FGAOU VO «Russian National Research Medical University named after N.I. Pirogov»

Nikolaev D. — Laboratory Assistant of the Scientific Group, Sakhalin Branch of the Botanical Garden-Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Okulevich N. — oncologist of the abdominal department № 1 of the Samara Regional Clinical Oncology Center

Oorzhak Ch. — senior Lecturer, Tuva State University

Osorkina M. — Senior Specialist in Strategic Development, Limited Liability Company «Unified digital platform», Moscow

Pakholiuk V. — Financial University under the Government of the Russian Federation

Palvanov M. — Postgraduate Student, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Moscow State Technological University «STANKIN»

Panteleyev M. — Ph.D. in Technology, Associate prof., Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Parsadanyan A. — MD, Professor, Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra «Surgut State University»; Oncologist at Surgut Regional Clinical Hospital

Pavlov P. — MD, PhD, Head of the Department of X-ray Surgical Diagnostic and Treatment Methods, Khanty-Mansiysk District Clinical Hospital Khanty-Mansiysk

Pichugova S. — MD, PhD, Cytology and Electron Microscopy Laboratory Physician, Ya.B. Beikin Clinical and Diagnostic Center, Yekaterinburg, Russia

Poliskikh S. — Candidate of Biological Sciences, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I

Popova A. — Derzhavin Tambov State University

Pospelov A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky»

Prokhorovich T. — MD, PhD, Saint Petersburg State Pediatric Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation

Ramazanov M. — MD, Associate Professor, Dagestan State Medical University

Rein T. — Doctor of philosophy, Associate Professor of the Department of information security, Kemerovo State University

Rogovskaya Yu. — MD, PhD, pathologist, Tomsk Regional Oncology Dispensary

Romashkova O. — Doctor of Engineering, Professor, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEPA), Moscow, Russia

Rossolko D. — MD, PhD, Saint Petersburg State Pediatric Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation

Rukhlyada N. — MD, Professor, Saint Petersburg State Pediatric Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation

Salnikova D. — FSBEI of HE Astrakhan SMU of the Ministry of Health of the Russian Federation

Serezleev D. — Postgraduate, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design

Sevostyanova O. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Ural State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, Yekaterinburg, Russia

Shchepkin D. — Ph.D. Biologist, Senior Researcher, Head of the Laboratory of Translational Medicine and Bioinformatics, Federal State Budgetary Scientific Institution «Institute of Immunology and Physiology» of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Shkhagapsoeva K. — Associate Professor, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Shmelev O. — Junior Researcher, PhD Student, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences»

Sila A. — ITMO University, Saint Petersburg Russia

Simanov I. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Pyatigorsk Medical and Pharmaceutical Institute — Branch of the Volgograd State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation

Sklyarov B. — Resident Physician, Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow

Skobeleva A. — Assistant, Derzhavin TSU

Stepanov M. — Tomsk Polytechnic University, Russia

Sugaliyev D. — Resident, Head of the Department of Cardiology FPO, Astrakhan State Medical University Ministry of Health of Russia

Suleymanova Z. — Resident, Head of the Department of Cardiology FPO, Astrakhan State Medical University Ministry of Health of Russia

Sultanova O. — Candidate of Medical Sciences, Astrakhan State Medical University Ministry of Health of Russia

Superekin I. — Head of Strategy, Limited Liability Company «Unified digital platform», Moscow

Tarashev A. — PhD of Economics, Associate Professor, Senior Researcher, Research Laboratory for University Development Problems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg

Tkhazaplizheva M. — Associate Professor, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Тлупова А. — Medicine Kabardino-Balkarian State University Medical Academy

Trifonov S. — Head of Laboratory, PhD in Biological Sciences, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences»

Trunkin A. — Postgraduate student at RANEPa

Tugar-ool E. — senior Lecturer, Tuva State University

Tyryshkin S. — PhD, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul

Uranova V. — Assistant, FSBEI of HE Astrakhan SMU of the Ministry of Health of the Russian Federation

Usynin E. — MD, Head of the Department of General Oncology, Research Institute of Oncology, Tomsk National Research Medical Center physician of the highest category, head of the oncurological group, member of the board of the Russian Society of Oncurologists

Uvarova L. — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Federal State Autonomous Educational Institution

of Higher Education «Moscow State Technological University «STANKIN»

Verezubova N. — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, K.I. Skryabin Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology

Vorobtsova I. — MD, PhD, Saint Petersburg State Pediatric Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation

Yakovleva O. — Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, K.I. Skryabin Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology

Yermilin D. — Assistant, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky»

Zhambekova Z. — Kabardino-Balkarian State University Medical Academy

Zinoviev A. — postgraduate student, Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg

Требования к оформлению статей, направляемых для публикации в журнале



Для публикации научных работ в выпусках серий научно-практического журнала «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики» принимаются статьи на русском языке. Статья должна соответствовать научным требованиям и общему направлению серии журнала, быть интересной достаточно широкому кругу российской и зарубежной научной общественности.

Материал, предлагаемый для публикации, должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях, написан в контексте современной научной литературы, и содержать очевидный элемент создания нового знания. Представленные статьи проходят проверку в программе «Антиплагиат».

За точность воспроизведения дат, имен, цитат, формул, цифр несет ответственность автор.

Редакционная коллегия оставляет за собой право на редактирование статей без изменения научного содержания авторского варианта.

Научно-практический журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики» проводит независимое (внутреннее) рецензирование.

Правила оформления текста.

- ◆ Текст статьи набирается через 1,5 интервала в текстовом редакторе Word для Windows с расширением ".doc", или ".rtf", шрифт 14 Times New Roman.
- ◆ Перед заглавием статьи указывается шифр согласно универсальной десятичной классификации (УДК).
- ◆ Рисунки и таблицы в статью не вставляются, а даются отдельными файлами.
- ◆ Единицы измерения в статье следует выражать в Международной системе единиц (СИ).
- ◆ Все таблицы в тексте должны иметь названия и сквозную нумерацию. Сокращения слов в таблицах не допускаются.
- ◆ Литературные источники, использованные в статье, должны быть представлены общим списком в ее конце. Ссылки на упомянутую литературу в тексте обязательны и даются в квадратных скобках. Нумерация источников идет в последовательности упоминания в тексте.
- ◆ Литература составляется в соответствии с ГОСТ 7.1-2003.
- ◆ Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Правила написания математических формул.

- ◆ В статье следует приводить лишь самые главные, итоговые формулы.
- ◆ Математические формулы нужно набирать, точно размещая знаки, цифры, буквы.
- ◆ Все использованные в формуле символы следует расшифровывать.

Правила оформления графики.

- ◆ Растровые форматы: рисунки и фотографии, сканируемые или подготовленные в Photoshop, Paintbrush, Corel Photopaint, должны иметь разрешение не менее 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, CMYK.
- ◆ Векторные форматы: рисунки, выполненные в программе CorelDraw 5.0-11.0, должны иметь толщину линий не менее 0,2 мм, текст в них может быть набран шрифтом Times New Roman или Arial. Не рекомендуется конвертировать графику из CorelDraw в растровые форматы. Встроенные — 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, CMYK.

По вопросам публикации следует обращаться к шеф-редактору научно-практического журнала «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики» (e-mail: redaktor@nauteh.ru).