

ISSN 2223-2966



СОВРЕМЕННАЯ НАУКА:
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 6 2026 (ИЮНЬ)

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>

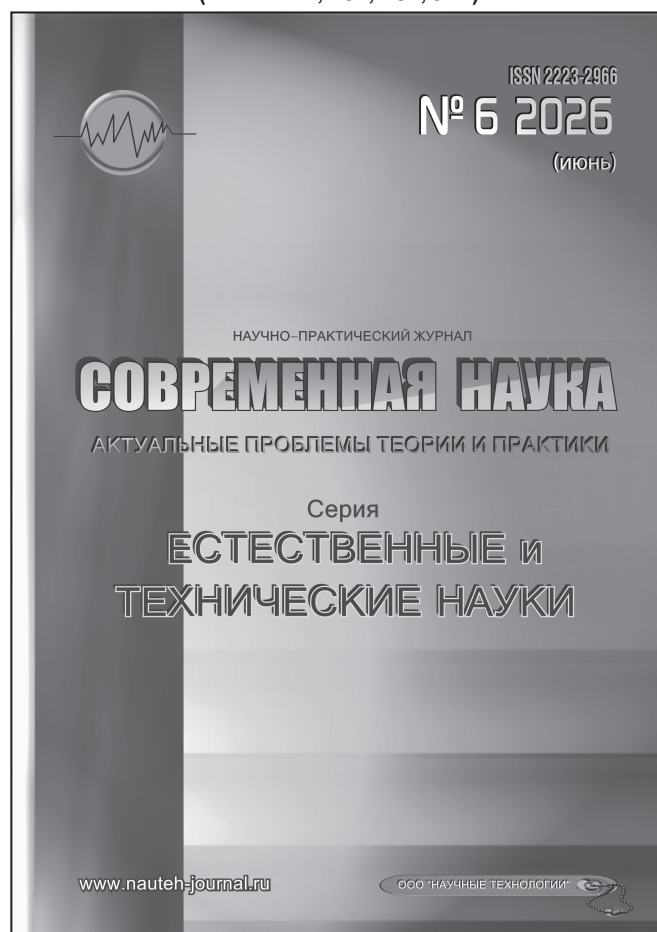
Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия.

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 29.06.2026 г. Формат 84x108 1/16
Печать цифровая Заказ № 0000 Тираж 2000 экз.

ISSN 2223-2966



Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Общая биология

Величенко В.В., Горохов А.Н. — Районирование территории Якутии для оптимизации охотничьего хозяйства

Velichenko V., Gorokhov A. — Zoning the territory of Yakutia to optimizing hunting management7

Информатика, вычислительная техника и управление

Антоновская О.Г., Бесклубная А.В. — О преобразовании спектра установившегося сигнала при изменении показателя счетчика в синтезаторе частоты с импульсным частотно-фазовым детектором и идеальным астатизмом фильтра

Antonovskaya O., Besklubnaya A. — On the transformation of the spectrum of a steady-state signal when the counter value is changed in a frequency synthesizer with a pulse frequency-phase detector and an ideal astatism filter14

Асманкин С.А. — Сравнительный анализ моделей согласованности данных в распределенных информационных системах

Asmankin S. — Comparative analysis of data consistency models in distributed information systems18

Белкин Е.Н., Кондрашев А.С. — Инструменты искусственного интеллекта для аудита информационной безопасности цифровой инфраструктуры

Belkin E., Kondrashev A. — Artificial intelligence tools for information security audit of digital infrastructure.22

Белоусов Е.П., Копылов В.Н. — Пространственно-временная динамика оледенения Северо-Чуйского хребта (Алтай) на основе геоинформационного анализа

Belousov E., Kopylov V. — Spatio-temporal dynamics of glaciation of the North-Chuya Ridge (Altai) based on geoinformation analysis27

Гресюк А.Н., Кунцев В.Е., Стрюков П.В., Герберт Д.В. — Гибридная архитектура нейроморфного трансформера: эмерджентная иерархия, пластичность и обучение с нуля

Gresyuk A., Kuntsev V., Stryukov P., Herbert D. — Hybrid architecture of a neuromorphic transformer: emergent hierarchy, plasticity, and training from scratch34

Грошев С.Г., Жихарев А.Б. — Сегментация ядра нейтрофила и выявление гиперсегментации с использованием методов машинного обучения

Groshev S., Zhikharev A. — Segmentation of the neutrophil nucleus and detection of hypersegmentation using machine learning methods39

Еськин Д.Л. — Численная модель оценки вероятности критического отказа на основе адаптивного выбора порога в POT-методе с гамма-аппроксимацией длительностей выбросов

Yeskin D. — A numerical model for estimating the probability of critical failure based on adaptive threshold selection in the POT method with gamma approximation of emission durations44

Злых Д.И. — Сравнительный анализ традиционных и нейросетевых методов генерации 3d-моделей архитектурных объектов

Zlykh D. — Comparative analysis of traditional and neural network methods for generating 3d models of architectural objects.....52

Камалов А.Б., Кондратов Д.В., Ушакова О.В. — Математические методы мониторинга

Kamalov A., Kondratov D., Ushakova O. — Mathematical methods of monitoring.....58

Комлев Д.А. — Разработка подхода к роутингу моделей детекции клонов кода и исследование методов повышения эффективности инференса при сохранении качества детекции

Komlev D. — Development of a model routing approach for code clone detection and investigation of methods for improving inference efficiency while maintaining detection quality62

Лобанов О.А., Петров В.Е. — Системное управление как инструмент решения задач с задвоенными данными

Lobanov O., Petrov V. — Systemic management as a tool for solving problems with data dualism68

Маслов А.К. — Автоматизация процесса управления информационным обеспечением посадки воздушных судов на основе использования интеллектуальных систем и цифровых двойников

Maslov A. — Automation of the process of managing information support for aircraft landings based on the use of intelligent systems and digital twins ..73

Носов К.А. — Интегральная метрика образовательного успеха в edtech

Nosov K. — Integral metric of educational success in edtech.....79

Павловский В.В., Трубачева-Гудович А.Е. — Построение дашборда визуализации состояния хоста в Zabbix на основе данных DDoS-атаки

Pavlovsky V., Trubacheva-Gudovich A. — Building a host state visualization dashboard in Zabbix based on DDoS attack data.....85

Плотников В.П., Федорова Н.В., Яковлев А.А. — Разработка программного приложения для автоматизации метода синтеза технических решений технологических CO₂-лазеров

Plotnikov V., Fedorova N., Yakovlev A. — Development of a software application for automation of the method for the synthesis of technical solutions of technological CO₂-lasers93

Пчелинцев И.В. — Обеспечение прозрачности решений систем защиты информации на основе модуля объяснимого искусственного интеллекта (XAI)

Pchelintsev I. — Ensuring the transparency of information security system decisions using an explainable artificial intelligence (XAI) module ... 101

Решетов В.О. — Решение задачи коммивояжёра с помощью Residual Gated Graph ConvNet

Reshetov V. — Solving the traveling salesman problem using Residual Gated Graph ConvNet 109

Салов М.П., Черкасов А.Н. — Обеспечение информационной безопасности при передаче данных в АСУТП нефтегазовых трубопроводов

Salov M., Cherkasov A. — Ensuring information security when transferring data to automated control systems of oil and gas pipelines 113

Суперекин И.Ю. — Ошибка как проектируемый элемент игрового обучения: проба, обратная связь и удовольствие исследования

Superekin I. — Player mistakes as a designed element of game-based learning: trial, feedback, and the pleasure of exploration 117

Уколов А.Н. — Системный анализ процессов управления обработкой пользовательских данных в системах электронной коммерции

Ukolov A. — System analysis of user data processing management processes in e-commerce systems . 121

Чернезов В.А. — Способы обеспечения защиты информации в инженерных и диспетчерских системах

Chernevov V. — Ways to ensure information security in engineering and dispatch systems..... 126

Шибиченко М.И., Павлов В.А. — Моделирование динамики потребительского спроса на основе интеграции эндогенных и экзогенных факторов с учетом их лагового воздействия

Shibichenko M., Pavlov V. — Modelling the dynamics of consumer demand based on the integration of endogenous and exogenous factors, taking into account their lag effects 133

Шифрин Б.М., Муравьев А.Г. — Нечётко-вероятностная модель оценки эффективности мануального извещателя

Shifrin B., Muraviev A. — Fuzzy probability model evaluation of the manual detector effectiveness.. 138

Шкитронов М.Е., Войтенко О.В. — Применение ИИ-технологий двойного назначения для проведения учений подразделений пожарной охраны

Shkitronov M., Voitenok O. — Application of dual-use ai technologies for conducting exercises of fire protection units 145

Клиническая медицина

Аксенов К.О., Лобанов Л.С., Аксенова Т.А., Лобанов С.Л., Лобанов Ю.С., Першин П.В. —

Острое повреждение почек при гнойно-септических осложнениях в неотложной абдоминальной хирургии

Aksenov K., Lobanov L., Aksenova T., Lobanov S., Lobanov Yu., Pershin P. — Acute kidney injury in purulent-septic complications in emergency abdominal surgery 150

Амарантов Д.Г., Оревков Е.Б., Афанасьева Н.В. — Оптимизация методики прогнозирования и профилактики рецидивов кровотечений при эрозивных поражениях желудка
Amarantov D., Orevkov E., Afanaseva N. — Optimization of methods for predicting and preventing bleeding recurrence in erosive gastric lesions 156

Воронова А.В., Воронцова О.Д., Шайхутдинов Н.Е. — Многопрофильный подход в лечении краниальных нейропатий
Voronova A., Vorontsova O., Shaykhutdinov N. — Multidisciplinary approach to the treatment of cranial neuropathies 163

Загорулько А.И. — Молекулярные механизмы действия цисплатина, сравнительная фармакокинетика регионарной и системной доставки препарата у пациентов с опухолями головы и шеи
Zagorulko A. — Molecular mechanisms of cisplatin action, comparative pharmacokinetics of regional and systemic drug delivery in patients with head and neck tumors 170

Ичмелян А.М., Богдасаров А.Ю., Давидян Л.Ю., Богдасарова Р.А., Олейникова Д.В. — Мелатонин и репродуктивный потенциал: персонализированный подход в программах ЭКО
Ichmelyan A., Bogdasarov A., Davidyan L., Bogdasarova R., Oleynikova D. — Melatonin and reproductive potential: a personalized approach in IVF programs 177

Кучеренко С.В., Корягина Н.А., Корягин В.С. — Эффективность катетерной абляции фибрилляции предсердий у пациентов, перенесших covid-19: почему успешная изоляция легочных вен не гарантирует удержания ритма
Kucherenko S., Koriagina N., Koriagin V. — Effectiveness of catheter ablation of atrial fibrillation in patients after covid-19: why successful pulmonary vein isolation does not guarantee rhythm maintenance 184

Матвеев Д.В., Кузнецов М.Р., Долидзе Д.Д., Лебедев С.С., Чебан С.В. — Оценка влияния онкоассоциированной венозной патологии на качество жизни и выраженность посттромботического синдрома у хронических онкологических пациентов: разработка и валидация опросника onco-vte-veinqol-28/villalta
Matveev D., Kuznetsov M., Dolidze D., Lebedev S., Cheban S. — Assessment of the impact of cancer-associated venous pathology on quality of life and severity of post-thrombotic syndrome in chronic oncological patients: development and validation of the onco-vte-veinqol-28/villalta questionnaire 189

Пиотрович А.В., Павлиенко Ю.В. — Опыт энуклеации при радикулярных кистах челюстных костей с максимальным сохранением объема костной ткани
Piotrovich A., Pavlyenko Yu. — Experience in enucleation of radicular cysts of the jaws with maximum preservation of bone volume 196

Пономарев Д.С. — Влияние сахарного диабета на течение и исходы хронической сердечной недостаточности: результаты одноцентрового наблюдения за 300 амбулаторными пациентами
Ponomarev D. — The influence of diabetes mellitus on the course and outcomes of chronic heart failure: results of a single-centre observational study of 300 outpatients 204

Сарычева Ю.А., Чернышева Т.В. — Провоспалительные цитокины и их влияние на изменение основных параметров гемостаза у больных ревматоидным артритом с антифосфолипидным синдромом и без него в сравнительном аспекте
Sarycheva Yu., Chernysheva T. — Pro-inflammatory cytokines and their effect on changes in the basic parameters of hemostasis in rheumatoid arthritis patients with antiphospholipid syndrome and without it in a comparative aspect 209

Сизов А.В. — Современные подходы к профилактике гестационного сахарного диабета у женщин с факторами риска
Sizov A. — Modern new approaches to the prevention of gestational diabetes in women with risk factors 214

Третьякова И.Е. — Влияние аутологических секреторных продуктов нейтрофилов (нейтрофилокинов) на скорость заживления раны у больных с раневой хирургической инфекцией и сроки их пребывания в стационаре
Tretyakova I. — Effect of autological secretion products of neutrophils (neutrophilokines) on the speed of wound healing in patients with wound surgical infection and their stationary stay. 219

Чавга А.И. — Взаимосвязь интоксикации и полиорганной недостаточности с течением тяжелых и осложненных форм острого панкреатита
Chavga A. — Relationship between intoxication and multiple organ failure with the course of severe and complicated forms of acute pancreatitis. 222

Юркин А.К., Щеголев А.В., Юркина Е.А., Топорков М.М. — Особенности цитокинового статуса у пациентов с гемобластомами

в зависимости от возраста и исхода заболевания до и после проведения полихимиотерапии, осложненной сепсисом

Yurkin A., Shchegolev A., Yurkina E., Toporkov M. — Features of the cytokine status in patients with hemoblastoses, depending on the age and outcome of the disease, before and after polychemotherapy complicated by sepsis 229

Юркин А.К., Щеголев А.В., Юркина Е.А. — Комплексная оценка состояния Т-клеточного звена иммунитета у больных гемобластомами в зависимости от исхода заболевания после проведения полихимиотерапии, осложненной сепсисом

Yurkin A., Shchegolev A., Yurkina E. — Comprehensive assessment of the T-cell immune system in patients with hemoblastoses, depending on the outcome of the disease after polychemotherapy complicated by sepsis 237

Наши авторы 245

РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ ЯКУТИИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ОХОТНИЧЬЕГО ХОЗЯЙСТВА

ZONING THE TERRITORY OF YAKUTIA TO OPTIMIZING HUNTING MANAGEMENT

V. Velichenko
A. Gorokhov

Summary. This article examines the issue of zoning the republic's hunting industry, a pressing issue for Yakutia. Hunting zoning is necessary to optimize the activities of game users.

Several zoning schemes for Yakutia have been proposed over the years, based on indicators of commercial production output and rural population size.

In recent years, the structure of game species has changed significantly, making it impossible to apply previous zoning criteria. For most game species, the decline in purchases is explained by low purchase prices for their pelts, which is a result of a lack of consumer demand. Conversely, the increase in sable numbers has led to this species' dominance in the procurement structure.

A new hunting zoning scheme is proposed, based on an analysis of hunting ground structure and hunting ground productivity indicators.

Keywords: Criteria, natural conditions, game animals, zoning, ground productivity, hunting management areas.

Величенко Валерий Владимирович

Доктор биологических наук, ФГБОУ ВО Арктический
государственный агротехнологический университет
valervel2010@mail.ru

Горохов Алексей Николаевич

Кандидат биологических наук, Федеральный
исследовательский центр Якутский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук
algor64@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается актуальный для охотничьего хозяйства Якутии вопрос районирования территории республики. Охотхозяйственное районирование необходимо для оптимизации деятельности охотпользователей в сфере охотничьего хозяйства.

В разные периоды было предложено несколько схем районирования территории Якутии, которые строились на показателях выхода промысловой продукции и численности сельского населения.

В последние годы структура добычи охотничьих видов серьезно изменилась, что не позволяет применять прежние критерии районирования. По большинству видов охотничьих зверей снижение закупок объясняется низкими закупочными ценами на их шкурки, что является следствием отсутствия спроса со стороны потребителей. Увеличение численности соболя, напротив, привело к доминированию данного вида в структуре закупок промысловой пушнины.

Предлагается новая схема охотхозяйственного районирования, разработана на анализе структуры охотничьих угодий и показателе производительности охотничьих угодий.

Ключевые слова: критерии, природные условия, охотничьи животные, районирование, производительность угодий, охотхозяйственные области.

Введение

Якутия занимает значительную долю северо-восточной части азиатского материка, выходя на побережье двух морей Северного Ледовитого океана (море Лаптевых и Восточно-Сибирское море). Её территория простирается с севера на юг на 2000 км, а с запада на восток на 2500 км при общей площади в 3,1 млн км². Свыше 40 % территории Якутии находится за Полярным кругом, свыше 80 % — севернее 60°с.ш. Почти вся континентальная Якутия лежит в зоне вечной мерзлоты, которая только на крайнем юго-западе переходит в зону её прерывистого распространения [1].

Территория Республики находится в пределах трёх географических зон: арктических пустынь; тундровой зоны с подзонами арктических и субарктических тундр лесотундры и таежной зоны, представленной подзонами северной и средней тайги (рис. 1).

Условия обитания охотничьих животных также неодинаковы, что определяет разный видовой состав и плотность населения охотничьих зверей и птиц. Кроме этого, природные условия влияют и на специфику системы ведения охотничьего хозяйства, которая разнится в зависимости от принадлежности к той или иной природной зоне. Все это вызывает необходимость дифференцированного подхода к вопросам планирования и ведения охотничьего хозяйства.

В настоящее время в границах Якутии ведут деятельность в сфере охотничьего хозяйства 337 охотпользователей, значительная часть которых представлена общинами коренных малочисленных народов Севера России.

Определение конкретной системы использования запасов отдельных видов охотничьих животных в охотничьих хозяйствах и районах должно считаться важнейшей

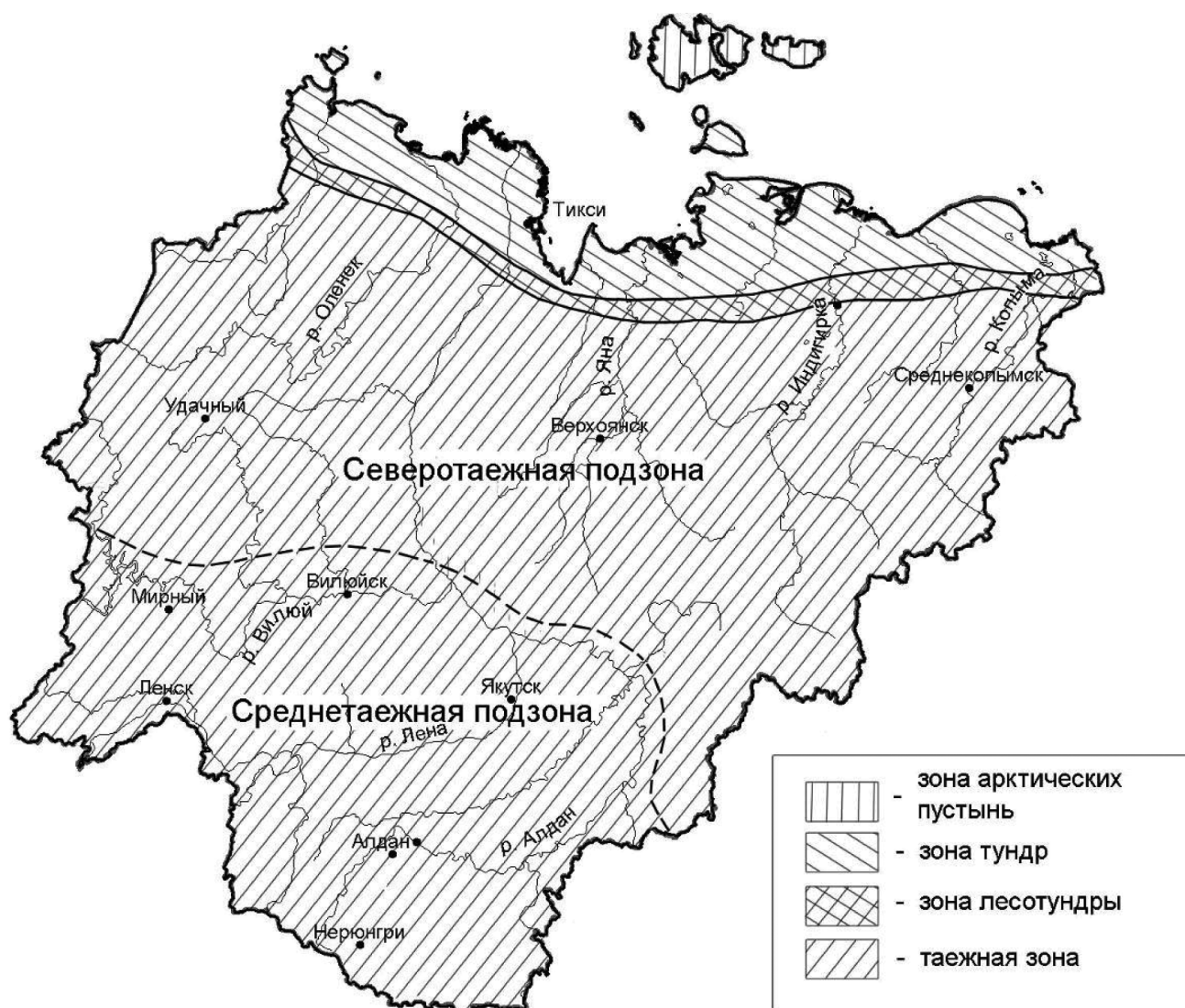


Рис. 1. Природные зоны Якутии

инженерной работой биологов-охотоведов. Это возможно лишь при условии учета природных и экономических особенностей территорий разных природных зон. Данное выражение, озвученное академиком С.С. Шварцем [2], остается актуальным и по сей день. Одним из способов выстраивания научно-обоснованной системы ведения охотничьего хозяйства является районирование территорий, тем более таких крупных по площади субъектов, каким является Республика Саха (Якутия).

Материал

Первые попытки охотхозяйственного районирования были предприняты Н.М. Михелем, работавшем в составе Индигирского отряда экспедиции АН СССР 1925–1930 гг. и занимавшегося изучением промысловых млекопитающих в бассейне Индигирки [3].

Позднее учеными Якутии была предложена схема пушно-промыслового районирования территории ре-

спублики, построенная на анализе закупок промышленной продукции, которая позволила определить охотничью специализацию различных регионов Якутии [4]. Данная схема районирования соответствовала запросам того времени, когда вопросы размещения и специализации охотничьего промысла тесно увязывались с планированием и размещением отраслей сельского хозяйства, учитывающих интересы государственной экономики и степень благоприятствования природных условий развитию той или иной отрасли.

Кроме этого, в настоящей статье рассматривается схема охотхозяйственного районирования Якутии, предложенная И.И. Мордосовым [5].

Содержание

В схеме пушно-промыслового районирования территории республики [4] отмечалось, что в масштабах государственного планирования размещения отрас-

лей сельского хозяйства Якутская республика в первую очередь представляла интерес как регион, производящий пушнину. В пределах Якутии во всех случаях, когда из равных возможностей приходилось выбирать основное направление развития сельского хозяйства, предпочтение должно было отдаваться охотничьему промыслу. При этом решение базировалось не только на оценке природных ресурсов, но также на учете профессиональной специализации сельского населения.

В таблице 1 представлена схема пушно-промыслового районирования Якутии, построенная на анализе данных статистики о закупках промысловой пушнины [4].

Как видно, из естественно-географических районов только тундровая зона характеризовалась узкоспециализированным промыслом песца, тогда как в других районах промысел базировался на большом числе пушных видов зверей.

Картина размещения промысла диких копытных вырисовывалась авторам менее четко. По мнению специалистов, до 50 % планируемого объема добычи лося должно быть сосредоточено в Центральной Якутии и в бассейне Вилюя. Основными районами промысла дикого северного оленя должны быть низовья Лены и яно-индигирская тундра. Промысел снежного барана в основном планировалось сосредоточить в горных си-

стемах Верхоянского хребта, а изюбря — в нижней части бассейна Олёкмы.

Понимая, что удельное значение отдельных естественно-географических районов в пушном промысле недостаточно точно отражает фактическую роль промысла в экономике сельского хозяйства районов, авторы пытались найти дополнительные критерии, по которым можно было бы оценить роль пушного промысла в отдельных естественно-географических районах. Для этого использовались показатели стоимости пушнины в сопоставлении ее с количеством сельского населения, которые, по мнению авторов, являлись наиболее сопоставимыми. Рассматривался показатель удельного веса промысла в доходах хозяйств, признанный в дальнейшем менее пригодным, так как между районами имелись различия в количестве охотников-любителей, продукция которых не находила отражения в балансе хозяйств.

Комментируя приведенные в таблице 1 данные, авторы констатировали, что они в целом довольно объективно отражали экономическое значение промысла пушнины в различных естественно-географических районах Якутии. Более того, подобная схема давала возможность выделения районов, в которых охотничий промысел мог рассматриваться как ведущая отрасль сельского хозяйства.

Таблица 1.

Удельное значение естественно-географических районов Якутии в пушном промысле (Млекопитающие Якутии, 1971)

Доля промысловой пушнины, %								
Белка	Песец	Заяц-беляк	Соболь	Ондатра	Горностай	Колонок	Лисица	% к валовой стоимости по Якутии
Тундровая зона (Анабарский, Булунский, Усть-Янский, Аллаиховский, Нижнеколымский)								
0,1	84,5	0,2	—	0,7	4,5	—	6,3	13,9
Северо-Западная Якутия (Жиганский, Оленёкский)								
4,0	6,3	0,1	33,8	43,3	7,2	—	5,3	7,6
Бассейн Вилюя								
26,3	0,5	22,3	14,3	27,1	15,2	23,0	23,3	19,3
Центральная Якутия (Кобяйский, Намский, Горный, Орджоникидзеvский, Мегино-Кангаласский, Чурапчинский, Таттинский, Усть-Алданский, Амгинский)								
9,7	—	57,7	1,1	22,9	18,8	45,0	16,9	15,5
Юго-Западная Якутия (Ленский, Олекминский)								
26,5	—	0,0	29,1	2,0	2,0	23,2	8,4	13,3
Бассейн Алдана, горная часть (Алданский, Учурский, Тимптонский, Усть-Майский)								
13,5	—	1,7	14,0	5,5	2,7	8,4	6,1	7,7
Северо-Восточная Якутия, горнотаёжные районы (Верхоянский, Саккырырский, Томпонский, Момский, Оймяконский)								
14,5	2,7	16,7	5,0	2,9	20,2	—	10,9	10,0
Среднеиндигирская и Колымская низменности (Среднеколымский, Верхнеколымский, Абыйский)								
5,4	6,0	0,4	2,1	37,2	29,4	—	22,8	12,7

Значительным преимуществом данной схемы районирования являлось то, что границы выделенных зон совпадали с административными границами районов, что давало возможность планировать и анализировать результаты промысла в их административных границах, что и отвечает основным задачам планирования.

Справедливости ради необходимо отметить, что перспективы, обозначенные в рассмотренной схеме районирования, в значительной степени оправдались на довольно продолжительный период. Это подтверждается таблицей 2 в которой приведены сравнительные данные о стоимости закупленной промысловой пушнины в Республике Саха (Якутия) в начале 70-х гг. XX столетия и за 2004–2008 гг. Данные за 70-е гг. приведены по материалам монографии «Млекопитающие Якутии» (1971) в ценах того периода, а стоимость пушнины, закупленной в 2004–2008 гг., рассчитана в закупочных ценах 2008 г. Сопоставление сведений за эти периоды в процентном выражении позволяет проследить изменения, которые произошли в структуре закупок, которые предвидели авторы рассмотренной схемы районирования [6].

Таблица 2.

Удельное значение шкурок промысловых зверей в пушном промысле Республики Саха (Якутия)*

Вид	Удельное значение в общем объеме закупок			
	Начало 70-х гг. XX в.		В среднем за 2004–2008 гг.	
	тыс. руб.	%	тыс. руб.	%
Белка	1358,4	29,37	3506,4	4,35
Волк	8,1	0,18	70,3	0,09
Горностай	391,4	8,46	526,4	0,65
Зяец-беляк	451,0	9,75	784,4	0,93
Колонок	73,4	1,59	128,3	0,16
Лисица	112,2	2,43	348,0	0,43
Ондатра	804,0	17,38	11079,4	13,74
Песец	739,6	15,99	447,4	0,55
Росомаха	1,17	0,03	—	—
Рысь	1,48	0,03	—	—
Соболь	684,0	14,79	63740,3	79,1
ИТОГО	4624,75	100,0	80630,2	100,0

* В таблице не учтены второстепенные виды

В таблице не случайно приведены сравнительные данные за два периода, второй из которых заканчивается 2008 г. Этот год является рубежным, поскольку уже в 2009 году был опубликован ФЗ №209 «Об охоте и о сохранении охотничьих ресурсов», принятие которого оз-

наменовало собой новый этап в развитии охотничьего хозяйства не только Якутии, но и России в целом.

Анализ причин произошедших изменений позволяет говорить, что именно рост численности соболя повлек за собой дальнейшие изменения в структуре закупок промысловой пушнины. Снижение объемов закупок шкурок некоторых видов пушных зверей происходило на фоне значительного роста добычи шкурок соболя. В 70-х гг. на территории Якутии численность вида еще не стабилизировалась и шкурки соболя по стоимости занимали третье место в общем объеме закупок промысловой пушнины (14,79 %). Доля же шкурок соболя в стоимостном выражении в период 2004–2008 гг. составлял уже 79,1 % от общего объема (табл. 3).

Таблица 3.

Сравнительные данные по закупкам шкурок соболя в некоторых северных районах Республики Саха (Якутия)

Район	Закуплено в среднем, шкурок		Рост (раз)
	1971–1975 гг.	2004–2008 гг.	
Абыйский	292,6	2433	8,3
В-Колымский	1024,6	1817,8	1,8
Жиганский	1683,8	1885,4	1,1
Кобяйский	425,4	1295	3,0
Оленёкский	3055	1023	Снижение
Среднеколымский	976,4	2223,6	2,3
Томпонский	482,4	1849,6	3,8

Закупки пушнины в последние годы еще более изменились в сторону преобладания шкурок соболя и отражены в государственном докладе Минэкологии РС (Я) «О состоянии окружающей среды в Республике Саха (Якутия) в 2024 году» [7].

Еще одной попыткой составления промыслово-биологического районирования явилось издание «Атласа сельского хозяйства Якутской АССР», в подготовке которого участвовал творческий коллектив во главе с И.И. Мордосовым [5]. Для своего периода данная схема районирования являлась серьезным методическим материалом для проведения анализа и планирования охотхозяйственной деятельности.

Департаментом охоты при Правительстве Республики Саха (Якутия) также была предложена система охотхозяйственного районирования республики, которая наряду с природными особенностями групп районов учитывала выход промысловой продукции. Был период, когда на основе принятого районирования административным районам по линии Минсельхоза Республики

Саха (Якутия) доводились дифференцированные субсидии для поддержки охотничьего хозяйства, которые позволяли осуществлять доплаты охотникам к закупочным ценам на шкурки пушных зверей.

К сожалению, в настоящее время рассмотренные выше схемы охотхозяйственного районирования утратили свою актуальность. В процессе определения критериев охотхозяйственного районирования в прежних условиях не последнюю роль в оценке той или иной территории занимала экономическая составляющая, поэтому обязательными характеристиками при выделении однородных зон кроме природных особенностей были: состав и занятость трудоспособного населения, а также результаты освоения запасов охотничьих животных. Поскольку в настоящее время запасы некоторых видов пушных зверей практически не используются, к данному критерию нужно относиться осторожно, предполагая дальнейшее снижение закупок шкурок второстепенных видов пушных в будущем. Кроме этого, с распадом промысловых хозяйств (совхозы Севера, промхозы) утрачена возможность анализа экономической составляющей промыслов, поскольку все затраты по ведению промысловой охоты легли на плечи охотпользователей и охотников.

Изменения, произошедшие в административном устройстве Якутии, а также изменения в структуре закупок промысловой продукции настоятельно требуют обновления схемы районирования территории республики для оптимизации охотничьего хозяйства. Это позволит объективно оценить различия в современном состоянии популяций охотничье-промысловых животных с учетом природных условий, а также детализировать рекомендации для повышения эффективности охотничьего хозяйства с учетом их особенностей. На это в свое время указывал академик С.С. Шварц [2]. По его мнению, полноценное (читай — рациональное, В.В.) использование запасов любого вида промысловых животных возможно лишь на основе точных знаний его биологических особенностей в конкретной среде обитания.

На этом основании для районирования нами предлагается использовать природные условия отдельных регионов Якутии и запасы охотничьих животных на единицу площади, то есть производительность угодий. Последний показатель рассчитывается на основе данных мониторинга, осуществляемого уполномоченным органом республики в сфере охотничьего хозяйства — Департаментом охоты и сохранения охотничьих ресурсов Минэкологии Республики Саха (Якутия).

При обсуждении таксономических единиц районирования специалистами лесного хозяйства было предложено деление Якутской АССР на лесорастительные округа [8]. На наш взгляд, для охотничьего хозяйства

основная задача заключается в том, чтобы выделить охотхозяйственные различия, в границах которых будут предложены целесообразные, специфические для данной разности системы ведения охотничьего хозяйства, позволяющие с наибольшей эффективностью использовать имеющиеся запасы охотничьих животных. Нами предлагается объединять административные районы в охотхозяйственные области. При этом в одну охотхозяйственную область входит несколько административных районов. Это связано с тем, что в отличие от лесного хозяйства, территории закрепленных охотничьих угодий строго соответствуют административным границам районов. Охотхозяйственные области как нельзя лучше подходят по площадным критериям, принятым в России для большинства субъектов. С учетом вышесказанного в таблице 4 объединены предлагаемый нами вариант и ранее используемые варианты охотхозяйственного деления республики.

Таблица 4.
Варианты охотхозяйственного районирования
Республики Саха (Якутия)

Предлагаемый нами вариант	В.А. Тавровский (1971)	Депохота РС (Я) (из отчетов ЗМУ)
Тундровая	Тундровая	Тундровая зона
Аллаиховский	Аллаиховский	Аллаиховский
Анабарский	Анабарский	Анабарский
Булунский	Булунский	Булунский
Нижнеколымский	Нижнеколымский	Нижнеколымский
Усть-Янский	Усть-Янский	Усть-Янский
Северо-западная	Северо-западная	Северо-Западная зона
Жиганский	Жиганский	Жиганский
Оленекский	Оленекский	Оленекский
	Районы бассейна р. Вилуй	
Северо-восточная	Северо-Восточная Якутия	Северо-Восточная зона
Верхоянский	Верхоянский	Верхоянский
Кобяйский*		Кобяйский (правобережье)
Момский	Момский	Момский
Оймяконский	Оймяконский	Оймяконский
Томпонский	Томпонский	Томпонский
Эвено-Бытантайский	Саккырырский**	Эвено-Бытантайский

Предлагаемый нами вариант	В.А. Тавровский (1971)	Депохота РС (Я) (из отчетов ЗМУ)
Колымо-индигирская	Среднеиндигирская и Колымская низменности	Колымо-Индигирская зона
Абыйский	Абыйский	Абыйский
Верхнеколымский	Верхнеколымский	Верхнеколымский
Среднеколымский	Среднеколымский	Среднеколымский
Вилуйская	<i>Районы Вилуйской группы были включены в Северо-западную группу</i>	Вилуйская зона
Верхневилуйский		Верхневилуйский
Вилуйский		Вилуйский
Мирнинский		Мирнинский
Нюрбинский		Нюрбинский
Сунтарский		Сунтарский
		Кобяйский (левобережье)
Центральная	Центральная Якутия	Центральная зона
Амгинский	Амгинский	Амгинский
Горный	Горный	Горный
Мегино-Кангаласский	Мегино-Кангаласский	Мегино-Кангаласский
Намский	Намский	Намский
Таттинский	Таттинский	Таттинский
Усть-Алданский	Усть-Алданский	Усть-Алданский
Хангаласский	Орджоникидзевский	Хангаласский
Чурапчинский	Чурапчинский	Чурапчинский
ГО «Город Якутск»	<i>Кобяйский**</i>	<i>Якутский**</i>
Юго-западная	Юго-западная	Юго-Западная зона
Ленский	Ленский	Ленский
Олекминский	Олекминский	Олекминский
Алданская	Бассейн Алдана	Алданская зона
Алданский	Алданский	Алданский,
Нерюнгринский	<i>Учурский, Тимптонский**</i>	Нерюнгринский
Усть-Майский	Усть-Майский	Усть-Майский

*Кобяйский — основная доля промысловой продукции поступает с правобережья р. Лена.

**старые названия административных районов

Как видно из данных, приведенных в таблице 4, значительные отличия предлагаемой нами схемы относятся в Северо-западной и Вилуйской областях, поскольку В.А. Тавровский [4] относил вилуйские районы к Северо-западной зоне. По нашему мнению, учитывая значительные отличия растительного покрова бассейна р. Вилуй от лесотундры и северных разреженных лиственничников, логично будет выделять эти районы в отдельную охотхозяйственную область.

Приняв за основу предлагаемый нами вариант, в таблице 5 представлены данные по составу охотничьих угодий в разрезе охотхозяйственных областей.

Таблица 5.

Состав угодий охотхозяйственных областей

Охотхозяйственные области	Общая	Лесные	Открытые	% лесных
Тундровая	48139,5	22640,0	25499,5	47,03
Северо-Западная	42720,8	23657,2	19063,6	55,38
Северо-Восточная	44080,2	32720,1	11360,1	74,23
Колымо-Индигирская	18739,94	13612,24	5127,7	72,64
Вилуйская	35246,6	30812,7	4433,9	87,42
Центральная	16953,7	15405,9	1547,8	90,87
Юго-Западная	23019,4	21461,7	1557,7	93,23
Алданская	30532,8	29320,7	1212,1	96,03

При этом деление на лесные и открытые площади заимствовано нами из материалов мониторинга состояния охотничьих ресурсов, то есть материалов обработки зимних маршрутных учетов.

Анализ группировки позволяет говорить о наличии даже видимых отличий в составе охотничьих угодий в различных областях. В то же время, если в тундровой области открытые угодья представлены тундрами и болотами, в центральной области в основном аласами, то в Северо-восточной и Алданской — это преимущественно необлесенные участки гор.

Кроме этого, выделяемые охотхозяйственные области должны отличаться и по другим критериям, один из которых плотность населения охотничьих животных. В связи с этим, нами рассмотрены показатели плотности населения копытных и пушных зверей (табл. 6, 7).

Данные в приведенных таблицах наглядно отражают отличия охотхозяйственных областей в отношении плотности населения диких копытных и пушных зверей. Из этого следует, что принятые нами для районирования территорий субъектов критерии охотхозяйственного районирования выбраны правильно и могут быть рекомендованы к использованию.

Таблица 6.

Плотность населения копытных по охотхозяйственным областям (в среднем за 2008–2017 гг.)

Области (зоны)	Плотность населения, особей/1000 га	
	Лось	Косуля
Тундровая	0,05	0
Северо-Западная	0,34	0
Северо-Восточная	0,49	0
Колымо-Инди́гирская	0,45	0
Вилуйская	0,46	0,04
Центральная	0,66	0,91
Юго-Западная	0,48	0,13
Алданская	0,28	0,02

Заключение

В разные годы охотоведами были предложены схемы охотхозяйственного районирования, которые учитывали структуру закупок промысловой продукции и численность сельского населения. В настоящее время запасы части видов охотничьих животных хронически недоиспользуются, что серьезно изменило структуру закупок промысловой продукции. Изменились и экономические основы промысловой охоты. Все это требует применения новых критериев для охотхозяйственного районирования территорий субъектов.

Таблица 7.

Плотность населения пушных зверей по охотхозяйственным областям (в среднем за 2008–2017 гг.)

Области (зоны)	Плотность населения, особей/1000 га					
	Белка	Волк	Горно-стай	Заяц-беляк	Лисица	Соболь
Тундровая	0,01	0,01	0,14	0,52	0,01	0,14
Северо-Западная	1,98	0,04	0,32	1,16	0,05	0,97
Северо-Восточная	4,71	0,04	1,11	2,16	0,09	1,03
Колымо-Инди́гирская	2,08	0,02	0,81	1,38	0,16	1,82
Вилуйская	3,63	0,04	0,48	0,93	0,11	1,07
Центральная	3,21	0,03	0,41	1,17	0,13	0,82
Юго-Западная	8,41	0,05	0,87	2,03	0,14	1,49
Алданская	4,62	0,05	0,48	0,97	0,06	1,46

Предлагаемая нами схема охотхозяйственного районирования территории Республики Саха (Якутия) построена на анализе состава охотничьих угодий и показателе их производительности. Данные критерии значительно отличаются по предлагаемым охотхозяйственным областям и могут быть рекомендованы для практического использования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В.Н., Галактионова Т.Ф., Перфильева В.И. и др. Основные особенности растительного покрова Якутской АССР. — Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. — 156 с.
2. Шварц С.С. Биологические основы охотничьего хозяйства // Современное состояние и пути развития охотоведческой науки в СССР. 1-я Всесоюзная конференция. — Киров, 1974. — С. 9–11.
3. Мордосов И.И. Состояние и перспективы развития охотничье-промыслового хозяйства Якутской АССР в работах якутской экспедиции АН СССР (1925–1930 гг.) // Вестник ЯГУ, № 30, 2005. — С. 89–96.
4. Млекопитающие Якутии. — М.: «Наука», 1971. — 660 с.
5. Мордосов И.И., Захарова Г.А. Охотничье-промысловое хозяйство // Атлас сельского хозяйства Якутской АССР. М.: Главное управл. геодезии и картографии при СМ СССР. 1989. — С. 79–81.
6. Величенко В.В., Чепрасов М.Ю. Особенности формирования показателя хозяйственной продуктивности охотничьих угодий северных территорий (на примере Якутии) // Вестник охотоведения, том 9, №1, 2012. — С. 104–111.
7. Государственный доклад «О состоянии окружающей среды в Республике Саха (Якутия) в 2024 году». — Якутск, 2025. — 1275 с.
8. Щербаков И.П. Лесной покров Северо-Востока СССР. — Новосибирск: Наука, 1975. — 344 с.

© Величенко Валерий Владимирович (valeriel2010@mail.ru); Горохов Алексей Николаевич (algor64@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

О ПРЕОБРАЗОВАНИИ СПЕКТРА УСТАНОВИВШЕГОСЯ СИГНАЛА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПОКАЗАТЕЛЯ СЧЕТЧИКА В СИНТЕЗАТОРЕ ЧАСТОТЫ С ИМПУЛЬСНЫМ ЧАСТОТНО-ФАЗОВЫМ ДЕТЕКТОРОМ И ИДЕАЛЬНЫМ АСТАТИЗМОМ ФИЛЬТРА

ON THE TRANSFORMATION OF THE SPECTRUM OF A STEADY-STATE SIGNAL WHEN THE COUNTER VALUE IS CHANGED IN A FREQUENCY SYNTHESIZER WITH A PULSE FREQUENCY-PHASE DETECTOR AND AN IDEAL ASTATISM FILTER

**O. Antonovskaya
A. Besklubnaya**

Summary. The paper presents the results of a qualitative analysis of steady-state processes in a frequency synthesizer with a pulse frequency-phase detector and a low-pass filter with perfect astatism. The study uses a mathematical model based on the point mapping method, which allows for the uniform analysis of both local and global properties of phase trajectories, considering the significant nonlinearity of the system. The paper also presents the boundaries of the existence of modes of varying complexity in the parameter space.

Keywords: frequency synthesizer, pulse frequency-phase detector, mathematical modeling, point mapping method.

Антоновская Ольга Георгиевна

кандидат физико-математических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет
olga.antonovskaja@yandex.ru

Бесklubная Антонина Вячеславовна

кандидат педагогических наук,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет
antbesk@gmail.com

Аннотация. В работе приводятся результаты качественного анализа установившихся процессов в синтезаторе частот с импульсным частотно-фазовым детектором и фильтром нижних частот с идеальным астатизмом. Для исследования используется математическая модель, при построении которой применялся основанный на методе точечных отображений способ моделирования динамики цифровых синтезаторов частот, использующий кусочно-постоянную форму сигнала управления и позволяющий единообразно исследовать как локальные, так и глобальные свойства фазовых траекторий, и учитывающий существенную нелинейность системы. В пространстве параметров получены границы существования в системе режимов различной степени сложности.

Ключевые слова: синтезатор частоты, импульсный частотно-фазовый детектор, математическое моделирование, метод точечных отображений.

Известно, что в использовании управляемых синтезаторов частот (СЧ), построенных на базе импульсных систем фазовой синхронизации немалую роль играет и простота их технической реализации, и близость их к системам со стратегией оптимального управления, позволяющим иметь разрывный характер управляющих воздействий при переходе от одних крайних значений к другим [1]. Однако такие системы принципиально нелинейны и поэтому допускают появление в них сложных движений. Поэтому для анализа динамики систем фазовой синхронизации с элементами дискретизации и нелинейностями фазового детектора кусочно-постоянного типа особый интерес представляет использование метода точечных отображений (МТО) [2], поскольку он объединяет в единое целое как специфику

математических моделей (ММ) таких систем, так и различные технологические приемы использования точных и приближенных способов описания основных свойств фазовых траекторий.

В настоящей работе на примере рассмотрения динамики СЧ с импульсным частотно-фазовым детектором типа ИЧФДЗН [1] и фильтром нижних частот (ФНЧ) с идеальным астатизмом показывается, что изучение динамики СЧ по МТО допускает также качественное рассмотрение механизма преобразования детерминированных помех при изменении показателя счетчика (С) числа колебаний управляемого генератора (УГ).

Рассмотрим с этой целью ММ СЧ с уравнениями [3,4]:

при подключенном выходе детектора

$$\begin{aligned}\alpha\dot{\theta} &= g(x(\tau)), \\ \mu\dot{x} &= u - x, \\ (0 \leq \theta \leq 1, 0 \leq \tau \leq 1, u = \pm 1),\end{aligned}\quad (1)$$

и при отключенном выходе детектора на этапе хранения информации

$$\begin{aligned}\alpha\dot{\theta} &= g(x(\tau)), \\ \mu\dot{x} &= x_0, \\ (0 \leq \theta \leq 1, 0 \leq \tau \leq 1).\end{aligned}\quad (2)$$

Здесь точкой обозначено дифференцирование по времени τ , изменяющемуся в пределах периода сигнала опорного генератора (ОГ); $0 < \mu \ll 1$ — астатизирующий параметр; α — безразмерный показатель C ; u — выходной сигнал детектора, соответствующий подключению генераторов напряжений ([1], С. 34); x — выходная координата фильтра; θ — координата C , пусто при $\theta = 0$ и заполненной при $\theta = 1$; x_0 — начальное условие; $g(x) > 0$ — нормированная на единицу ($g(0) = 1$) характеристика УГ, — целесообразно использование методики изучения свойств фазовых траекторий СЧ, предложенной в [3,4]. Согласно этой методике, для изучения поведения фазовых траекторий $\theta(\tau), x(\tau)$ следует использовать три подпространства: Π_1 , в котором определена система (1) при $u = +1$, Π_3 , в котором определена система (1) при $u = -1$ и Π_2 , в котором определена система (2). Таким образом оказывается возможным сведение изучения перемещений изображающих точек движения (ИТД) к рассмотрению свойств одномерного точечного отображения T [3,4].

При $\alpha \geq 1$, соответствующем значениям настройки СЧ на частоты выше собственной частоты УГ, функция последования (ФП) отображения T задается соотношением

$$\begin{aligned}\bar{\theta} &= \frac{g(-1)}{g(+1)}\theta_0 + g(-1)\left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{g(+1)}\right)(2 + m_1), \\ (0 \leq \bar{\theta}, \theta_0 \leq 1, \alpha \geq 1),\end{aligned}\quad (3)$$

где $\bar{\theta}, \theta_0$ — суть последующее и предыдущее за ней значения координаты. С при попадании ИТД в Π_1 ,

$$m_1 = \text{ceil}\left[\left(\frac{\alpha}{g(+1)}((2 - \theta_0) - 1)\right) / \left(1 - \frac{\alpha}{g(+1)}\right)\right],$$

а операция ceil округления до целого в сторону большего числа определяет количество m_1 возвратно-петлеобразных движений между подпространствами Π_1 и Π_2 .

При $\alpha \leq 1$ ФП отображения T задается соотношением

$$\begin{aligned}\bar{\tau} &= \frac{g(-1)}{g(+1)}\tau_0 + \frac{1}{g(+1)}(\alpha - g(-1))(2 + m_2) \\ (0 \leq \bar{\tau}, \tau_0 \leq 1, \alpha \leq 1),\end{aligned}\quad (4)$$

где $\bar{\tau}, \tau_0$ — суть последующее и предыдущее значения фазы появления ИТД в Π_3 , а

$$m_2 = \text{ceil}\left[\left(\frac{g(-1)}{\alpha}((2 - \tau_0) - 1)\right) / \left(1 - \frac{g(-1)}{\alpha}\right)\right],$$

соответствует количеству возвратно-петлеобразных движений между подпространствами Π_3 и Π_2 .

Непосредственно из формул (3), (4) следует, что графики этих ФП имеют пилообразный вид с вертикальными участками разрывов между участками непрерывности. Последние соответствуют постоянным значениям m_1 и m_2 и имеют положительный линейный подъем с крутизной меньшей единицы, что, в свою очередь, означает, что отображение является глобально сжимающим, т.е. в СЧ при любых значениях параметров существует единственный и устойчивый в целом установившийся режим.

Для определения спектра установившегося движения необходимо установить, с каким участком графика ФП пересекается соответствующая биссектриса: при $\alpha \geq 1$ для ФП (3) биссектриса $\bar{\theta} = \theta_0$ и при $\alpha \leq 1$ для ФП (4) биссектриса $\bar{\tau} = \tau_0$.

При $\alpha \geq 1$ непрерывный участок ФП (3) с номером m_1 пересекается с биссектрисой $\bar{\theta} = \theta_0$ и соответственно существует простая неподвижная точка отображения T , если $\underline{\alpha}_n(m_1) \leq \alpha \leq \bar{\alpha}_n(m_1)$ (n — непрерывный), где

$$\begin{aligned}\bar{\alpha}_n(m_1) &= \\ &= ((m_1 + 1)g(+1) + g(-1)) / ((m_1 + 2)(m_1 = 1, 2, \dots)) \\ \underline{\alpha}_n(m_1) &= \\ &= (m_1 g(+1) + 2g(-1))g(-1) / ((m_1 + 1)g(+1) + g(-1)).\end{aligned}\quad (5)$$

При $\alpha \leq 1$ непрерывный участок ФП (4) с номером m_2 пересекается с биссектрисой $\bar{\tau} = \tau_0$, если $\underline{\alpha}_n(m_2) \leq \alpha \leq \bar{\alpha}_n(m_2)$,

где,

$$\begin{aligned}\bar{\alpha}_n(m_2) &= ((m_2 + 2)g(+1) + g(-1)) \times \\ &\times g(+1)g(-1) / (m_2 g(+1) + 2g(-1)) \\ \underline{\alpha}_n(m_2) &= \\ &= g(+1)g(-1)(m_2 + 2) / ((m_2 + 2)g(+1) + g(-1)), \\ (m_2 = 1, 2, \dots)\end{aligned}\quad (6)$$

За счет идеальности астатизма (в (1) $\mu = +0$) осциллограмма $x(\tau)^*$ установившегося процесса, соответствующего существованию простой неподвижной точки отображения T , имеет кусочно-постоянный вид: при движении ИТД между Π_1 и Π_3 $x(\tau) = +1$ и при движении между Π_3 и Π_1 $x(\tau) = -1$. После определения с помощью ФП (3) при $\alpha > 1$ координаты неподвижной точки отображения T и при $\alpha < 1$ с помощью ФП (4) нетрудно установить, что в интервалах $1 < \underline{\alpha}_n(m_1) \leq \alpha \leq \bar{\alpha}_n(m_1)$ ($m_1 = 1, 2, \dots$) осциллограмма $x(\tau)^*$ определяется выражением

$$x(\tau)^* = \begin{cases} +1, & 0 \leq \tau \leq m_1 + \tau^*(m_1), \\ -1, & m_1 + \tau^*(m_1) \leq \tau \leq m_1 + 2, \end{cases} \quad (7)$$

где $\tau^*(m_1)$ соответствует фазе появления ИТД в Π_3 и определяется формулой

$$\tau^*(m_1) = \left(\frac{(m_1 + 2)\alpha - m_1 g(+1) - 2g(-1)}{g(+1) + g(-1)} \right), \quad (8)$$

Согласно (7), (8), при $\alpha > 1$ простая неподвижная точка отображения T соответствует периодическому движению с периодом $m_1 + 2$ периодов сигнала ОГ и при этом среднее во времени значение частоты

$$\overline{g(x(\tau)^*)} = \frac{(g(+1)(m_1 + \tau^*(m_1)) + g(-1)(2 - \tau^*(m_1)))}{(m_1 + 2)} = \alpha, \quad (9)$$

т.е. определяется величиной показателя S . Согласно (7), максимальная частота минимальной составляющей ряда Фурье достигается при $m_1 = 1$ и равна $1/3$, т.е. в три раза меньше частоты сигнала ОГ.

При $\alpha < 1$ осциллограмма установившегося движения

$$x(\tau)^* = \begin{cases} +1, & 0 \leq \tau \leq \tau^*(m_2), \\ -1, & \tau^*(m_2) \leq \tau \leq m_2 + 2, \end{cases} \quad (m_2 = 1, 2, \dots) \quad (10)$$

где, согласно (4),

$$\tau^*(m_2) = (\alpha - g(-1))(m_2 + 2) / (g(+1) - g(-1)), \quad (11)$$

в которой $\underline{\alpha}_n(m_2) \leq \alpha \leq \bar{\alpha}_n(m_2)$.

Среднее значение частоты выходного сигнала СЧ при $\alpha < 1$

$$\overline{g(x(\tau)^*)} = \frac{(g(+1)\tau^*(2) + g(-1)(2 + m_2 - \tau^*(m_2)))}{(m_2 + 2)} = \alpha, \quad (12)$$

т.е. также, как и при $\alpha > 1$, определяется величиной показателя S . Согласно (10), максимальная частота минимальной составляющей ряда Фурье достигается при $m_2 = 0$ и равна $1/2$, т.е. в два раза меньше частоты сигнала ОГ.

При выходе из интервалов $\underline{\alpha}_n(m_1) \leq \alpha \leq \bar{\alpha}_n(m_1)$, ($m_1 = 1, 2, \dots$), $\underline{\alpha}_n(m_2) \leq \alpha \leq \bar{\alpha}_n(m_2)$, ($m_2 = 1, 2, \dots$) графики ФП (3) и (4) пересекаются с биссектрисами в местах своих разрывов. Согласно [5], это приводит к возникновению кратных циклов различной сложности: первой сложности — типа $T_2^n T_1, T_2^{n+1} T_1$ или $T_1^n T_2, T_1^{n+1} T_2$; второй сложности, составленной по тем же правилам из циклов первой сложности и т.д. (Здесь $T_1 = T(x < 0), T_2 = T(x > 0)$.) Вдоль оси α интервалы существования циклов первой сложности граничат с интервалами существования циклов второй сложности (интервалы существования циклов второй сложности располагаются между интервалами существования циклов первой сложности.) И так далее по мере увеличения сложности. За вычетом всего множества непересекающихся интервалов существования циклов всевозможной сложности остается множество, соответствующее непериодическим движениям по координате x (движения, устойчивые по Пуассону).

Для оценки минимальной частоты спектра $x(\tau)^*$, соответствующего определенному типу цикла, достаточно отметить, что однократное применение оператора T_1 [3,4] требует затраты времени, равной $m_i + 3$, а оператора T_2 — $m_i + 2$ ($i = 1$ при $\alpha > 1$ и $i = 2$ при $\alpha < 1$). Поэтому, например, период движения $x(\tau)^*$, соответствующего неподвижной точке цикла $T_2^n T_1$ равен $(m_i + 2)n + 3 + m_i$. Аналогично определяется период движения $x(\tau)^*$ для конечного цикла любой сложности. Из отмеченного следует, что частота минимальной составляющей ряда Фурье движения $x(\tau)^*$ соответствует $n = m_1 = 1$, равна $1/7$ и не ограничена снизу. Последнее означает возможность появления квазисплошного спектра.

Таким образом, использование принципа импульсно-го частотно-фазового детектирования, обеспечивая глобальную устойчивость стационарного режима, в определенных поддиапазонах перестройки СЧ способствует появлению неограниченно низкочастотных детерминированных помех [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Левин В.А., Малиновский В.Н., Романов С.К. Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки. — М.: Радио и связь, 1989. — 232 с.
2. Неймарк Ю.И. Метод точечных отображений в теории нелинейных колебаний. — М.: Наука, 1972. — 472 с.
3. Антоновская О.Г., Бесклубная А.В. Построение математической модели синтезатора частоты с импульсно-фазовым детектором, использующей фазовые подпространства // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2024. — № 8. — С.61–66.
4. Антоновская О.Г., Бесклубная А.В. Качественный анализ динамики математической модели синтезатора частоты с импульсно-фазовым детектором, использующей фазовые подпространства // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2025. — № 2. — С.36–40.
5. Леонов Н.Н. О точечном преобразовании прямой в прямую // Изв. Вузов. Радиофизика. — 1959. — Т. 2. — № 6. — С.943–956.
6. Аджемов С.С., Виноградов А.Н., Чиров Д.С. Формирование базы знаний по результатам радиомониторинга в целях решения задачи классификации радиоканалов. // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. — 2009. — № 6. — С.9–13.

© Антоновская Ольга Георгиевна (olga.antonovskaja@yandex.ru); Бесклубная Антонина Вячеславовна (antbesk@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ СОГЛАСОВАННОСТИ ДАННЫХ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

COMPARATIVE ANALYSIS OF DATA CONSISTENCY MODELS IN DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEMS

S. Asmankin

Summary. The article discusses various methods of ensuring data consistency in distributed systems, where several network nodes work in parallel, exchanging messages with each other. The problem of data loss because of asynchronous operations in distributed systems and the desynchronization of the overall application state is considered. The relevance of the research is due to the widespread use of event-driven architectures and microservice application architectures. A comparative analysis of various approaches to conflict resolution has been carried out. Separate categories of consistency models have been identified. The advantages and disadvantages are revealed, and examples of the use of the described algorithms are given. The study revealed the limitations of existing approaches in identifying cause-and-effect relationships between operations or weak definition of the context of the application layer of the application. Based on the analysis, a semantic approach to conflict resolution in distributed systems was proposed. The scientific novelty lies in the improvement of consistency algorithms based on the use of logical clocks like Lamport clocks. Using the logical clock model and the semantic context of operations allows you to resolve conflicts at the application business logic level. The practical significance lies in improving the quality of operation processing for event-oriented application architectures in distributed systems.

Keywords: distributed systems, consistency models, single writer, CRDT, consensus, databases.

Асманкин Сергей Андреевич

Аспирант, ФГАОУ ВО Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»
icepik77@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются различные методы обеспечения согласованности данных в распределенных системах, где несколько узлов сети выполняют работу параллельно, обмениваясь сообщениями друг с другом. Рассматривается проблема потери данных в результате выполнения асинхронных операций в распределенных системах и рассинхронизации общего состояния приложения. Актуальность исследования обусловлена широким распространением event-driven архитектур и микросервисных архитектур приложения. Проведен сравнительный анализ различных подходов к разрешению конфликтов. Были выделены отдельные категории моделей согласованности. Выявлены преимущества и недостатки, приведены примеры использования описанных алгоритмов. В процессе исследования были выявлены ограничения существующих подходов при выявлении причинно-следственных связей между операциями или слабого определения контекста прикладного уровня приложения. На основе проведенного анализа был предложен семантический подход к устранению конфликтных ситуаций в распределенных системах. Научная новизна заключается в усовершенствовании алгоритмов согласованности, основанных на использовании логических часов по типу часов Лампорта. Использование модели логических часов и семантического контекста операций позволяет разрешать конфликты на уровне бизнес-логики приложения. Практическая значимость заключается в повышении качества обработки операций для событийно-ориентированных архитектур приложений в распределенных системах.

Ключевые слова: распределенные системы, модели согласованности, single writer, CRDT, консенсус, базы данных.

Актуальность темы моделей согласованности обусловлена ростом децентрализованных и распределенных систем. Множество IT-компании работают с использованием облачных технологий. Крупнейшие приложения работают с использованием микросервисной архитектуры, которая подразумевает обмен данными между несколькими узлами в сети [1]. Каждый сервис способен асинхронно заниматься обработкой информации и передавать ее другим сервисам внутри приложения. Помимо обмена сообщениями между собой, сервис может обращаться асинхронно к базе данных и производить операции как чтения, так и записи [2]. Системы, в которых узлы обмениваются сообщениями по сети

и асинхронно влияют на состояние друг друга называются распределенными [3].

Алгоритмы согласованности имеют большое разнообразие по причине сложности организации работы узлов в распределенной сети. Это объясняется CAP теоремой, сформулированной Эриком Брюэром. Согласно теореме в моделях согласованности невозможно обеспечивать сразу три свойства для хранимых данных: согласованность, доступность и устойчивость к сетевому разделению. В действительности это означает, что данные в распределенной системе могут быть либо всегда доступны, даже при потере сетевых узлов в сети, либо

быть синхронизированными, но без возможности воспроизведения операции изменения данных. Эти свойства распределенных систем отображены на рис. 1.

В таких системах, где данные являются общими для нескольких агентов сети, могут возникать конфликты записи данных. Некорректная запись может привести к ошибкам приложения, например, если несколько пользователей одновременно будут делать закупки ограниченного товара через приложение, может возникнуть конфликтная ситуация расчета остатка товара на складе. Для достижения консенсуса разрабатываются методы согласованности данных. Существует несколько подходов к разрешению конфликтов записей. Рассмотрим примеры работы распределенных систем и проведем сравнительный анализ.

В первой группе алгоритмов конфликт транзакций разрешается через сохранение первой записи. Другие транзакции отменяются, и их отправка возобновляется согласно новому состоянию базы данных. К этой категории относятся алгоритмы: MVCC [4], STM [5], StampedLock

[6], AtomicReference [7]. Эти алгоритмы реализованы по-разному, но имеют общий подход к решению конфликтных ситуаций. Стратегия «первой записи» используется в тех сценариях, где нет высокой конкуренции за состояние объекта. Примером являются персонализированные системы, где пользователь работает только с данными собственной учетной записи, не затрагивая других. Алгоритмы категории «первой записи» не имеют блокировок и хорошо работают в условиях параллелизма. К недостатку этой категории методов относится избыточное употребление ресурсов при частом возобновлении вызова транзакций, а также потеря данных. Так если, узел А опережает узел Б регулярно, есть вероятность, что данные второго узла не будут сохранены, а будут снова и снова перезаписываться.

Ко второй категории алгоритмов применима противоположная модель поведения. Стратегия «последней записи» применяется в алгоритмах кеширования, логирования, в распределенной базе данных Apache Cassandra [8] и др. В этой базе данных время получения сообщения рассчитывается физическими часами, при



Рис. 1. Теорема CAP

этом есть системы, где время отсчитывается с помощью логических часов. Логические часы устанавливают порядковые величины для событий, помогают устанавливать причинно-следственные связи между ними. Каждое событие содержит такую временную метку, которая увеличивается на один после появления нового события. Каждая новая транзакция с наибольшей временной меткой перезаписывает состояние объекта. Преимуществом алгоритмов «последней записи» является высокая производительность. Такой подход является эффективным в ситуациях, где промежуточный результат работы системы не имеет большого значения, но важно иметь данные об актуальном состоянии.

Можно сохранить первую запись, можно последнюю, но есть системы, где запись делает только один исполнитель (single writer). В распределенной системе, работающей по такому паттерну несколько узлов передают сообщения, которые обрабатываются по очереди [9]. Такой подход исключает гонку операций и предотвращает ошибки записей в критических местах работы приложения. Например, мьютекс ограничивает работу процессов в операционной системе до тех пор, пока не будет исполнен один из процессов, остальные ждут завершения. Наиболее простым примером применения мьютекса является защита разделяемой переменной, доступ к которой может быть востребован из нескольких функций приложения, работающих асинхронно. Модель согласованности Actor используется в торговых биржах и банковских приложениях. Для каждого отдельного счета создается отдельный актор, который обрабатывает все операции пользователей, выставляя заявки в очередь. Сильной стороной этого паттерна является исключение конфликтов, конкурентные ситуации исключены. Согласованность данных обеспечивается сериализацией событий, что обеспечивает контроль и наблюдение за сменой состояний объекта. Главным недостатком является эффект узкого горлышка алгоритма. Если сообщений много, обработка транзакции пользователя может занять продолжительное время.

Другим способом исключить возникновение конфликтов в распределенной системе является создание архитектуры приложения CRDT (Conflict-Free Data Type). При разработке приложения, типы данных, неподверженных конфликту, проектируются заранее. Эти данные должны содержать в себе три свойства: идемпотентность, коммутативность и ассоциативность [10]. На практике это означает, что при получении множества дублирующих сообщений, при изменении порядка получения сообщений или изменения пакета сообщений, результат не изменится. При соблюдении этих свойств операции будут проводиться в распределенной системе без конфликтов в реальном времени. Однако недостатком этого подхода можно назвать сложность реализации такой архитектуры. Алгоритмы, связанные с бизнес-логикой при-

ложения требуют сложных типов данных, что для CRDT неприменимо. Встречается CRDT подход в приложениях с общим рабочим пространством пользователей, работающих в режиме реального времени. Например, в Figma и Notion.

В результате проведенного исследования предлагается подход с использованием логических часов и семантических параметров операций. В отличие от рассмотренных выше примеров с применением временных меток и заранее выверенных типов данных, при разрешении конфликта учитывается контекст выполнения операции. Таким образом, операции рассматриваются не только на уровне изменения состояния объекта, но и на уровне смысловой значимости операции для конкретной предметной области.

Главным элементом предлагаемого подхода является использование логических часов с сочетанием семантического анализа получаемых на вход операций. В случае конфликта проходит оценка логических временных меток и приоритета операции с точки зрения доменной логики. Начальный приоритет семантическому значению, но, если конфликт не разрешается, проводится оценка временных меток операций. Такой механизм позволяет, например, оценивать приоритет критических обновлений приложения или оценивать зависимости между операциями, что недоступно для других алгоритмов согласованности.

Рассматриваемое решение предназначено для реализации в распределенных системах с асинхронным выполнением операций, со сложной бизнес-логикой, где другие методы согласованности данных могут привести к неправильным результатам обработки информации или ее потере. Сходимость данных обеспечивается за счет применения детерминированных правил разрешения конфликтов данных на основе логических часов, но также появляется необходимость в разработке правил обработки семантических данных операций и их формализации, проектированию универсального подхода к реализации такой модели, подходящей для любой предметной области. В таблице 1 указан результат проведенного сравнительного анализа различных моделей согласованности.

В заключении подчеркнем важность выбранного направления исследования, целью которого является повышение качества обработки конфликтных событий для больших объемов данных распределенных систем. Семантический алгоритм предоставляет возможности более эффективного подхода для решения задач биллинга, управления статусами, заказами, CRM, ERP систем. Каждый из перечисленных подходов к достижению консенсуса обладает сильными и слабыми сторонами, но на основании этих издержек можно разработать усовершенствованную модель согласованности данных.

Таблица 1.

Сравнительный анализ моделей согласованности данных

Критерий / Модель	Стратегия «первой записи»	Стратегия «последней записи»	Single Writer	CRDT	Семантический подход
Сходимость состояний	+	+	+	+	+
Детерминированность результата	–	–	+	+	+
Устойчивость к смене порядка в очереди операций	–	–	+	+	+
Устойчивость к дублированию	–	–	+	+	+
Отсутствие потери данных	–	–	+	+	+
Масштабируемость	+	+	–	+	+
Работа без координации	+	+	–	+	+
Учет причинно-следственных связей	–	–	+	+	+
Учет семантики операций	–	–	–	–	+
Гибкость разрешения конфликтов	–	–	–	–	+
Применимость в сложной бизнес-логике	–	–	+	–	+

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров А. Распределенные данные. Алгоритмы работы современных систем хранения информации: монография. СПб.: Питер, 2023. 336 с.
2. Бернс.Б. Распределенные системы. Паттерны проектирования: монография. СПб.:Питер, 2021. 224 с.
3. Васина Д.И. Распределенные системы хранения данных //Москва. 2026. №. 2. С. 3–8.
4. Enokido T., Duolikun D., Takizawa M. Energy-saving multi-version timestamp ordering algorithm for virtual machine environments // Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems. Cham: Springer Nature Switzerland. 2023. С. 13–20.
5. Bieniusa A., Fuhrmann T. Consistency in hindsight: A fully decentralized STM algorithm // 2010 IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing (IPDPS). IEEE, 2010. С. 1–12.
6. Ganai M.K. Efficient data race prediction with incremental reasoning on time-stamped lock history // 2013 28th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE). IEEE, 2013. С. 37–47.
7. Windsor M. et al. Starling: Lightweight concurrency verification with views //International Conference on Computer Aided Verification. — Cham: Springer International Publishing, 2017. С. 544–569.
8. Chebotko A., Kashlev A., Lu S. A big data modeling methodology for Apache Cassandra //2015 IEEE International Congress on Big Data. IEEE, 2015. С. 238–245.
9. Keleher P.J. The relative importance of concurrent writers and weak consistency models // Proceedings of 16th International Conference on Distributed Computing Systems. IEEE, 1996. С. 91–98.
10. Zhu Y., Ma J. Crust: A Modular Framework for Conflict-Free Replicated Data Types (CRDTs) Development, Validation, and Benchmarking //IEEE Access. 2025. С. 81–93.

© Асманкин Сергей Андреевич (icerik77@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИНСТРУМЕНТЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АУДИТА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЦИФРОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS FOR INFORMATION SECURITY AUDIT OF DIGITAL INFRASTRUCTURE

**E. Belkin
A. Kondrashev**

Summary. The article discusses the application of artificial intelligence tools, large language models and AI agents to information security audits of organizational IT infrastructure. The study is relevant because corporate systems are becoming more complex, cloud and hybrid environments are expanding, and the volume of logs, cyber intelligence data, vulnerability information and regulatory requirements continues to grow. The purpose of the study is to systematize AI application areas in information security auditing, identify the advantages and limitations of these tools, and propose a model for their safe integration into the audit process. The methodology is based on an analysis of publications on security assessment, information security audit, machine learning, large language models and AI agents, as well as on a generalization of practical audit tasks. The study shows that AI tools are especially useful for asset inventory, configuration and log analysis, vulnerability prioritization, cyber intelligence processing, reporting and decision support. The main limitations are model hallucinations, data leakage risks, dependence on input data quality, limited explainability, vulnerabilities of LLM applications and the need for expert validation. A four-layer model is proposed: data layer, analytical layer, agent layer and trust layer.

Keywords: artificial intelligence, information security, information security audit, IT infrastructure, large language models, AI agents, vulnerability management, cyber intelligence, trusted AI.

Белкин Евгений Николаевич

АО «АЛГОНТ», г. Калуга

belkinen@algont.ru

Кондрашев Александр Сергеевич

АО «АЛГОНТ», г. Калуга

alex_ko@algont.ru

Аннотация. Статья посвящена применению инструментов искусственного интеллекта, больших языковых моделей и ИИ-агентов в аудите информационной безопасности ИТ-инфраструктуры. Актуальность обусловлена усложнением корпоративных систем, распространением облачных и гибридных контуров, ростом журналов событий, данных киберразведки, сведений об уязвимостях и нормативных требований. Цель исследования — систематизировать направления использования ИИ в аудите ИБ, определить преимущества и ограничения таких инструментов, а также предложить модель их безопасной интеграции в аудиторский процесс. Методология основана на анализе публикаций по оценке защищенности, аудиту ИБ, машинному обучению, LLM и ИИ-агентам, а также на обобщении практических задач аудита. Показано, что наибольший эффект ИИ-инструменты дают при инвентаризации активов, анализе конфигураций и журналов, приоритизации уязвимостей, обработке данных киберразведки, подготовке отчетности и поддержке решений. Одновременно выявлены ограничения: галлюцинации моделей, риски утечки данных, зависимость от качества источников, непрозрачность вывода, уязвимости LLM-приложений и необходимость экспертной валидации. Предложена четырехконтурная модель применения ИИ: контур данных, аналитический контур, агентный контур и контур доверия.

Ключевые слова: искусственный интеллект, информационная безопасность, аудит ИБ, ИТ-инфраструктура, большие языковые модели, ИИ-агенты, управление уязвимостями, киберразведка, доверенный ИИ.

Введение

Аудит информационной безопасности ИТ-инфраструктуры остается ключевым инструментом подтверждения достаточности организационных и технических мер защиты. Его результаты используют для выявления уязвимостей, оценки остаточных рисков, контроля требований регламентов и обоснования корректирующих мероприятий. Однако распределенные сети, гибридные облака, микросервисы, удаленный доступ и большое число средств защиты делают классический ручной аудит менее результативным: снижаются полнота охвата, скорость обработки сведений и воспроизводимость выводов.

Интерес к инструментам ИИ объясняется тем, что аудит ИБ все чаще работает с крупными массивами структурированной и слабоструктурированной информации: журналами, результатами сканирования, данными инвентаризации, конфигурациями, сведениями о правах доступа, отчетами мониторинга, бюллетенями уязвимостей, моделями угроз и внутренними политиками безопасности. Совместный анализ этих источников позволяет увидеть фактическое состояние защищенности. В исследованиях LLM рассматриваются как средство поддержки анализа защищенности и тестирования на проникновение [1], поиска угроз на основе глубокого обучения [2] и анализа данных киберразведки с применением RAG-подходов [3].

Параллельно формируется класс ИИ-агентов, способных декомпозировать задачу, планировать действия, обращаться к разрешенным инструментам и сохранять контекст. Архитектура LLM-агентов и их кибербезопасность уже описываются как самостоятельное направление [4, 5]. Для аудита ИБ это важно, поскольку агентный подход переводит ИИ от разовой генерации текста к управляемому выполнению сценариев: сбору доказательств, сопоставлению активов, анализу доступа, формированию отклонений и контролю их устранения.

Цель статьи — систематизировать направления применения ИИ, LLM и ИИ-агентов в аудите информационной безопасности ИТ-инфраструктуры, обозначить преимущества и ограничения их использования, а также предложить модель безопасной интеграции таких инструментов в аудиторский процесс.

Научная новизна работы связана с формированием четырехконтурной модели применения ИИ в аудите ИБ. Модель включает контур данных, аналитический контур, агентный контур и контур доверия. Практическая значимость состоит в возможности использовать ее при разработке регламентов внедрения ИИ-инструментов.

Материалы и методы

Методологическую основу исследования составили системный и сравнительный анализ публикаций по искусственному интеллекту и информационной безопасности, классификация аудиторских задач и обобщение типовых этапов аудита ИТ-инфраструктуры. Учитывались подходы к доверенным платформам ИИ и аудиту систем ИИ [6], а также исследования уязвимостей LLM-приложений, включая инъекции подсказок [7].

Объектом исследования выступает ИТ-инфраструктура организации: серверы, рабочие станции, сетевое оборудование, облачные ресурсы, системы виртуализации, базы данных, средства защиты информации, журналирования и мониторинга, системы управления учетными записями и программные интерфейсы обмена данными.

Предмет исследования — методы применения ИИ-инструментов в аудиторских процедурах: инвентаризации активов, анализе конфигураций, оценке прав доступа, обработке журналов, управлении уязвимостями, поддержке тестирования на проникновение, анализе документации, приоритизации рисков и подготовке заключения.

Под ИИ-инструментами понимаются модели машинного обучения для классификации и обнаружения аномалий; LLM для анализа текстов, журналов и конфигураций; RAG-системы для ответов на основе корпоративной

базы знаний; ИИ-агенты для выполнения ограниченных сценариев; графовые и семантические модели для представления связей между активами, угрозами, уязвимостями и мерами защиты.

Роль ИИ в аудите информационной безопасности

ИИ в аудите ИБ целесообразно рассматривать не как замену аудитора, а как интеллектуальный слой поддержки решений. Он ускоряет обработку сведений и помогает находить закономерности, которые трудно заметить вручную. Итоговый вывод о несоответствии, уровне риска и достаточности корректирующих мер должен оставаться за уполномоченным специалистом.

На этапе подготовки аудита LLM может анализировать исходную документацию, формировать программу проверки, сопоставлять внутренние политики с областями контроля и готовить вопросы для интервью. В организациях с развитой нормативной базой это сокращает первичный обзор и помогает выявлять дублирование, устаревшие формулировки и пробелы в процедурах.

На этапе сбора данных ИИ нормализует сведения из CMDB, систем управления активами, SIEM, EDR, сканеров уязвимостей, средств контроля доступа и репозиториях кода. Типовая задача — выявить расхождения между фактической инфраструктурой и учетными документами: актив есть в журналах, но отсутствует в реестре; учетная запись имеет повышенные привилегии, но не отражена в матрице ролей; критичный сервис размещен в неподходящем сегменте.

На этапе анализа ИИ-инструменты группируют события, выделяют повторяющиеся паттерны, классифицируют уязвимости, связывают технические дефекты с бизнес-контекстом и формируют предварительные гипотезы о причинах отклонений. Это соответствует общему направлению применения ИИ для автоматизации выявления угроз, анализа данных и поддержки решений [8].

На этапе подготовки отчета LLM может формировать черновики заключений, технические и управленческие рекомендации, структурировать доказательства и адаптировать описание риска для разных аудиторий. Здесь особенно важна проверка: все выводы должны подтверждаться журналами, конфигурациями, скриншотами, протоколами проверки или выгрузками из систем управления.

Возможности больших языковых моделей в аудите ИБ

Большие языковые модели обладают свойствами, полезными для аудита ИБ: они понимают естественный язык, суммируют тексты, извлекают сущности, пре-

образуют форматы, сопоставляют требования и фактические сведения, генерируют объяснения и черновые рекомендации. Это особенно ценно там, где скрипты и экспертные правила слишком жестки.

Первое направление — анализ нормативной и внутренней документации. LLM может сравнивать политики ИБ, регламенты управления доступом, инструкции по реагированию, модели угроз и технические стандарты. На выходе аудитор получает перечень пробелов, противоречий и документов, требующих актуализации.

Второе направление — анализ конфигураций. LLM может переводить конфигурационные файлы, шаблоны инфраструктуры и результаты проверок в понятные пояснения, выявлять небезопасные параметры, отсутствие журналирования, избыточные привилегии и отклонения от базовых профилей. При этом текстовая интерпретация должна дополнять, а не заменять формальные правила проверки.

Третье направление — обработка журналов событий. Модель может суммаризировать длинные цепочки событий, выделять аномальные интервалы, группировать действия пользователей и активов, выдвигать гипотезы о причинах отклонений. Это полезно при расследовании инцидентов и при аудите качества мониторинга: состава источников, правил корреляции и полноты сбора событий.

Четвертое направление — управление уязвимостями. Исследования семантических моделей, графов эксплойтов и автоматизации анализа уязвимостей показывают важность связей между активами, дефектами, метриками и потенциальными воздействиями [9-11]. LLM может служить интерфейсом к таким моделям: объяснять результаты, группировать дубликаты, сопоставлять уязвимости с активами и предлагать очередность устранения. При поддержке тестирования на проникновение критерии качества следует формализовать заранее [12].

Пятое направление — анализ слабоструктурированных данных об угрозах. Большие языковые модели и RAG-конвейеры позволяют аккумулировать знания об актуальных сценариях атак, уязвимостях и индикаторах компрометации [3]. Для аудита это упрощает проверку актуальности модели угроз и сопоставление инфраструктуры с современными сценариями компьютерных атак.

ИИ-агенты как новый класс инструментов аудита

ИИ-агент отличается от одиночной LLM наличием механизма планирования, памяти, интерфейсов к инструментам и правил выполнения действий. В аудите ИБ он

может принять высокоуровневую задачу, разложить ее на подзадачи, запросить сведения из разрешенных источников, подготовить промежуточные выводы и проект аудиторского замечания. Если действия агента заранее ограничены и журналируются, повышается воспроизводимость аудита. Агентские сценарии должны вписываться в логику фиксации области проверки, доказательств и согласованных рекомендаций [13].

Например, при проверке привилегированного доступа агент может получить перечень серверов, сопоставить административные группы с матрицей ролей, выявить неактивные учетные записи, проверить журналирование действий администраторов и подготовить список отклонений. При управлении уязвимостями он связывает результаты сканирования с критичностью активов, сетевой доступностью, компенсирующими мерами и статусом устранения.

Агентный подход особенно полезен для непрерывного аудита, когда проверка проводится не раз в год, а превращается в регулярный контроль отклонений. Агент может отслеживать изменения конфигураций, появление новых активов, изменение прав доступа, просроченные задачи по уязвимостям и отсутствие подтверждающих доказательств.

Вместе с тем ИИ-агент должен работать в режиме минимально необходимых прав. Ему не следует предоставлять произвольный доступ к инфраструктуре или возможность активного воздействия без утвержденной программы проверки. Необходимы допустимые источники данных, перечень инструментов, границы запросов, правила остановки и экспертное подтверждение результатов.

Четырехконтурная модель интеграции ИИ в аудит ИБ

Для безопасной интеграции ИИ предлагается четырехконтурная модель. Она разводит данные, аналитику, агентные действия и проверку доверия, позволяя использовать преимущества ИИ без потери управляемости и доказательности аудита.

Первый контур — контур данных. Он включает реестр активов, журналы событий, результаты сканирования, конфигурации, политики ИБ, матрицы доступа, отчеты прошлых проверок, сведения о бизнес-процессах и данные киберразведки. На этом уровне нужны классификация информации, маскирование чувствительных данных, контроль доступа, журналирование запросов и правила хранения.

Второй контур — аналитический. В него входят модели машинного обучения, LLM, RAG-компоненты, семан-

тические модели, графы атак и механизмы корреляции. Его назначение — выявлять закономерности, формировать гипотезы, группировать результаты и объяснять связи между активами, уязвимостями, угрозами и мерами защиты.

Третий контур — агентный. Он включает ИИ-агентов, выполняющих ограниченные сценарии аудита. Агент должен действовать через контролируемые интерфейсы, иметь predetermined перечень инструментов, сохранять журнал действий и не выполнять несанкционированные активные воздействия.

Четвертый контур — контур доверия. Он включает экспертную валидацию, проверку доказательств, объяснимость выводов, контроль качества модели, тестирование устойчивости к ошибкам и атакам, а также утверждение итогового заключения. Поскольку доверие к процессам аудита ИБ уже выделяется как самостоятельная проблема [14], этот контур должен оставаться центральным при внедрении ИИ.

Преимущества применения ИИ в аудите ИБ

Главное преимущество ИИ-инструментов — высокая скорость обработки данных. Аудитор быстрее анализирует массивы журналов, конфигураций и отчетов сканирования, что особенно важно для распределенной инфраструктуры и большого числа активов.

Второе преимущество — повышение полноты анализа. ИИ сопоставляет сведения из разных источников и выявляет связи, которые в ручном режиме часто остаются незаметными: уязвимость на критичном сервере, отсутствие компенсирующей меры, нестандартную сетевую доступность, неактуальную запись в реестре и неполное журналирование.

Третье преимущество — риск-ориентированная приоритизация. ИИ помогает учитывать критичность актива, сетевую доступность, признаки эксплуатации, роль системы в бизнес-процессе, статус исправления и историю инцидентов, дополняя формальные метрики и графовые модели защищенности.

Четвертое преимущество — более понятная коммуникация результатов. LLM может подготовить разные версии одного замечания: техническую для администратора, управленческую для владельца процесса и краткую для руководства. Это повышает понятность риска и вероятность своевременного устранения.

Пятое преимущество — накопление базы знаний. RAG-система, подключенная к прошлым аудитам, внутренним регламентам и утвержденным рекомендациям, поддерживает единый подход к формулированию за-

мечаний и снижает разброс между проверками разных аудиторов.

Ограничения и риски применения ИИ

Применение ИИ связано с существенными ограничениями. Первое — риск галлюцинаций и логических ошибок: LLM может убедительно сформулировать вывод, который не подтверждается исходными сведениями. Поэтому каждое аудиторское замечание должно опираться на проверяемую доказательную базу.

Второе ограничение — зависимость от качества данных. Если реестр активов неполон, журналы собираются нерегулярно, сканеры настроены некорректно, а документация устарела, ИИ воспроизведет и иногда усилит эти ошибки. Внедрение ИИ не отменяет корректную инвентаризацию, актуальные политики и проверенные источники.

Третье ограничение — риск утечки конфиденциальной информации. Журналы, конфигурации, сведения об уязвимостях и внутренние регламенты могут содержать критически значимые данные. Передача таких сведений во внешние сервисы без правовой и технической оценки недопустима; предпочтительны локальные или контролируемые контуры обработки.

Четвертое ограничение — уязвимости LLM-приложений и ИИ-агентов: инъекции подсказок, подмена контекста, манипулирование источниками RAG-базы, ошибочные права доступа к инструментам и несанкционированный вызов действий. Эти риски описаны в исследованиях безопасности LLM и генеративного ИИ [7, 15], поэтому сам ИИ-инструмент должен быть объектом аудита.

Пятое ограничение — проблема ответственности. Итоговое аудиторское заключение нельзя делегировать модели: ответственность за выводы, рекомендации и оценку рисков несет уполномоченный специалист или экспертная группа. Практически оправданной остается модель «ИИ помогает — человек утверждает».

Требования к безопасному применению ИИ

Безопасное применение ИИ в аудите ИБ должно опираться на утвержденный регламент. В нем определяются допустимые сценарии использования, границы доступа к данным, порядок маскирования чувствительной информации, правила журналирования действий, процедура экспертной проверки и ответственность за итоговые решения.

Для LLM стоит использовать принцип доказательного ответа: модель должна не только формировать вывод,

но и показывать опорные сведения. В корпоративном контуре это могут быть идентификаторы активов, строки конфигураций, события журналов, пункты политик, номера задач по устранению замечаний и результаты повторной проверки.

Для ИИ-агентов необходимо ограничивать доступные инструменты и разделять права. Агент, анализирующий документацию, не должен запускать активные сетевые проверки; агент, работающий с журналами, должен получать доступ только к разрешенным выборкам, а не ко всему массиву событий.

Наконец, нужна регулярная проверка качества ИИ-контента: тестовые наборы, контроль ложноположительных и ложноотрицательных выводов, проверка устойчивости к ошибочным запросам, анализ RAG-базы, аудит прав доступа и ревизия журналов действий.

Заключение

Искусственный интеллект, большие языковые модели и ИИ-агенты являются перспективными инструментами аудита информационной безопасности ИТ-инфраструктуры. Они ускоряют обработку данных, по-

вышают полноту анализа, улучшают приоритизацию рисков, помогают структурировать доказательства и готовить понятную отчетность для разных уровней управления.

Наиболее эффективные области применения включают инвентаризацию активов, анализ конфигураций, обработку журналов событий, управление уязвимостями, анализ документации, поддержку тестирования на проникновение, работу с данными киберразведки и контроль устранения замечаний. При этом ИИ не является самостоятельным субъектом аудита: его выводы требуют экспертной проверки, а действия агентов должны быть ограничены, журналируемы и воспроизводимы.

Предложенная четырехконтурная модель (контур данных, аналитический контур, агентный контур и контур доверия) позволяет встроить ИИ в аудиторский процесс без утраты управляемости. Ключевое условие — принцип доказательности: каждое замечание связано с конкретными сведениями, а итоговое решение принимает человек. Перспективными направлениями остаются разработка метрик качества ИИ-помощника аудитора, оценка устойчивости агентных систем к манипуляциям и создание типовых регламентов применения LLM в корпоративном аудите ИБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конев А.А., Паюсова Т.И. Большие языковые модели в информационной безопасности и тестировании на проникновение: систематический обзор возможностей применения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 42–52. DOI: 10.17586/2226–1494–2025-25-1-42-52.
2. Котенко И.В., Абраменко Г.Т. Использование больших языковых моделей для поиска угроз кибербезопасности на основе методов глубокого обучения: анализ современных исследований // Правовая информатика. 2024. № 3. С. 32–42. DOI: 10.24682/1994–1404-2024-3-32-42.
3. Луцкович А.И., Васильев В.И., Вульфин А.М., Кириллова А.Д., Сулаво А.Е. Автоматизированная система анализа слабоструктурированных данных киберразведки с использованием больших языковых моделей // Информационно-управляющие системы. 2025. № 2. С. 50–67. DOI: 10.31799/1684-8853-2025-2-50-67.
4. Намиот Д.Е., Ильюшин Е.А. Архитектура LLM-агентов // International Journal of Open Information Technologies. 2025. Т. 13, № 1. С. 67–74.
5. Намиот Д.Е., Ильюшин Е.А. О кибербезопасности ИИ-агентов // International Journal of Open Information Technologies. 2025. Т. 13, № 9. С. 13–24.
6. Намиот Д.Е., Ильюшин Е.А. Доверенные платформы искусственного интеллекта: сертификация и аудит // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Т. 12, № 1. С. 43–60.
7. Мударова Р.М., Намиот Д.Е. Противодействие атакам типа инъекция подсказок на большие языковые модели // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Т. 12, № 5. С. 39–48.
8. 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. DOI: 10.21681/2311–3456-2024-4-02-12.
9. Дойникова Е.В., Федорченко А.В., Котенко И.В., Новикова Е.С. Методика оценивания защищенности на основе семантической модели метрик и данных // Вопросы кибербезопасности. 2021. № 1 (41). С. 29–40. DOI: 10.21681/2311–3456-2021-1-29-40.
10. Федорченко Е.В., Котенко И.В., Федорченко А.В., Новикова Е.С., Саенко И.Б. Оценивание защищенности информационных систем на основе графовой модели эксплойтов // Вопросы кибербезопасности. 2023. № 3 (55). С. 23–36. DOI: 10.21681/2311–3456-2023-3-23-36.
11. Васильев В.И., Вульфин А.М., Кучкарова Н.В. Автоматизация анализа уязвимостей программного обеспечения на основе технологии Text Mining // Вопросы кибербезопасности. 2020. № 4 (38). С. 22–31. DOI: 10.21681/2311–3456-2020-04-22-31.
12. Макаренко С.И. Критерии и показатели оценки качества тестирования на проникновение // Вопросы кибербезопасности. 2021. № 3 (43). С. 43–57. DOI: 10.21681/2311–3456-2021-3-43-57.
13. Ситская А.В., Селифанов В.В., Звягинцева П.А. Вопросы аудита информационной безопасности // Безопасность цифровых технологий. 2023. № 3 (110). С. 67–82. DOI: 10.17212/2782–2230-2023-3-67-82.
14. Иванов А.В., Огнев И.А. Проблемы оценки доверия к процессам аудита информационной безопасности // Вопросы кибербезопасности. 2024. № 3 (61). С. 40–50. DOI: 10.21681/2311–3456-2024-3-40-50.
15. Намиот Д.Е., Ильюшин Е.А. О киберрисках генеративного Искусственного Интеллекта // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Т. 12, № 10. С. 109–119.

© Белкин Евгений Николаевич (belkinen@algont.ru); Кондрашев Александр Сергеевич (alex_ko@algont.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ОЛЕДЕНЕНИЯ СЕВЕРО-ЧУЙСКОГО ХРЕБТА (АЛТАЙ) НА ОСНОВЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО АНАЛИЗА

SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS OF GLACIATION OF THE NORTH-CHUYA RIDGE (ALTAI) BASED ON GEOINFORMATION ANALYSIS

**E. Belousov
V. Kopylov**

Summary. In the context of observed climate instability, mountain glaciers act as highly sensitive indicators of regional warming, which creates an urgent need for systematic monitoring of their condition. Traditional approaches to assessing glacier dynamics, based on scattered field observations and topographic maps of varying accuracy, do not provide a unified methodological framework for comparing long-term trends. This paper presents an applied technology for reconstructing glacier boundaries in the North Chuya Range across four time slices (Little Ice Age maximum, 1962, 2000, and 2021) using multi-temporal Earth remote sensing data. An algorithm for automated interpretation has been developed, including the calculation of spectral indices, morphological filtering, and validation against digital elevation models. The obtained quantitative estimates of changes in glacier area, altitudinal distribution, and aspect exposure form an empirical basis for hydrological calculations, water resource assessment in high-mountain basins, and flood risk forecasting. The results confirm the accelerating degradation of glaciers in the 21st century and demonstrate the reproducibility of the proposed method for other mountain systems.

Keywords: North Chuya Range, Little Ice Age, Earth remote sensing, glacier interpretation, spectral indices, glacier hypsometry, climate monitoring, high-mountain watersheds.

Белоусов Егор Павлович

Аспирант, Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

vilsonet2017@mail.ru

Копылов Василий Николаевич

Доктор технических наук, профессор, Сибирский
региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, г. Новосибирск
kvn@sibstrin.ru

Аннотация. В условиях наблюдаемой климатической нестабильности горные ледники выступают в роли высокочувствительных индикаторов регионального потепления, что вызывает острую необходимость в систематическом мониторинге их состояния. Традиционные подходы к оценке динамики оледенения, основанные на разрозненных полевых наблюдениях и топографических картах различной точности, не обеспечивают единой методологической базы для сопоставления многолетних трендов. В статье представлена прикладная технология реконструкции границ ледников Северо-Чуйского хребта на четыре временных среза (максимум малого ледникового периода, 1962, 2000 и 2021 гг.) с использованием разновременных материалов дистанционного зондирования Земли. Разработан алгоритм автоматизированного дешифрирования, включающий расчёт спектральных индексов, морфологическую фильтрацию и верификацию по цифровым моделям рельефа. Полученные количественные оценки изменения площади, высотного распределения и экспозиционной приуроченности ледников формируют эмпирическую основу для гидрологических расчётов, оценки водных ресурсов высокогорных бассейнов и прогнозирования паводковых рисков. Результаты подтверждают ускорение темпов деградации оледенения в XXI веке и демонстрируют воспроизводимость предложенного метода для других горных систем.

Ключевые слова: Северо-Чуйский хребет, малый ледниковый период, дистанционное зондирование Земли, дешифрирование ледников, спектральные индексы, гипсометрия оледенения, климатический мониторинг, высокогорные водосборы.

Введение

Горные ледниковые системы относятся к числу наиболее уязвимых компонентов криосферы, реагирующих на климатические флуктуации с минимальной временной задержкой. В последние десятилетия глобальное сокращение ледникового покрова приобрело необратимый характер, что подтверждается данными спутниковой альтиметрии, гравиметрических миссий и наземного мониторинга [1]. Для континентальных ре-

гионов Сибири и Центральной Азии деградация оледенения несёт прямые гидрологические последствия: трансформацию сезонного стока, снижение водообеспеченности засушливых периодов, активизацию селевых и паводковых процессов в высокогорных бассейнах [2]. В этих условиях регулярный учёт морфометрических параметров ледников становится не только научной, но и прикладной задачей, необходимой для адаптивного управления водными ресурсами и территориального планирования.

Северо-Чуйский хребет, расположенный в юго-восточной части Русского Алтая, представляет собой ключевой орографический узел, формирующий питание притоков Катунь. Несмотря на значительную площадь современного оледенения и его гидрологическую роль, количественные оценки динамики ледников хребта остаются фрагментарными. Существующие каталоги и ретроспективные оценки опираются на гетерогенные источники: полевые маршрутные съёмки середины XX века, топографические карты масштаба 1:50 000, разновременные аэрофотоснимки и единичные космические снимки низкого разрешения [3]. Подобная разнородность данных препятствует построению единого временного ряда, вносит систематические погрешности в расчёт темпов сокращения и не позволяет выявить пространственную дифференциацию процессов деградации в пределах хребта. Кроме того, отсутствие стандартизированной методики дешифрирования для данного района затрудняет сопоставление результатов с исследованиями соседних гляциологических центров (Катунский, Южно-Чуйский хребты, массив Таван-Богдо-Ола).

Актуальность исследования обусловлена необходимостью внедрения единой технологической схемы ретроспективного анализа оледенения, основанной на объективных материалах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и верифицируемых алгоритмах обработки. Применение современных спектральных методов, геоинформационного моделирования и статистической оценки ошибок позволяет преодолеть ограничения традиционных подходов, обеспечивая воспроизводимость результатов и их пригодность для решения прикладных задач гидрологии, климатологии и природопользования. Разработка и апробация такой схемы для Северо-Чуйского хребта создаёт методологический прецедент, который может быть тиражирован на иные высокогорные территории с разреженной сетью метеонаблюдений [4].

Цель работы — количественная оценка изменений площади, высотного распределения и экспозиционной структуры оледенения Северо-Чуйского хребта с максимума малого ледникового периода по 2021 г. на основе дешифрирования разновременных космических снимков и цифровой модели рельефа.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Сформирован однородный массив разновременных дистанционных данных (Corona, Landsat-7, Sentinel-2), приведённый к единой системе координат и пространственному разрешению.
2. Разработан алгоритм автоматизированного выделения границ ледников с применением индекса NDSI, морфологической постобработки и контроля по гипсометрическим профилям.

3. Выполнена реконструкция контуров оледенения максимум малого ледникового периода геоморфологическим методом по конечно-моренным комплексам и границам свежей экзарации.
4. Рассчитаны темпы сокращения площади, параметры высотного распределения и коэффициенты экспозиционной контрастности для каждого временного среза, выявлены пространственные закономерности деградации.

Дальнейшее изложение материала структурировано в соответствии с методологией исследования: раздел «Материалы и методы» детализирует источники данных и алгоритмы обработки, раздел «Результаты» содержит количественные оценки динамики оледенения, а раздел «Обсуждение» сопоставляет полученные данные с региональными климатическими трендами и исследованиями соседних хребтов.

Материалы и методы

Район исследования. Северо-Чуйский хребет представляет собой горное сооружение, протягивающееся в субширотном направлении на 85 км между 87°15' и 88°25' в.д., 49°55' и 50°10' с.ш. Орографически хребет ограничен с севера долиной реки Чуи, с юга — Чуйской котловиной и долиной реки Аргут. Высшая точка района — гора Машей (4177 м), расположенная в западной части хребта. Рельеф характеризуется значительным расчленением, наличием глубоких троговых долин, каровых ступеней и цирков. Климат района определяется как резко континентальный высокогорный. Зимы холодные и малоснежные, лето короткое, с максимальным выпадением осадков в июле-августе. Годовая сумма осадков в нивально-гляциальном поясе варьируется от 800 до 1200 мм.

Источники данных. Для оценки динамики оледенения был сформирован массив разновременных дистанционных материалов, охватывающий ключевые этапы деградации ледниковой системы:

1. Снимки Corona (1962 г.): Аэрокосмические снимки КН-4В с пространственным разрешением около 7,6 м. Данные подвергались геометрической привязке к современным топографическим картам с использованием опорных точек на скальных выходах и водораздельных гребнях.
2. Снимки Landsat-7 ETM+ (2000 г.): использовались панхроматические (15 м) и мультиспектральные каналы (30 м). Для повышения детальности применялась процедура панхроматического слияния.
3. Цифровая модель рельефа SRTM (30 м): использовалась для расчетов гипсометрических характеристик, экспозиций и уклонов ледниковых языков [5].

Методы дешифрирования. Выделение контуров ледников проводилось в геоинформационной среде ArcGIS Pro. Для снимков Sentinel-2 применялся полуавтоматический алгоритм на основе индекса нормализованной разности снежного покрова (NDSI), рассчитываемого по формуле:

$$NDSI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR} \quad (1)$$

где *Green* — коэффициент спектральной яркости в зеленом канале (Band 3), *SWIR* — в коротковолновом инфракрасном канале (Band 11). Пороговое значение $NDSI \geq 0.4$ использовалось для первичного выделения ледяных поверхностей [6]. Ручное уточнение контуров требовалось для ледников, покрытых мореной, где спектральные индексы были неэффективны. В таких случаях упор производился на текстурные признаки: сглаженность поверхности, наличие ледниковых трещин и бергшрундов, а также гидрографическую сеть, формирующуюся у лобовых морен (см. рисунок 1).

Реконструкция границ МЛП. Определение максимальных границ ледников в малый ледниковый период (ориентировочно середина XIX в.) осуществлялось геоморфологическим методом. Ключевым критерием служило картирование конечно-моренных комплексов, сохранивших четкие формы рельефа. Диагностическими признаками морен МЛП являлись:

1. Отсутствие задернованности или развитие пионерной растительности;
2. Резкая морфологическая граница между невыветрелыми блоками внутри морены и выветрелыми породами за ее пределами;
3. Наличие термокарстовых форм, свидетельствующих о деградации погребенного льда. В случае отсутствия выраженных морен использовались границы свежей ледниковой экзарации на скальных бортах долин.

Оценка погрешностей. Систематическая ошибка определения площади (A_{err}) рассчитывалась исходя из разрешения снимка (R) и длины периметра ледника (P) по формуле:

$$A_{err} = P * R * \sqrt{2} \quad (2)$$

Максимальная относительная ошибка для крупных ледников не превышала 2 %, для малых ледников (площадью $< 0.1 \text{ км}^2$) могла достигать 15 %.

Методы расчета объема. Оценка объема льда (V) производилась двумя независимыми методами для повышения достоверности.

Первый метод — степенная зависимость площади и объема (Volume-Area Scaling, VAS):

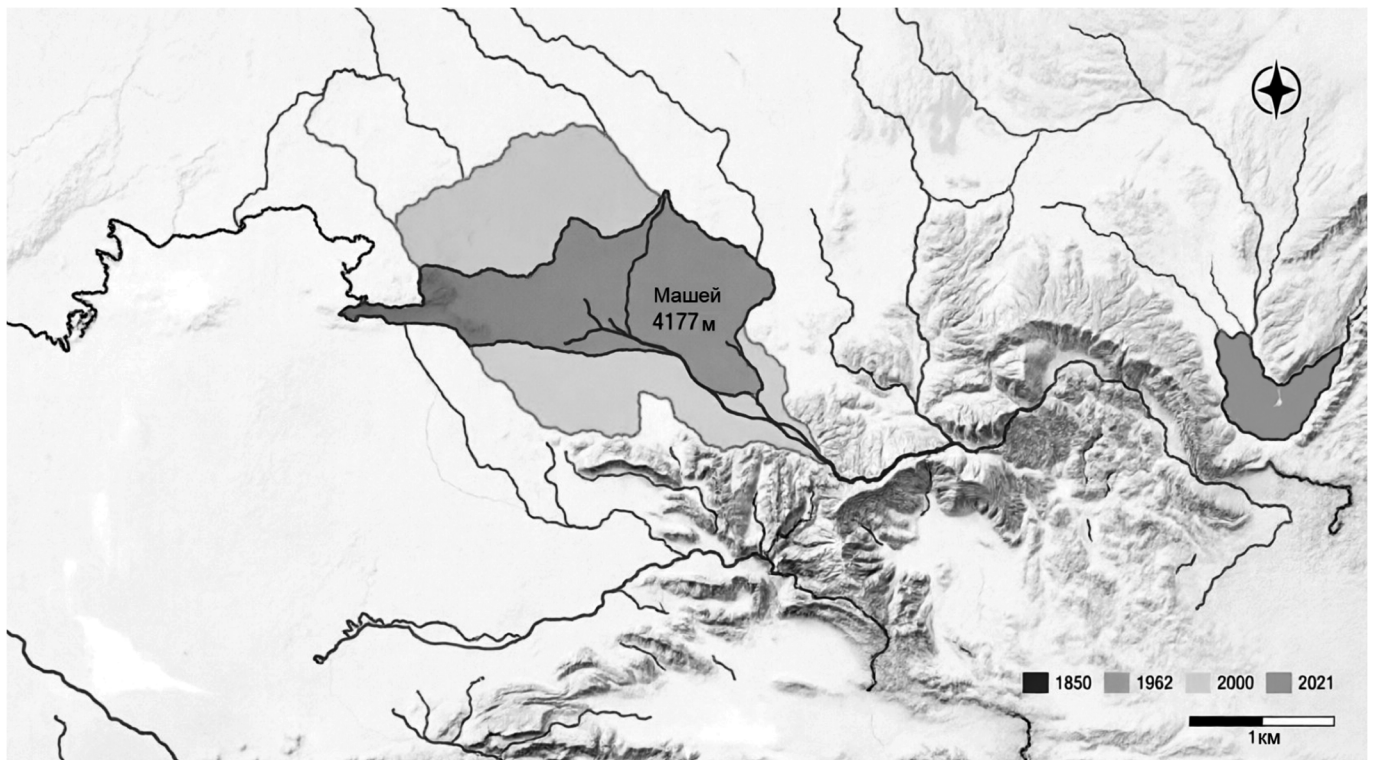


Рис. 1. Карта сокращения оледенения Северо-Чуйского хребта (Алтай) с максимума малого ледникового периода по 2021 г.

Источник: составлено авторами на основании дешифрирования снимков Corona, Landsat-7, Sentinel-2 и ЦМР SRTM

$$V = c * A^\gamma \quad (3)$$

где $c = 0.038$ и $\gamma = 1.375$ — эмпирические коэффициенты, валидированные для горных систем Алтая.

Второй метод использования физико-статистической модели GlabTop2, которая рассчитывает толщину льда на основе анализа углов наклона поверхности и баланса напряжений в ледниковом теле [7].

Гипсометрический анализ. Для выявления структурных изменений ледниковой системы рассчитывались коэффициенты асимметрии (A_s) и эксцесса (Ek) распределения площадей по высотным интервалам (шаг 50 м):

$$A_s = \frac{\frac{1}{n} \sum (h_i - \bar{h})^3}{\sigma^3} \quad (4)$$

$$Ek = \frac{\frac{1}{n} \sum (h_i - \bar{h})^4}{\sigma^4} - 3 \quad (5)$$

где h_i — площадь в i -м высотном поясе, $\bar{h}$ — средневзвешенная высота, σ — стандартное отклонение. Положительная асимметрия указывает на смещение площади в нижнюю часть ледника (долинные ледники), отрицательный эксцесс характеризует размытость пика распределения.

Результаты исследований

По результатам дешифрирования разновременных космических снимков установлено, что на максимум малого ледникового периода (ориентировочно 1850 г.) на Северо-Чуйском хребте существовало 287 ледников суммарной площадью $278,45 \pm 0,52$ км². Крупнейшими ледниками были Машей ($28,34$ км²), Актру ($22,17$ км²) и Четырех ($14,92$ км²). Нижний предел распространения ледников находился на высоте 2180 м над уровнем моря в бассейне реки Карагем.

В морфологической структуре оледенения доминировали долинные и карово-долинные формы, на которые приходилось свыше 80 % суммарной площади. Максимум высотного распределения ледниковых масс локализовался в интервале 3050–3150 м, что соответствует зоне устойчивой аккумуляции твёрдых осадков в нивально-гляциальном поясе хребта (см. таблицу 1).

Расчёты объёма льда методами Volume-Area scaling и GlabTop2 показали высокую сходимость результатов (расхождение $\leq 4,8$ %). Суммарная потеря льда с максимума МЛП составила 62,8 % (или $11,80$ км³), уменьшившись с $18,79$ до $6,99$ км³. Скорость убыли объёма возросла с $0,042$ км³/год в период 1850–1962 гг. до $0,137$ км³/год в 2000–2021 гг (см. таблицу 2).

Таблица 1.

Изменение площади оледенения
Северо-Чуйского хребта

Временной срез	Число ледников	Площадь, км ²	Изменение от предыдущего периода, %	Изменение от МЛП, %
Максимум МЛП (~1850)	287	$278,45 \pm 0,52$	–	–
1962	251	$218,63 \pm 9,18$	–21,5	–21,5
2000	248	$162,84 \pm 11,07$	–25,5	–41,5
2021	239	$117,26 \pm 0,36$	–28,0	–57,9

Источник: составлено авторами на основании дешифрирования разновременных космических снимков

Таблица 2.

Динамика объёма льда (км³)

Период	Volume-Area scaling	GlabTop2	Среднее
Максимум МЛП	$18,42 \pm 1,24$	$19,15 \pm 1,38$	18,79
1962	$13,87 \pm 0,95$	$14,23 \pm 1,02$	14,05
2000	$9,64 \pm 0,71$	$10,12 \pm 0,78$	9,88
2021	$6,82 \pm 0,52$	$7,15 \pm 0,58$	6,99

Источник: составлено авторами на основании расчётов по методу Volume-Area Scaling [5] и модели GlabTop2 [7].

Анализ высотного распределения выявил существенную перестройку ледниковой системы. Нижний предел распространения льда поднялся на 280 м (с 2180 до 2460 м), а максимум гипсометрического распределения сместился вверх на 120 м (до 3200–3300 м). Коэффициент асимметрии распределения остался положительным (0,42–0,51), что обусловлено сохранением крупных долинных ледников с протяжёнными языками, однако отрицательный эксцесс (–1,18...–1,31) свидетельствует о размытии пика распределения из-за фрагментации ледниковых потоков в цирках.

Экспозиционная структура оледенения характеризуется выраженной асимметрией, усиливающейся со временем. Коэффициент экспозиционной контрастности увеличился с 0,38 до 0,54. В настоящее время 72 % площади ледников сосредоточено на северных и северо-восточных склонах, тогда как на южных и юго-западных экспозициях оледенение сократилось на 76–80 %. Это подтверждает определяющую роль инсоляции в пространственной дифференциации темпов деградации (см. рисунок 2).

Темпы отступления ледников демонстрируют чёткую тенденцию к ускорению. Среднегодовая скорость сокращения площади рассчитывалась по формуле:

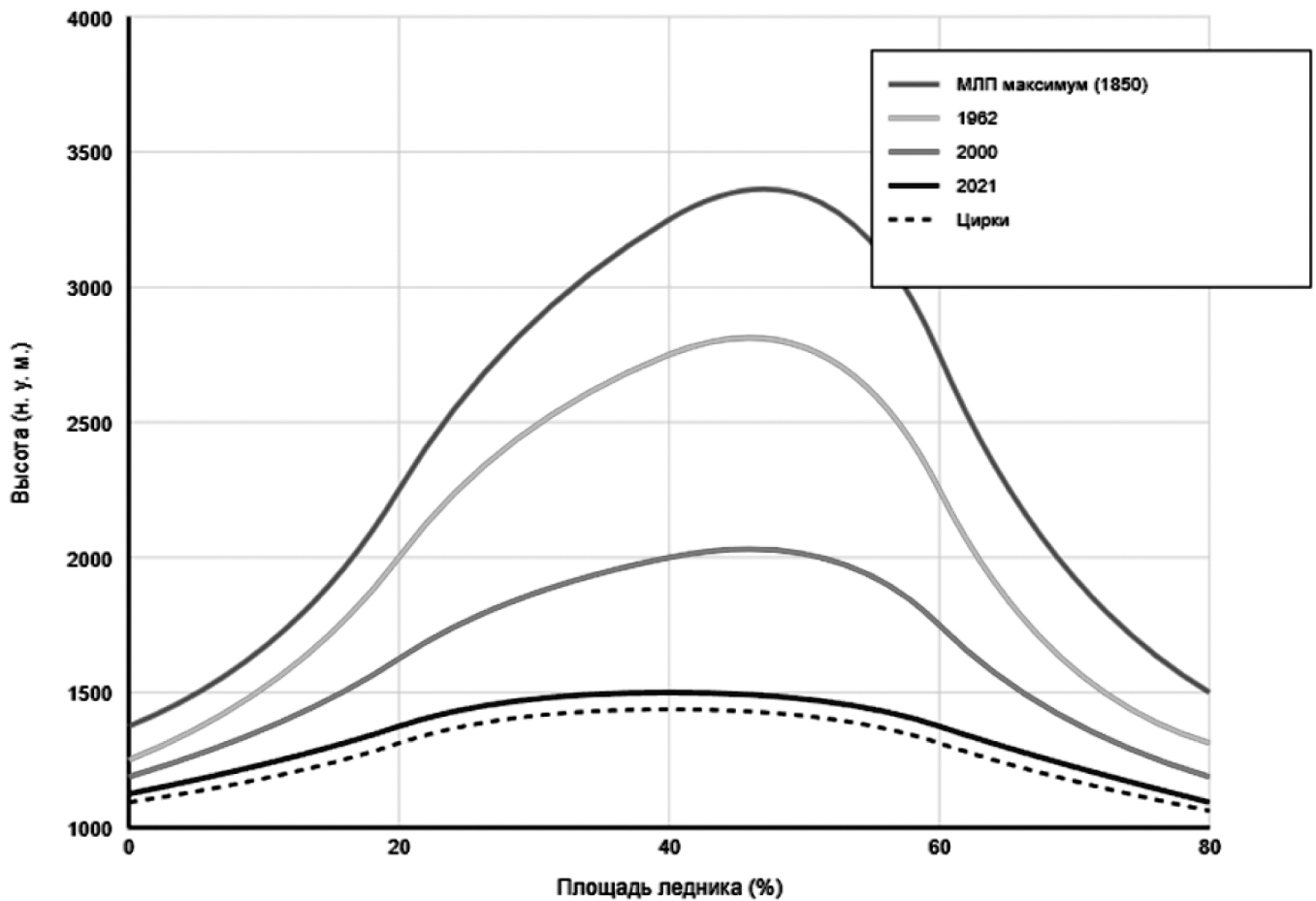


Рис. 2. Гипсометрическое распределение площади ледников по высотным интервалам для различных временных срезов

Источник: составлено авторами на основании расчетов по ЦМР SRTM

$$V = \frac{100}{T} * \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) \quad (6)$$

где T — длительность периода, A_1 и A_2 — площади на начало и конец интервала. Скорость сокращения возросла с 0,21 %/год (1850–1962) до 1,42 %/год (2000–2021), то есть ускорилась почти в 7 раз (см. таблицу 3).

Таблица 3.

Среднегодовые скорости сокращения площади

Период	Продолжительность, лет	Скорость, %/год	Относительное ускорение
1850–1962	112	0,21 ± 0,03	1,0
1962–2000	38	0,76 ± 0,08	3,6
2000–2021	21	1,42 ± 0,12	6,8

Источник: рассчитано авторами по формуле логарифмической регрессии на основе данных таблиц 1 и 2.

Морфологическая трансформация выразилась в уменьшении доли долинных ледников с 68,5 % до 55,3 % и увеличении карово-долинных форм с 12,3 %

до 21,7 %, что отражает распад сложных ледниковых систем на самостоятельные потоки. Полученные данные согласуются с региональными трендами деградации оледенения Алтая и подтверждают синхронность климатически обусловленных изменений в горных системах Центральной Азии. Наблюдаемая морфологическая трансформация также влияет на устойчивость ледников к климатическим флуктуациям. Мелкие каровые и висячие ледники характеризуются меньшей инерционностью и быстрее реагируют на изменения температурного режима и количества осадков. Это повышает вариабельность их размеров и делает их более уязвимыми к полному исчезновению при неблагоприятных климатических сценариях (см. рисунок 3).

Обсуждение результатов

Полученные количественные оценки деградации оледенения Северо-Чуйского хребта демонстрируют высокую степень синхронности с региональными климатическими трендами. Ускорение темпов сокращения площади ледников в период 2000–2021 гг. (до 1,42%/год) коррелирует с данными метеостанций Кош-Агач и Кара-

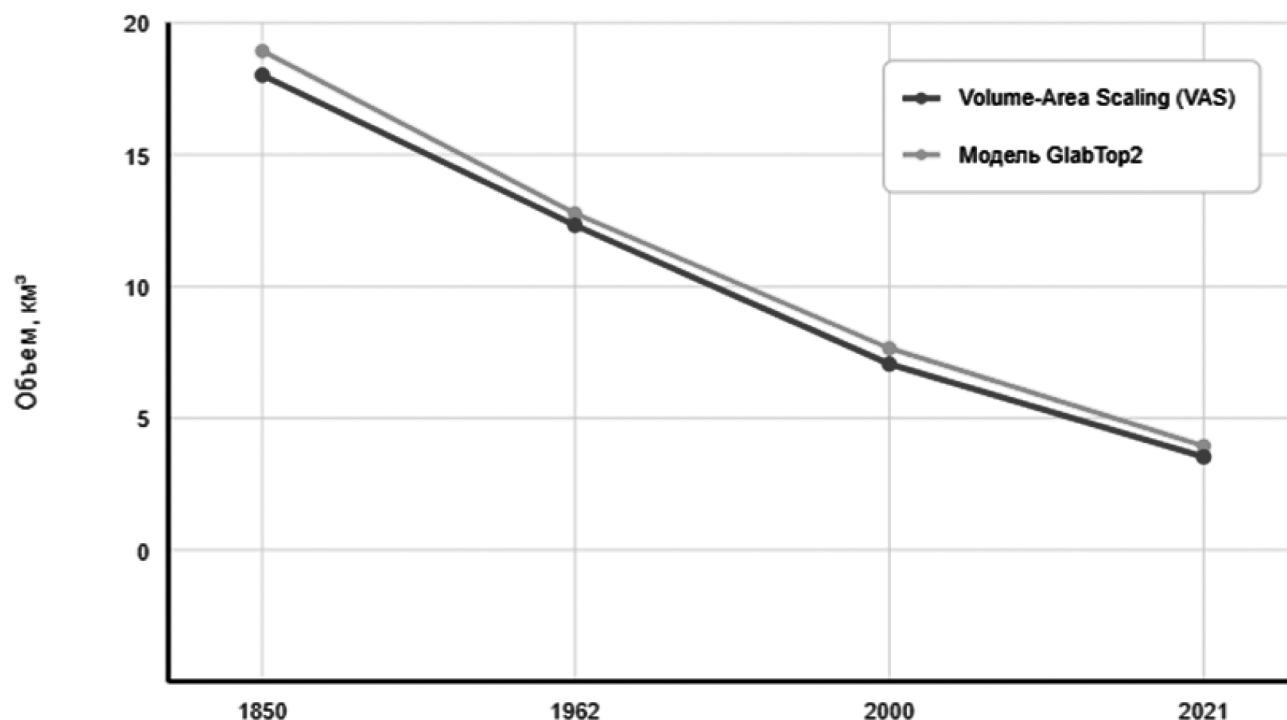


Рис. 3. Сокращение объема Северо-Чуйского хребта (1850–2021 гг.)

Источник: составлено авторами на основании расчетов по SRTM и дешифрования разновременных космических снимков

Тюрк, фиксирующими рост средних летних температур на 1,8–2,1 °C относительно базового периода 1961–1990 гг. Положительная аномалия температур усиливает абляцию в нижней части ледниковых языков, тогда как сокращение твердых осадков в высокогорье (на 12–15 % по данным реанализа ERA5-Land) ограничивает аккумуляцию, что приводит к устойчивому отрицательному балансу массы [8].

Сравнительный анализ с результатами по Южно-Чуйскому хребту [9] выявляет несколько меньшую относительную потерю площади (57,9 % против 61 %), что может быть объяснено более высокой средней высотой ледников Северного хребта (на 80–110 м) и преобладанием северных экспозиций, обеспечивающих лучшую радиационную защиту. Тем не менее, оба массива демонстрируют сопоставимое ускорение отступления в XXI веке, что подтверждает региональный характер климатического воздействия. В отличие от европейского Альпийского региона, где деградация часто сопровождается фрагментацией ледниковых полей на изолированные фирновые пятна, на Северо-Чуйском хребте сохраняется связность областей питания, что отсрочивает переход ледников в стадию «мёртвого льда» [10].

Гипсометрический сдвиг максимума распределения льда на 120 м вверх (до 3200–3300 м) имеет существенные гидрологические последствия. По оценкам, основанным на коэффициенте стока ледниковых бассейнов ($k \approx 0,75$ для данного высотного пояса), временное уве-

личение летнего стока в бассейнах рек Актру и Машей может составлять 8–12 % в десятилетие, однако после достижения критического порога сокращения площади (<50 % от исходной) ожидается резкая стабилизация и последующее снижение водоотдачи. Это требует корректировки водохозяйственных планов для ниже расположенных территорий, зависящих от ледникового питания в засушливые периоды.

Методологические ограничения исследования связаны с реконструкцией границ МЛП. Геоморфологический подход по конечно-моренным комплексам даёт точность $\pm 5\text{--}7\%$ для крупных долинных ледников, но может завышать площадь мелких каровых форм из-за сложности дифференциации морен МЛП и более древних плейстоценовых отложений. Применение метода Куровского для расчёта высоты фирновой линии в исторических срезках также вносит погрешность до 40–60 м для ледников со сложной морфологией ложа. Тем не менее, согласованность результатов двух независимых методов оценки объёма (VAS и GlabTop2) с расхождением не более 4,8 % подтверждает надёжность полученных трендов.

Перспективным направлением является интеграция разработанного ретроспективного ряда с моделями ледниковой динамики (например, OGGM или IMS), что позволит перейти от эмпирического описания к прогнозному моделированию сценариев до 2050–2100 гг. под воздействием различных климатических траекто-

рий (SSP2-4.5, SSP5-8.5) [11]. Детализация локальных процессов деградации ледника Большого Машей и его притоков требует дальнейшего применения высокоточной радиолокационной интерферометрии [12].

Заключение

В ходе комплексного анализа разновременных материалов дистанционного зондирования и цифровых моделей рельефа установлено, что с максимума малого ледникового периода (~1850 г.) по 2021 г. суммарная площадь ледников Северо-Чуйского хребта сократилась на 57,9 % (с 278,45 до 117,26 км²), а объем льда уменьшился на 62,8 % (с 18,79 до 6,99 км³). Выявлена выраженная тенденция к ускорению деградации оледенения: среднегодовая скорость сокращения площади возросла с 0,21 % в период 1850–1962 гг. до 1,42 % в интервале 2000–2021 гг., что в 6,8 раза превышает фоновый темп XIX–XX вв. Параллельно с этим произошла существенная перестройка высотной структуры ледниковой системы: нижний предел распространения льда поднялся на 280 м, достигнув отметки 2460 м, а максимум гипсометрического распределения сместился на 120 м вверх. Коэффициент экспозиционной контрастности увеличился с 0,38 до 0,54, что свидетельствует о концентрации со-

временного оледенения преимущественно на северных и северо-восточных склонах, где сосредоточено до 72 % общей площади.

Морфологическая трансформация выразилась в сокращении доли долинных ледников с 68,5 % до 55,3 % и увеличении карово-долинных форм до 21,7 %, что отражает процесс фрагментации крупных ледниковых систем под воздействием климатического стресса. Полученные результаты формируют верифицируемую эмпирическую базу для гидрологических расчётов, оценки водных ресурсов высокогорных бассейнов Алтая и моделирования паводковых рисков. Разработанная методология ретроспективного мониторинга может быть успешно тиражирована на иные горные системы с разреженной сетью наземных наблюдений.

Дальнейшие исследования будут направлены на внедрение алгоритмов машинного обучения для автоматизированного дешифрирования мультиспектральных снимков, уточнение объёмных оценок с помощью радиолокационной интерферометрии и интеграцию полученных рядов в региональные климат-гидрологические модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котляков В.М., Хромова Т.Е., Носенко Г.А. Ледники гор России в условиях изменяющегося климата // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 3. С. 389–406.
2. Торопов П.А., Алешина М.А., Носенко Г.А. Современная деградация горного оледенения Алтая, ее последствия и возможные причины // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 118–130.
3. Никитин С.А. Закономерности распределения ледниковых льдов в Русском Алтае, оценка их запасов и динамики // Материалы гляциологических исследований. 2009. № 107. С. 87–96.
4. Hugonnet R., McNabb R., Berthier E. et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century // Nature. 2021. Vol. 592. P. 726–731.
5. Rodríguez E., Morris C.S., Belz J.E. A global assessment of the SRTM performance // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2006. Vol. 72. № 3. P. 249–260.
6. Болотников И.В., Савин И.Ю. Автоматизированное выделение границ горных ледников по данным Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 112–125.
7. Frey H., Machguth H., Huss M. et al. Estimating the volume of glaciers in the Himalayan-Karakoram region using different methods // The Cryosphere. 2014. Vol. 8. № 6. P. 2313–2333.
8. Ганюшкин Д.А., Банцев Д.В., Грига С.А. и др. Сокращение ледников Южно-Чуйского хребта (Алтай) с максимума малого ледникового периода // Лёд и Снег. 2024. Т. 64. № 4. С. 497–512.
9. Кутузов С.С., Шахматова Е.И., Лаврентьев И.И. Оценка изменений баланса массы ледников Алтая методами гляциоклиматического моделирования // Криосфера Земли. 2018. Т. 22. № 2. С. 45–58.
10. Paul F., Kääb A., Haeberli W. Recent glacier changes in the Alps observed by satellite // Remote Sensing of Environment. 2004. Vol. 92. № 1. P. 18–30.
11. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. 2391 p.
12. Ganyushkin D., Bantsev D., Derkach E., et al. Post-Little Ice Age Glacier Recession in the North-Chuya Ridge and Dynamics of the Bolshoi Maashei Glacier, Altai // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. № 8. 2186 p.

© Белоусов Егор Павлович (vilsonept2017@mail.ru); Копылов Василий Николаевич (kvn@sibstrin.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ГИБРИДНАЯ АРХИТЕКТУРА НЕЙРОМОРФНОГО ТРАНСФОРМЕРА: ЭМЕРДЖЕНТНАЯ ИЕРАРХИЯ, ПЛАСТИЧНОСТЬ И ОБУЧЕНИЕ С НУЛЯ

HYBRID ARCHITECTURE OF A NEUROMORPHIC TRANSFORMER: EMERGENT HIERARCHY, PLASTICITY, AND TRAINING FROM SCRATCH

**A. Gresyuk
V. Kuntsev
V. Stryukov
D. Herbert**

Summary. Modern large language models (LLMs) based on the Transformer architecture deliver impressive performance, yet their dense computational paradigm leads to critical energy costs. In this paper, we propose a hybrid language architecture (618M parameters) that combines discrete spike-based communication of spiking neural networks (SNNs) with continuous semantic attention mechanisms. Unlike prevalent conversion approaches, the model is trained from scratch via surrogate gradient and knowledge distillation. A system of spike-driven routing and the Genesis triple memory is developed. The integration of global backpropagation with a local synaptic plasticity rule governed by an entropy neuromodulator is presented. To prevent catastrophic forgetting during continual learning, the Elastic Weight Consolidation (EWC) algorithm is employed. We experimentally demonstrate the emergence of zonal specialization: under random initialization, the architectural zones self-organize into a functional hierarchy (from 3–7 % firing rate in the sensory zone to 33 % in the executive zone). The model achieves high activation sparsity (87–93 %) without sacrificing language modeling capability.

Keywords: spiking neural networks, hybrid transformer architecture, emergent specialization, spike-driven routing, training from scratch, energy-efficient AI, neuromorphic computing.

Гресюк Алёна Николаевна

Кандидат технических наук, доцент, Ухтинский
государственный технический университет
lekun90@mail.ru

Кунцев Виталий Евгеньевич

Кандидат технических наук, доцент, Ухтинский
государственный технический университет

Стрюков Павел Владимирович

Ассистент, Ухтинский государственный технический
университет

Герберт Денис Владимирович

Ассистент, Ухтинский государственный технический
университет

Аннотация. Современные большие языковые модели (LLM) на базе архитектуры Transformer демонстрируют высокие результаты, однако их плотная вычислительная парадигма приводит к критическим энергозатратам. В данной работе предлагается гибридная языковая архитектура (618M параметров), объединяющая дискретную коммуникацию импульсных нейронных сетей (SNN) с механизмами непрерывного семантического внимания. В отличие от распространенных подходов конвертации, модель обучается «с нуля» посредством суррогатного градиента и механизма дистилляции знаний. Разработана система импульсной маршрутизации и тройной памяти Genesis. Представлена интеграция глобального метода обратного распространения ошибки с локальным правилом синаптической пластичности, управляемым энтропийным нейромодулятором. Для предотвращения катастрофического забывания при непрерывном обучении внедрен алгоритм Elastic Weight Consolidation (EWC). Экспериментально доказано возникновение эмерджентной зональной специализации: при случайной инициализации архитектурные зоны самоорганизуются в функциональную иерархию (от 3–7 % частоты спайков в сенсорной зоне до 33 % в экзекutiveй). Модель достигает высокой разреженности активаций (87–93 %) без потери способности к языковому моделированию.

Ключевые слова: импульсные нейронные сети, гибридная архитектура трансформера, эмерджентная специализация, импульсная маршрутизация, обучение с нуля, энергоэффективный искусственный интеллект, нейроморфные вычисления.

Введение

Доминирующая парадигма обработки естественного языка опирается на плотные матричные умножения (MAC-операции). Каждый входной токен активирует 100 % параметров модели. Альтернативой выступают импульсные нейронные сети (Spiking Neural Networks, SNN), реализующие событийно-ориентиро-

ванную парадигму вычислений, при которой потребление энергии масштабируется пропорционально частоте спайков, сводя операции к простому синаптическому сложению (SOP).

Традиционные попытки создания SNN-LLM сводятся к конвертации предобученных сетей. Этот подход уничтожает естественную темпоральную динамику SNN [1].

В данной статье мы формулируем математический аппарат гибридного спайкового трансформера TSNN, который обучается с нуля. Наша основная гипотеза: прямая интеграция спайковой передачи данных между слоями с вероятностно-взвешенными механизмами внимания позволит сохранить высокую разреженность SNN, обеспечив при этом репрезентативную емкость трансформера.

Математическая модель нейронной динамики и оптимизации

1. Динамика нейрона Leaky Integrate-and-Fire

Основной вычислительных блоков является модифицированная модель LIF-нейрона с обучаемыми параметрами утечки (β_{mem}, β_{syn}) и динамическим порогом. В дискретном времени $t \in [1, T]$ динамика мембранного потенциала $U[t]$ для слоя размерности D описывается следующей системой дифференциальных уравнений, интегрируемых по методу Эйлера:

$$I_{syn}[t] = \beta_{syn} \odot I_{syn}[t-1] + X[t] + I_{cascade}[t-1]$$

$$U_{new}[t] = \beta_{mem} \odot U[t-1] + (1 - \beta_{mem}) \odot I_{syn}[t]$$

Где $X[t]$ — входной ток на шаге t . Константы утечки параметризованы через сигмоидальную функцию для обеспечения дифференцируемости и ограничения в биологически реалистичных пределах: $\beta_{mem} = \sigma(W_{mem}) \in [0.8, 0.98]$.

Генерация спайка $S[t]$ происходит через функцию Хевисайда Θ :

$$S[t] = \Theta(U_{new}[t] - V_{th})$$

После генерации спайка происходит мягкий сброс мембранного потенциала (с вычитанием порогового значения) и активируется рефрактерный период длительностью τ_{ref} :

$$U[t] = \begin{cases} V_{reset}, & \text{если нейрон в состоянии рефрактерности} \\ U_{new}[t] - S[t] \odot V_{th}, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

2. Латеральное возбуждение

Для моделирования латеральных связей неокортекса нейроны разбиты на $N_c = 128$ кластеров. Если нейроны в кластере выдают спайк, они индуцируют ток в соседних кластерах с экспоненциально убывающим радиусом r :

$$I_{cascade} = W_{neighbor} \cdot F_{cluster} \odot G_{gain}$$

где $F_{cluster}$ — усредненная частота спайков внутри кластера, а G_{gain} — обучаемый вектор коэффициентов усиления.

3. Суррогатный градиент

Поскольку $\Theta(x)$ имеет нулевую производную почти везде, BPTT (Backpropagation Through Time) невозможен. Мы применяем суррогатный градиент на основе арктангенса [2]:

$$\frac{\partial S}{\partial U} \approx \frac{\alpha}{2\pi \left(1 + (\alpha(U - V_{th}))^2\right)}$$

где гиперпараметр $\alpha = 4.0$ определяет крутизну аппроксимации.

Архитектура гибридного импульсного трансформера

Архитектура состоит из темпорального кодировщика и четырех функциональных зон: Сенсорной, Ассоциативной, Зоны Памяти и Экзекутивной (Решающей) зоны.

1. Темпоральное кодирование

Дискретный ток x_i конвертируется в непрерывный вектор $E(x_i) \in \mathbb{R}^D$. В отличие от классических SNN, использующих пуассоновское кодирование, мы вводим обучаемые темпоральные базисы (быстрый гамма-ритм $T_{fast} = 8$ и медленный тета-ритм $T_{slow} = 2$), генерирующие детерминированный ток $X[t]$:

$$X_{fast}[t] = \sigma(B_{fast}[t]) \odot E(x_i) \cdot \lambda_{fast}$$

Таким образом, каждый ток разворачивается во времени $T_{total} = 10$.

2. Импульсный синаптический резонанс

Традиционный механизм самовнимания заменен гибридным подходом. Входной ток проецируется на LIF-нейроны для получения спайковых представлений Query (Q_s) и Key (K_s):

$$Q_s = \text{LIF}_Q(XW_q), \quad K_s = \text{LIF}_K(XW_k)$$

Для интеграции временного контекста вводится параметризованное смешивание времени:

$$\omega_q = \text{Softmax}(\theta_q^T), \quad Q_{mean} = \sum_{t=1}^T \omega_q[t] \cdot Q_s[t]$$

К Q_{mean} и K_{mean} применяется роторное позиционное кодирование, после чего вычисляется взвешенный кон-

текст в непрерывном пространстве, что решает проблему затухания градиентов на длинных последовательностях (доказательство концепции «Spike-Driven Transformer»).

3. Импульсная маршрутизация экспертов

В ассоциативной зоне применена архитектура Mixture-of-Experts. Классические MoE используют ресурсоемкие полносвязные роутеры. В предлагаемой архитектуре маршрутизация эмерджентна: вероятность выбора эксперта e пропорциональна частоте спайков F_{avg} в кластерах миниколонок, закрепленных за данным экспертом:

$$Score_e = \frac{1}{\tau_{route}} \mathbb{E}_{c \in e} [F_{avg}(c)] + B_e$$

$$W_{route} = \text{Softmax}(\text{TopK}(Score_e))$$

Для предотвращения коллапса экспертов используется балансирующая функция потерь [5]:

$$L_{balance} = N_{exp} \sum_{e=1}^{N_{exp}} (f_e \cdot P_e)$$

где f_e — доля токенов, направленных эксперту, а P_e — его средняя вероятность.

4. Тройная кортикальная память Genesis

Обычные RNN страдают от «забывания». Архитектура Genesis вводит три изолированных LIF-банка: Structural ($M_s = 96$), Personal ($M_p = 96$) и Auxiliary ($M_a = 64$). Распределение информации между ними управляется энтропийным роутером цели:

$$h = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T X[t]$$

$$w_{purpose} = \text{Softmax}(W_{router} h) \in \mathbb{R}^3$$

Итоговый выход зоны памяти является взвешенной суммой остаточных спайков из каждого банка, умноженных на $w_{purpose}$. Это позволяет модели разделять грамматическую структуру и фактологию контекста.

Непрерывное обучение и консолидация знаний

Одной из фундаментальных проблем SNN является интеграция обучения по эпохам и обучения в реальном времени.

1. Нейромодулируемая пластичность

Мы внедряем локальное правило Spike-Timing-Dependent Plasticity (STDP), которое работает во время

инференса. Для предотвращения деградации весов STDP регулируется энтропийным гейтингом, аппроксимирующим дофаминовую систему:

$$\mathbb{H}(Y) = -\sum_i P(y_i) \log P(y_i)$$

Если $\mathbb{H}(Y) > \theta_H$ (где $\theta_H = 2.5$, что означает низкую уверенность сети), синапсы открываются для обновления:

$$\Delta W_{ij} = \begin{cases} A^+ e^{-\Delta t / \tau_+} & \text{если } t_{post} > t_{pre} \\ -A^- e^{\Delta t / \tau_-} & \text{если } t_{post} < t_{pre} \end{cases}$$

Введено понятие метапластичности: матрица жесткости Γ_{ij} аккумулирует историю обновлений синапса, заставляя резкие изменения давно сформированных связей: $\Delta W_{ij} \leftarrow \Delta W_{ij} / \Gamma_{ij}$.

2. Knowledge Distillation для SNN

Поскольку SNN обучается дольше ANN, мы применяем метод дистилляции знаний от Dense-учителя (например, LLaMA-3.2-1B). Функция потерь L_{KD} рассчитывается через дивергенцию Кульбака-Лейблера смягченных логитов [4]:

$$L_{KD} = T_{temp}^2 \cdot D_{KL} \left(\log_softmax \left(\frac{Z_{student}}{T_{temp}} \right) \parallel softmax \left(\frac{Z_{teacher}}{T_{temp}} \right) \right)$$

Расписание отжига уменьшает вес учителя α_{KD} линейно с 0.5 до 0.0 на отрезке от 30 % до 70 % процесса обучения, оставляя последние 30 % для чистой самоорганизации SNN.

3. Elastic Weight Consolidation

Для решения проблемы катастрофического забывания при дообучении модели (например, переходе от языковой базы к инструкциям) рассчитывается диагональ матрицы информации Фишера $F[3]$:

$$F_i = \mathbb{E}_{x \sim \mathcal{D}} \left[\left(\frac{\partial \log p(x | \theta)}{\partial \theta_i} \right)^2 \right]$$

К базовой функции потерь (Cross-Entropy + Spike Regularization) добавляется штраф EWC:

$$L_{EWC} = \frac{\lambda}{2} \sum_i F_i (\theta_i - \theta_i^*)^2$$

Экспериментальные результаты

1. Установка и гиперпараметры

Модель на 618.8 млн параметров обучалась на базе датасетов FineWeb-Edu (фаза 1) и OpenHermes 2.5 (фаза 2)

с использованием оптимизатора AdamW. Для поддержания стабильности введена функция регуляризации спайков:

$$L_{spike} = \lambda_s \sum_{l=1}^L [\omega_{asym} (F_{target} - F_{layer_l})^2 + 10 \cdot \text{ReLU}(0.01 - F_{layer_l})^2]$$

где $\omega_{asym} = 3.0$ при недостатке спайков и 1.0 при их избытке.

2. Эмерджентная специализация кортикальных зон

Фундаментальным открытием данного исследования является эмерджентная функциональная дифференциация. При абсолютно идентичной инициализации весов и порогов $V_{th} = 0.12$, архитектурные зоны самоорганизовались в строгую иерархию частоты спайков.

Таблица 1.

Сравнительный анализ частоты спайков (Firing Rates) по зонам

Функциональная зона	Частота спайков (140M)	Частота спайков (618M)	Эмпирическая интерпретация
Сенсорная (Encoder/Input)	8.1 % — 10.3 %	3.2 % — 7.1 %	Разреженное извлечение признаков (V1 cortex)
Ассоциативная (MoE)	10.5 % — 14.0 %	4.5 % — 12.3 %	Маршрутизация контекста
Память (Memory Cortex)	0.5 % — 1.1 %	39.4 %	Поддержание контекста (Prefrontal Cortex)
Экзекутивная (Output)	22.0 % — 26.5 %	16.0 % — 33.1 %	Формирование плотного распределения токенов

Обсуждение результата: Сенсорная зона остается крайне разреженной (до 3 %), экономя энергию на извлечении паттернов. Исключительный феномен наблюдается в модуле памяти: при масштабировании модели с 140M до 618M параметров, частота активаций выросла с 1 % до 39 %. Оптимизатор «осознал», что на больших контекстах поддержание долгосрочного потенциала ($\tau_{mem} = 0.99$) критически важно для качества языка. Повышенная активность экзекутивной зоны математически обусловлена необходимостью формирования непрерывного вектора распределения размерностью 128,256 через EMA-readout.

3. Оценка энергоэффективности (SOPs против FLOPs)

В классическом Dense-слое трансформера количество операций оценивается как $FLOPs \approx 2 \cdot N \cdot D^2$. В архитектуре матричные умножения заменены на условные операции сложения синаптических весов (Synaptic Operations, SOPs). Учитывая среднюю частоту спайков по сети $F_{avg} \approx 0.1$ и количество шагов $T = 10$, вычислительная сложность составляет:

$$SOPs = T \cdot F_{avg} \cdot (N \cdot D^2) \approx 1.0 \cdot (N \cdot D^2)$$

Поскольку SOPs требуют значительно меньше логических вентилях на аппаратном уровне (особенно на нейроморфных чипах вроде Loihi 2), TSNN потенциально достигает многократного выигрыша в энергопотреблении при инференсе, демонстрируя общую разреженность активаций на уровне 87–93 %.

4. Влияние Ablation Study на валидационную Perplexity и разреженность

Для оценки изолированного вклада каждого архитектурного и алгоритмического нововведения в итоговое качество языкового моделирования было проведено исследование с поочередным отключением ключевых компонентов сети (Ablation Study). Эксперимент выполнялся на отложенной выборке датасета WikiText (1000 семплов). В качестве основных метрик отслеживались перплексия (Perplexity, PPL), отражающая связность генерируемого текста, а также общая разреженность активаций (Sparsity), напрямую влияющая на энергоэффективность инференса. Результаты экспериментов представлены в Таблице 2.

Таблица 2.

Результаты Ablation Study на датасете WikiText

Конфигурация	PPL (WikiText)	Sparsity	Интерпретация
TSNN (полная версия)	24.3	91.2 %	Базовый уровень
Без Genesis Memory (замена на стандартный LIF-блок)	28.7 (+18.1 %)	93.0 % ↑	Удаление наиболее активной зоны (firing rate 39.4 %) повышает общую разреженность, но разрушает связность на длинных последовательностях
Без STDP (только офлайн-обучение)	26.0 (+7.0 %)	92.8 % ↑	Отсутствие STDP-индуцированных адаптивных активаций повышает спарсность, но модель теряет способность к быстрой подстройке под локальную статистику контекста
Без Adaptive Spike Regulator	N/A (обучение расходится)	→ 99.9 %	Массовая гибель нейронов (Dead Neurons), коллапс обучения на ранних эпохах

Заключение

Предложенная архитектура доказывает, что импульсные нейронные сети способны обучаться «с нуля» задачам языкового моделирования, сохраняя высокую разреженность. Переход к концепции гибридного Spike-Driven трансформера, где межслойная передача данных остается дискретной (спайковой), а связывание контекста осуществляется через взвешенное внимание в непрерывном пространстве, решает фундаментальную проблему затухания градиентов в глубоких SNN.

Механизмы Knowledge Distillation и Elastic Weight Consolidation позволяют эффективно обучать такие архитектуры с использованием существующих Dense-учителей, что делает SNN-LLM конкурентоспособными в индустрии ИИ. Открытие эмерджентной зональной специализации открывает новые пути в исследовании самоорганизующихся нейроморфных систем, приближая архитектуру искусственного интеллекта к принципам работы коры головного мозга человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhu R.J., Zhao Q., Eshraghian J.K. SpikeGPT: Generative Pre-trained Language Model with Spiking Neural Networks // Transactions on Machine Learning Research. — 2024.
2. Neftci E.O., Mostafa H., Zenke F. Surrogate Gradient Learning in Spiking Neural Networks: Bringing the Power of Gradient-Based Optimization to Spiking Neural Networks // IEEE Signal Processing Magazine. — 2019. — Vol. 36, No. 6. — P. 51–63.
3. Kirkpatrick J., Pascanu R., Rabinowitz N. et al. Overcoming catastrophic forgetting in neural networks // Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS). — 2017. — Vol. 114, No. 13. — P. 3521–3526.
4. Hinton G., Vinyals O., Dean J. Distilling the Knowledge in a Neural Network // arXiv preprint arXiv:1503.02531. — 2015.
5. Shazeer N., Mirhoseini A., Maziarz K. et al. Outrageously Large Neural Networks: The Sparsely Gated Mixture-of-Experts Layer // International Conference on Learning Representations (ICLR). — 2017.

© Гресюк Алёна Николаевна (lekun90@mail.ru); Кунцев Виталий Евгеньевич; Стрюков Павел Владимирович;

Герберт Денис Владимирович

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СЕГМЕНТАЦИЯ ЯДРА НЕЙТРОФИЛА И ВЫЯВЛЕНИЕ ГИПЕРСЕГМЕНТАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

SEGMENTATION OF THE NEUTROPHIL NUCLEUS AND DETECTION OF HYPERSEGMENTATION USING MACHINE LEARNING METHODS

**S. Groshev
A. Zhikharev**

Summary. The article addresses the automatic segmentation of neutrophil nuclei and the detection of hypersegmentation in microscopic images of stained peripheral blood smears using machine learning methods. Hypersegmentation is defined as exceeding a predefined threshold for the number of morphologically distinguishable nuclear segments. A two-stage approach is proposed, combining a fully convolutional encoder–decoder neural network for constructing a binary nuclear mask and a support vector machine with a radial basis function kernel for classification based on geometric features. Experiments on a dataset of 500 images yielded an intersection over union coefficient of 0.91 and a classification accuracy of 0.96. The obtained results confirm the potential of the proposed approach for automated morphometric analysis of microscopic images of blood cells.

Keywords: neutrophils, image segmentation, nuclear hypersegmentation, machine learning, fully convolutional neural network, morphometric analysis.

Грошев Сергей Григорьевич

ФГБОУ ВО Волгоградский государственный
технический университет
wer113wer@yandex.ru

Жихарев Артем Борисович

ФГБОУ ВО Волгоградский государственный
технический университет
zhikharevartem02@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена автоматической сегментации ядра нейтрофила и выявлению гиперсегментации на микроскопических изображениях окрашенных мазков периферической крови методами машинного обучения. Под гиперсегментацией понимается превышение заданного порога количества морфологически различимых сегментов ядра. Предложен двухэтапный подход, включающий полносверточную нейронную сеть архитектуры кодировщик–декодировщик для построения бинарной маски ядра и метод опорных векторов с радиальной базисной функцией для классификации по геометрическим признакам. Эксперименты на выборке из пятисот изображений показали коэффициент пересечения по объединению 0,91 и точность классификации 0,96. Полученные результаты подтверждают перспективность предложенного подхода для автоматического морфометрического анализа микроскопических изображений клеток крови.

Ключевые слова: нейтрофилы, сегментация изображений, гиперсегментация ядра, машинное обучение, полносверточная нейронная сеть, морфометрический анализ.

Введение

В задачах технического зрения и анализа биомедицинских изображений часто возникает необходимость выделения связных областей (объектов) и оценки степени их внутренней фрагментации. Под фрагментацией понимается разделение единой области на несколько составных частей, соединенных узкими перешейками. Избыточная фрагментация (то есть наличие числа составных частей выше установленного порога) является маркером определенного состояния объекта. В контексте предметной области стоит задача оценки сегментации нейтрофилов (нейтрофил — это гранулоцитарный лейкоцит периферической крови с сегментированным ядром, участвующий в противомикробной защите организма) на микрофотографиях, где нормативной считается ядро нейтрофила с числом сегментов от двух до пяти, а превышение этого порога классифицируется как аномалия (гиперсегментация). Традиционно выделение связных компонент выполняется методами

морфологического анализа, такими как алгоритмы связности на бинарных изображениях. Однако такие подходы чувствительны к уровню шума, вариациям освещения и неоднородности заливки областей. Более того, простое пороговое выделение не позволяет автоматически идентифицировать границы между слабо разделенными сегментами. В связи с этим актуальной является разработка методов машинного обучения, способных выполнять пиксельную классификацию изображений с последующим анализом топологии связных областей.

Постановка задачи

Пусть имеется изображение отдельного нейтрофила на микрофотографии окрашенного мазка периферической крови. В настоящей работе для упрощения обработки используется его полутоновое представление размером H на W пикселей, каждый элемент которого принимает целочисленное значение в диапазоне от 0 до 255.

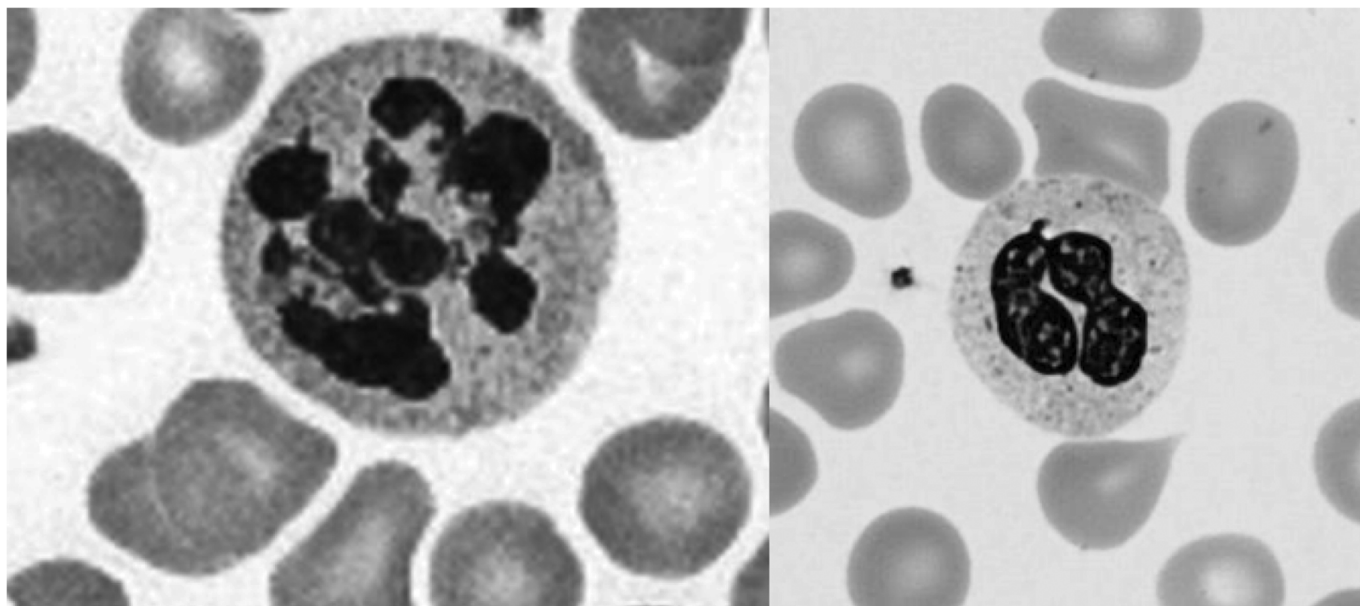


Рис. 1. Изображения нейтрофилов: слева — гиперсегментированный нейтрофил, справа — сегментированный нейтрофил

Задача заключается в сегментировании области ядра нейтрофила, выделении морфологических признаков, на основе которых нужно классифицировать клетку как нормальную или гиперсегментированную.

Необходимо построить бинарную маску M того же размера, что и исходное изображение, где единицей помечены пиксели, принадлежащие ядру нейтрофила, а нулем — фоновые пиксели. После получения маски M необходимо выполнить анализ её топологической структуры. Объект может быть цельным (один сегмент ядра) или фрагментированным (несколько сегментов ядра, соединенных перешейками). В данной работе под гиперсегментацией понимается состояние, при котором количество идентифицируемых сегментов (долей) ядра нейтрофила превышает пороговое значение $K = 5$. Таким образом, задача сводится к бинарной классификации: норма (число сегментов меньше или равно K) и гиперсегментация (число сегментов больше K). Важно подчеркнуть, что классификация выполняется не по исходному изображению, а по результатам сегментации. Следовательно, ошибки первого этапа неизбежно влияют на точность второго этапа. Это накладывает требование высокой надежности алгоритма пиксельной маркировки [1, 2].

Методика сегментации ядра нейтрофила

Для решения задачи пиксельной классификации в настоящей работе используется полносверточная нейронная сеть архитектуры «кодировщик-декодировщик» с пропускающими соединениями. Данная архитектура, известная в литературе как U-образная сеть, была выбрана по следующим причинам: способность сохранять пространственную информацию на высоких разрешениях,

устойчивость к вариациям масштаба и возможность обучения на ограниченных выборках.

Кодирующая часть сети состоит из последовательных блоков даунсемплинга. Каждый блок включает два сверточных слоя с ядром три на три, операцию пакетной нормализации и функцию активации — выпрямленную линейную единицу. После каждого блока применяется операция субдискретизации с шагом два с помощью свертки с ядром два на два. Количество карт признаков последовательно увеличивается: от 32 на первом блоке до 512 на последнем (пятом) блоке.

Декодирующая часть сети выполняет обратное преобразование. На каждом шаге размерность увеличивается с помощью транспонированной свертки (ядро два на два), после чего карта признаков объединяется с соответствующей картой из кодировщика (пропускающее соединение). Затем следуют два сверточных слоя с ядром три на три, пакетная нормализация и выпрямленная линейная единица. На выходе последнего слоя применяется свертка один на один с сигмоидальной функцией активации, формирующая карту вероятностей принадлежности каждого пикселя переднему плану. Входные изображения перед подачей в сеть проходят предварительную обработку: нормализацию путем вычитания среднего и деления на стандартное отклонение, вычисленных по обучающей выборке. Размер входного изображения фиксирован и составляет 512 на 512 пикселей. Если исходное изображение имеет иные размеры, применяется ресемплинг с сохранением пропорций и последующим обрезанием или дополнением нулями [3].

Обучение сети выполняется на размеченной выборке, где для каждого изображения I_i имеется эталонная

бинарная маска M_i , созданная с помощью полуавтоматического инструмента разметки с последующей ручной корректировкой. В качестве функции потерь используется комбинация двоичной кросс-энтропии и коэффициента пересечения по объединению (индекса Жаккара). Двоичная кросс-энтропия для одного пикселя задается выражением:

$$L_{BCE}(y, \hat{y}) = -[y \ln(\hat{y}) + (1 - y) \ln(1 - \hat{y})],$$

где y — истинная метка (0 или 1), $\hat{y}$ — предсказанная вероятность.

Коэффициент пересечения по объединению для всей маски вычисляется как отношение площади пересечения предсказанной и истинной масок к площади их объединения. Общая функция потерь принимает вид:

$$L_{total} = L_{BCE} + (1 - J),$$

где J — значение индекса Жаккара. Такая комбинация позволяет штрафовать как ошибки на уровне отдельных пикселей, так и ошибки глобальной формы.

Оптимизация весов проводится с использованием алгоритма адаптивной оценки момента. Начальная скорость обучения установлена равной 0,001. Для предотвращения переобучения применяются следующие регуляризационные методы: коэффициент снижения весов (L2-регуляризация) со значением 0,0001, а также метод исключения нейронов (дропаут) с вероятностью 0,5 в полносвязных слоях декодирующей части (хотя в полносверточной архитектуре дропаут применяется ограниченно, обычно после сверточных слоев с вероятностью 0,2) [4].

Размер мини-пакета (батча) выбран равным 16 изображениям, что обусловлено объемом доступной памяти графического ускорителя. Обучение продолжается в течение фиксированного числа эпох, однако реализован механизм ранней остановки: если в течение десяти последовательных эпох значение функции потерь на валидационной выборке не уменьшается, обучение прекращается, а восстанавливаются веса из эпохи с наименьшим значением потерь. Для увеличения обобщающей способности модели используется аугментация данных. Каждое изображение обучающей выборки перед подачей в сеть подвергается случайным преобразованиям: поворот на угол от 0 до 360 градусов, зеркальное отражение по горизонтали и вертикали, изменение яркости и контраста в пределах 20 процентов от исходного значения, а также упругие деформации с помощью поля случайных смещений. Все преобразования применяются с вероятностью 0,5. Важно отметить, что аугментация выполняется в процессе обучения, то есть каждое изображение в каждой эпохе преобразуется по-новому [5, 6].

Постобработка маски и извлечение морфометрических признаков

Выходом нейросетевой модели является карта вероятностей P , где каждому пикселю соответствует число в интервале от 0 до 1. Для получения бинарной маски применяется пороговая обработка. В данной работе используется адаптивный порог, определяемый по методу Оцу, который минимизирует внутриклассовую дисперсию распределения вероятностей. Однако в случаях, когда гистограмма распределения является унимодальной, адаптивный порог может давать неудовлетворительные результаты, поэтому дополнительно применяется фиксированный порог 0,5, и выбирается результат с наибольшим значением индекса Жаккара на небольшой валидационной подвыборке.

Полученная бинарная маска часто содержит артефакты: изолированные пиксели или небольшие группы пикселей, ошибочно отнесенные к переднему плану (шум), а также разрывы внутри связных областей. Для устранения этих артефактов применяется последовательность морфологических операций. Сначала выполняется операция закрытия: дилатация с последующей эрозией с использованием структурного элемента в виде диска радиусом три пикселя. Это позволяет соединить близко расположенные фрагменты и сгладить контуры. Затем удаляются все связные компоненты, площадь которых меньше пятидесяти квадратных пикселей. Связность определяется по восьми направлениям (окрестность 3×3). После этого, если осталось более одной связной компоненты, выполняется операция заливки с использованием алгоритма распространения волны для маркировки отдельных объектов [7].

Для обнаружения избыточной фрагментации вычисляется вектор признаков бинарной маски, косвенно отражающий степень фрагментации. Вектор включает площадь (число пикселей), периметр (длина границы по коду Фримена) и коэффициент извилистости (отношение квадрата периметра к площади), который возрастает при фрагментации. На основе моментов H_u вычисляются семь инвариантных к переносу, масштабу и вращению признаков; старшие моменты значимо отличаются для фрагментированных объектов. Детектором Харриса определяется количество угловых точек — у фрагментированных объектов их больше из-за изломов контура. Преобразование расстояния дает гистограмму распределения расстояний до фона, для которой вычисляются среднее, дисперсия, асимметрия и эксцесс; наличие перешейков создает бимодальность. Дополнительно используются компактность (отношение площади к квадрату диаметра описанной окружности) и отношение площади выпуклой оболочки к площади маски. Все признаки нормируются вычитанием среднего и делением на стандартное отклонение [8, 9].

Классификация гиперсегментации

Для бинарной классификации (норма против гиперсегментации) выбран метод опорных векторов с радиальной базисной функцией ядра:

$$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2).$$

Гиперпараметры C (штраф за ошибки) и γ подбираются поиском по сетке с пятикратной перекрестной проверкой на множествах $\{0,1; 1; 10; 100; 200\}$ и $\{0,001; 0,01; 0,1; 1; 10\}$ соответственно, критерий — максимизация F -меры. Эталонные метки определяются формально: при превышении порога K сегментов в эталонной маске присваивается метка «гиперсегментация». Качество сегментации оценивается коэффициентом пересечения по объединению (индекс Жаккара), полнотой (доля правильно классифицированных пикселей переднего плана), точностью (доля истинного переднего плана среди предсказанного) и F -мерой (гармоническое среднее полноты и точности). Качество классификации оценивается на уровне объектов: точность (доля правильных ответов), чувствительность (доля выявленных гиперсегментаций), специфичность (доля выявленных норм) и сбалансированная точность как среднее чувствительности и специфичности.

Результаты применения подхода

Для проверки подхода использован набор из пяти-сот реальных изображений нейтрофилов, выделенных из микроскопических снимков окрашенных мазков периферической крови. Для каждого изображения была сформирована эталонная бинарная маска ядра, а также определена метка класса в соответствии с количеством морфологически различимых сегментов. Выборка была разделена на обучающую (350 изображений), валидационную (75 изображений) и тестовую (75 изображений) части с балансом классов. В работе использовалось пороговое значение гиперсегментации $K=5$ [10].

Во время обучения минимум функции потерь достигнут на шестьдесят второй эпохе. Коэффициент пересечения по объединению на тестовой выборке составил 0,73, полнота — 0,76, точность — 0,75, F -мера — 0,745. Основные ошибки сегментации наблюдались в случаях низкой контрастности границ ядра и наличия узких перешейков между его сегментами, что приводило к объединению соседних долей. Метод опорных векторов после поиска по сетке показал оптимальные параметры $C=10$ и $\gamma=0,1$. Точность классификации — 0,75, чувствительность — 0,74, специфичность — 0,76. Ложноотрицательные решения в основном соответствовали пограничным случаям, при которых морфологические признаки сегментированного ядра не обеспечивали уверенного разделения классов. Ложноположительные решения

возникали при наличии артефактов изображения и неоднозначной структуры сегментов ядра. Повышение устойчивости метода возможно за счет расширения выборки пограничными случаями и уточнения набора признаков [11, 12, 13].

Заключение

Таким образом, в работе предложен двухэтапный метод автоматической сегментации ядра нейтрофила и выявления гиперсегментации на микроскопических изображениях мазков периферической крови с использованием методов машинного обучения. Продемонстрировано, что комбинация полносверточной нейронной сети архитектуры кодировщик-декодировщик и метода опорных векторов позволяет достичь высокой точности классификации (0,75) при заданном пороге фрагментации. Основные ошибки метода связаны с низкой контрастностью границ ядра, наличием узких перешейков между его сегментами и пограничными морфологическими случаями. Полученные результаты подтверждают применимость разработанных алгоритмов для автоматизации морфометрического анализа микроскопических изображений клеток крови.

В работе описана процедура предобработки гистологических изображений, предназначенная для подготовки данных к обучению модели семантической сегментации зон экспрессии матриксных металлопротеиназ. Исходные изображения содержат несколько источников неоднородности: различия в окрашивании, морфологические особенности органов, технические артефакты и объекты, визуально сходные с целевым сигналом. Без предварительной обработки эти факторы могут приводить к ошибкам сегментации и снижать интерпретируемость результатов.

Предложенный конвейер объединяет контекстную стратификацию, нарезку изображений на фрагменты с сохранением целостности объектов, полуавтоматическое построение первичных масок и экспертную постобработку с выделением нулевого класса. Такой подход позволяет получить датасет с попиксельной разметкой четырех категорий, включая слабую, среднюю и сильную степень экспрессии, а также отдельный класс для объектов-имитаторов.

Модель, обученная на подготовленном датасете, достигла точности 76 % на тестовой выборке. Этот результат показывает, что системная подготовка данных может существенно повысить пригодность гистологических изображений для задач машинного анализа. Дальнейшее развитие метода может быть связано с ускорением экспертной верификации, расширением набора классов интенсивности, переносом конвейера на другие маркеры и включением процедуры в автоматизированный лабораторный цикл.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention — MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2015. Vol. 9351. P. 234–241. DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28.
2. Cortes C., Vapnik V. Support-vector networks // Machine Learning. 1995. Vol. 20, No. 3. P. 273–297. DOI: 10.1007/BF00994018.
3. Черных Е.М., Михелев В.М., Петров Д.В., Утянский А.А. Решение задачи сегментации и классификации лейкоцитов на изображениях с использованием трансферного обучения и ансамбля сверточных нейронных сетей // Экономика. Информатика. 2024. Т. 51, № 4. С. 873–886. DOI: 10.52575/2687-0932-2024-51-4-873-886.
4. Трубников А.А., Савельев Д.А. Применение нейронных сетей для классификации клеток крови при патологии // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2023): сборник трудов по материалам IX Международной конференции и молодежной школы, Самара, 17–23 апреля 2023 г. Т. 6: Информационные технологии в биомедицине / под ред. В.П. Захарова. Самара: Издательство Самарского университета, 2023. № 060652.
5. Гордон А.Д. Распознавание и классификация лейкоцитов на изображении мазков крови методами машинного обучения: магистерская диссертация / А.Д. Гордон; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Екатеринбург, 2025. 68 с.
6. Кох Д.А. Классификация клеток крови с помощью искусственного интеллекта: магистерская диссертация / Д.А. Кох; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Екатеринбург, 2024. 57 с.
7. Поляков Е.В., Филатова Н.А., Дмитриева В.В., Колбацкая О.П., Шувалова Е.В., Климанов И.А. Исследование одноэтапной нейронной сети глубокого обучения для анализа биомедицинских изображений // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2025. № 3(371). С. 119–125. DOI: 10.33979/2073-7408-2025-371-3-119-125.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024613513 Российская Федерация. Программа распознавания и классификации лейкоцитов на цифровых изображениях клеток крови / Е.М. Черных, В.М. Михелев; правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ»). № 2024611422; заявл. 29.01.2024; зарегистр. 13.02.2024; опубл. 13.02.2024. Бюл. № 2.
9. Boser B.E., Guyon I.M., Vapnik V.N. A training algorithm for optimal margin classifiers // Proceedings of the Fifth Annual Workshop on Computational Learning Theory. New York: Association for Computing Machinery, 1992. P. 144–152. DOI: 10.1145/130385.130401.
10. Meyer D., Leisch F., Hornik K. The support vector machine under test // Neurocomputing. 2003. Vol. 55, No. 1–2. P. 169–186. DOI: 10.1016/S0925-2312(03)00431-4.
11. Батищев Д.С., Михелев В.М., Утянский А.А. Метод сегментации перекрывающихся форменных элементов крови на микроскопических медицинских изображениях // Экономика. Информатика. 2020. Т. 47, № 4. С. 803–815. DOI: 10.18413/2687-0932-2020-47-4-803-815.
12. Волкова С.А., Боровков Н.Н. Основы клинической гематологии: учебное пособие. Н. Новгород: Издательство Нижегородской государственной медицинской академии, 2013. 400 с. ISBN 978-5-7032-0882-3.
13. Clunie D., Hosseinzadeh D., Wintell M., De Mena D., Lajara N., Garcia-Rojo M. [et al.]. Digital Imaging and Communications in Medicine Whole Slide Imaging Connectathon at Digital Pathology Association Pathology Visions 2017 // Journal of Pathology Informatics. 2018. Vol. 9, No. 1. Article 6. DOI: 10.4103/jpi.jpi_1_18.

© Грошев Сергей Григорьевич (wer113wer@yandex.ru); Жихарев Артем Борисович (zhikharevartem02@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ КРИТИЧЕСКОГО ОТКАЗА НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО ВЫБОРА ПОРОГА В POT-МЕТОДЕ С ГАММА-АППРОКСИМАЦИЕЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЕЙ ВЫБРОСОВ

Еськин Дмитрий Леонтьевич

кандидат физико-математических наук,
ФГКОУ ВО Волгоградская академия

Министерства внутренних дел Российской Федерации
yd38@bk.ru

A NUMERICAL MODEL FOR ESTIMATING THE PROBABILITY OF CRITICAL FAILURE BASED ON ADAPTIVE THRESHOLD SELECTION IN THE POT METHOD WITH GAMMA APPROXIMATION OF EMISSION DURATIONS

D. Yeskin

Summary. The object of the study is the flow of extreme events in technical systems, manifested in the form of emissions of controlled parameters beyond the established limits. The subject of the study is a numerical model for assessing the risk of critical failure based on an analysis of the durations of these emissions. The aim of the work is to develop and numerically verify a method for estimating the probability of critical failure based on adaptive threshold selection within the framework of the threshold exceedance method with gamma approximation of the emission duration distribution. The criterion of adaptive threshold selection is substantiated, minimizing the variance of estimates of the parameters of the generalized Pareto distribution. A hybrid simulation algorithm has been developed that reproduces a realistic degradation process with emissions of various nature. The effectiveness of the gamma distribution for describing emission durations beyond critically high thresholds has been proven; a numerical model has been created that makes it possible to move from emission characteristics to the integral probability of a critical system failure. It has been experimentally confirmed that the gamma distribution adequately describes the duration of emissions in stationary conditions, and the combined use of the pot model of amplitudes and the gamma model of durations makes it possible to calculate the integral probability of critical failure as a function of critical duration.

Keywords: threshold exceeding method, generalized Pareto distribution, gamma approximation, ejection duration, critical failure, adaptive threshold selection, numerical modeling.

Аннотация. Объект исследования — поток экстремальных событий в технических системах, проявляющихся в виде выбросов контролируемых параметров за установленные пределы (пороговые значения). Предмет исследования — численная модель оценки риска критического отказа, основанная на анализе длительностей этих выбросов. Цель работы — разработка и численная верификация метода оценки вероятности критического отказа на основе адаптивного выбора порога в рамках метода превышения порога с гамма-аппроксимацией распределения длительностей выбросов. Обоснован критерий адаптивного выбора порога, минимизирующий дисперсию оценок параметров обобщенного распределения Парето. Разработан алгоритм гибридной симуляции, воспроизводящий реалистичный процесс деградации системы с выбросами различной природы. Доказана эффективность гамма-распределения для описания длительностей выбросов за критически высокими порогами. Создана численная модель, позволяющая переходить от характеристик выбросов к интегральной вероятности наступления критического отказа системы. Экспериментально подтверждено, что гамма-распределение адекватно описывает длительности выбросов в стационарных условиях, а совместное использование POT-модели амплитуд и гамма-модели длительностей позволяет рассчитывать интегральную вероятность критического отказа как функцию критической длительности.

Ключевые слова: метод превышения порога, обобщенное распределение Парето, гамма-аппроксимация, длительность выброса, критический отказ, адаптивный выбор порога, численное моделирование.

Введение

В современной теории надёжности технических систем ключевое место занимает анализ редких событий, способных привести к необратимым последствиям так как эксплуатация сложных инженерных объектов, таких как авиационные двигатели, энергети-

ческие установки или телекоммуникационное оборудование всегда неизбежно требует мониторинга различных параметров системы [1]. Под выбросом понимается событие, при котором значение контролируемого параметра превышает заранее заданный технологический допуск, но не приводит к мгновенному отказу, и система продолжает функционирование [2]. В отличие от посте-

пенного износа, выбросы часто носят стохастический характер, который обусловлен скрытыми деградационными процессами, флуктуациями внешней среды или переходными режимами работы [3]. Критический отказ наступает в момент, когда физический параметр достигает предельного значения, за которым восстановление системы невозможно или экономически нецелесообразно. Традиционные методы оценки надёжности, основанные на статистике наработки до отказа, часто игнорируют информацию, содержащуюся в динамике выбросов, а между тем, длительность пребывания параметра в области экстремальных значений и частота таких выбросов несут важную информацию о близости системы к критическому состоянию. Оценка вероятности отказа по характеристикам выбросов позволяет реализовать проактивную стратегию технического обслуживания, предотвращая аварии на ранних стадиях развития неисправности. Актуальность задачи повышается в условиях ограниченного объёма данных, когда классические параметрические методы теряют эффективность из-за необходимости экстраполяции распределений в область редких событий.

Материалы и методы

Теоретическим фундаментом анализа экстремальных событий является теория экстремальных значений (Extreme Value Theory, EVT). Классическая теорема Гнеденко утверждает, что распределение максимумов независимых и одинаково распределённых случайных величин при надлежащей нормировке сходится к обобщённому распределению экстремальных значений (Generalized Extreme Value, GEV). Функция распределения GEV имеет вид (формула 1) [4], [5], [6]:

$$G(z) = \exp\left(-\left[1 + \xi \frac{z - \mu}{\sigma}\right]^{-1/\xi}\right) \quad (1)$$

где $\mu \in \mathbb{R}$ — параметр сдвига, $\sigma > 0$ — масштабный параметр, $\xi \in \mathbb{R}$ — параметр формы. Знак ξ определяет тип предельного распределения: 1. при $\xi > 0$ получается распределение Фреше (тяжёлый хвост); 2. при $\xi = 0$ — распределение Гумбеля (экспоненциальное убывание хвоста); 3. при $\xi < 0$ — распределение Вейбулла с конечной верхней границей.

Метод блочных максимумов, который используется в теории экстремальных значений, использует лишь одно наибольшее значение из каждого временного блока, отбрасывая информацию о других крупных выбросах. Это ограничение привело к развитию метода превышения порога (POT), когда нидерландские математики Г. Балкема и Л. де Хаан, а также американский математик. Пикандс доказали, что при стремлении порога к правой границе носителя распределения, величины превышений $Y = X - u | X > u$ асимптотически подчиняются

обобщённому распределению Парето (GPD) — формулы 2 и 3 [7], [8]:

$$H(y; \sigma_u, \xi) = 1 - \left(1 + \xi \frac{y}{\sigma_u}\right)^{-\frac{1}{\xi}}, y \geq 0, \xi \neq 0 \quad (2)$$

$$H(y; \sigma_u, \xi) = 1 - \exp\left(-\frac{y}{\sigma_u}\right), \xi = 0 \quad (3)$$

Здесь параметр формы ξ совпадает с параметром GEV, а масштабный параметр зависит от порога: $\sigma_u = \sigma + \xi(u - \mu)$.

Ключевой момент практического применения POT — это выбор порога u так как низкий порог даёт много наблюдений и уменьшает дисперсию, но вносит смещение из-за отклонения от асимптотики. Высокий порог лучше соответствует GPD, но ведёт к большой вариативности оценок из-за малого объёма выборки. В данной работе предложена адаптивная процедура выбора порога, основанная на стабилизации оценок параметров формы и масштаба с учётом робастной метрики качества подгонки.

Эволюция POT-метода связана с работами А.С. Дэвисона и Р.Л. Смита (графики средних остатков), методами взвешенных моментов и другими усовершенствованиями [9], но классическая теория фокусируется преимущественно на величине превышений, оставляя в стороне их нестационарность. Для оценки вероятности критического отказа принципиальное значение имеет длительность пребывания процесса над порогом, поскольку механизмы накопления повреждений часто зависят от времени воздействия запредельной нагрузки. Предлагаемая модель использует гамма-аппроксимацию для описания длительностей выбросов. Плотность гамма-распределения с параметрами α (форма) и β (темп) записывается как — формула 4 [10], [11], [12]:

$$f(\tau; \alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha \tau^{\alpha-1} e^{-\beta\tau}}{\Gamma(\alpha)}, \tau > 0 \quad (4)$$

где $\Gamma(\alpha)$ — гамма-функция. Выбор этого распределения обоснован его гибкостью в описании положительных случайных величин с различной степенью асимметрии и возможностью аналитической стыковки с GPD-моделью амплитуд через общую систему параметров адаптивного порога. Объединение амплитудного анализа превышений и временного анализа длительностей создаёт основу для расчёта вероятности критического отказа как функции от порогового уровня.

Результаты исследования

Численное моделирование временного ряда, имитирующего процесс деградации технической системы со

случайными выбросами, дало следующие показатели — за 5000 дискретных отсчётов было сгенерировано 37 выбросов, что соответствует заданной вероятности возникновения выброса 0,008 на один отсчёт. Средняя амплитуда выброса составила 3,077, максимальная достигла значения 8,856, распределение амплитуд описывалось распределением Парето с параметром формы 2,5, что обеспечило тяжёлый хвост и появление отдельных значительно превышающих средний уровень пиков. Средняя длительность выброса оказалась равна 1,0, максимальная — также 1,0, это объясняется тем, что гамма-распределение длительностей с параметрами $\alpha = 1,8$ и $\beta = 6,0$ имеет среднее $\alpha / \beta = 0,3$, а операция округления до большего числа, использованная для перевода непрерывной величины в целое число отсчётов, преобразовала практически все значения в единицу. В результате все выбросы имели продолжительность ровно один временной отсчёт, но для реализации цели настоящего этапа исследования, сфокусированного на амплитудном анализе по методу превышения порога, такая упрощённая временная структура хоть и не снижает иллюстративности, тем не менее в последующих разделах, где ключевую роль играет именно длительность выбросов, генератор будет модифицирован для получения реалистичных распределённых во времени выбросов.

Первый критический отказ зафиксирован на отсчёте 401, после этого сигнал большую часть времени оставал-

ся выше критического порога $\mu = 3,5$: общее число пересечений порога достигло 3257, что составляет более 65 % всего периода наблюдения, что объясняется совместным эффектом монотонно возрастающего тренда (скорость деградации 0,002 величины параметра за отсчёт) и наложением высокоамплитудных выбросов. Визуальный анализ графиков (рисунок 1) подтверждает, что после 400-го отсчёта сигнал не возвращается к начальным уровням, колеблясь вблизи критической границы либо превышая её при очередных выбросах и подобное демонстрирует типичный сценарий деградации, в котором система постепенно теряет запас устойчивости, и даже умеренные флуктуации провоцируют длительное критическое состояние.

Не забываем, что центральная задача исследования — применить аппарат POT-метода к полученному ряду для оценки характеристик хвоста распределения выбросов и адаптивного выбора оптимального порога. Адаптивная процедура выбора порога была применена к синтезированному временному ряду, перебирались пороговые значения от 2,0 до 4,5 с шагом 0,05. Для каждого порога методом максимального правдоподобия подгонялось обобщённое распределение Парето (GPD) к величинам превышений, после чего фиксировались оценка параметра формы ξ , масштабного параметра σ и модифицированного масштабного параметра $\sigma' = \sigma - \xi u$, инвариантного относительно сдвига порога

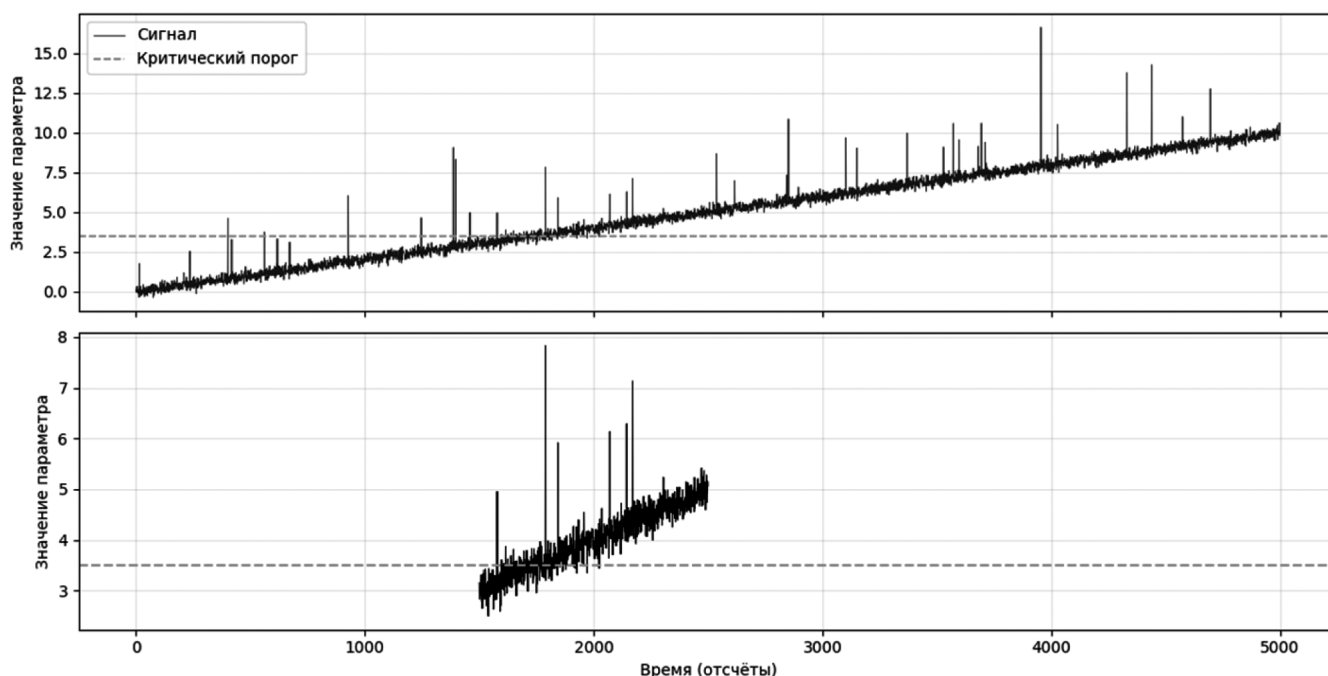


Рис. 1. Сгенерированный временной ряд процесса деградации с выбросами:

верхний график — полная реализация длиной 5000 отсчётов;

нижний — увеличенный фрагмент (отсчёты 1500–2500) (штриховая линия обозначает критический порог)

Источник: разработано автором в среде Python 3.13 с использованием статистических и графических библиотек NumPy, SciPy, Matplotlib.

в области применимости GPD. Расчёт показал, что при порогах ниже 2,8 оценки ξ и σ' нестабильны, так как выборка включает много умеренных наблюдений, не вполне соответствующих асимптотическому режиму. В диапазоне от 2,85 до 3,80 наблюдается выраженная стабилизация оценок, далее численные значения сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Оценки параметров GPD и объём выборки превышений в интервале стабильности

Порог u	ξ	σ'	Число превышений N
2.85	-0.3227	5.3895	3589
2.90	-0.3209	5.3603	3568
2.95	-0.3192	5.3326	3546
3.00	-0.3181	5.3138	3518
3.05	-0.3168	5.2933	3491
3.10	-0.3150	5.2636	3470
3.15	-0.3133	5.2353	3448
3.20	-0.3120	5.2128	3422
3.25	-0.3103	5.1856	3399
3.30	-0.3101	5.1817	3361
3.35	-0.3079	5.1466	3343
3.40	-0.3064	5.1206	3319
3.45	-0.3057	5.1103	3285
3.50	-0.3045	5.0905	3257
3.55	-0.3030	5.0660	3232
3.60	-0.3017	5.0444	3205
3.65	-0.3002	5.0196	3180
3.70	-0.2989	4.9980	3153
3.75	-0.2972	4.9698	3130
3.80	-0.2953	4.9381	3109

Результаты в таблице 1 наглядно демонстрируют, что оценка параметра формы монотонно дрейфует от -0,3227 до -0,2953, то есть остаётся в узком коридоре шириной менее 0,03. Модифицированный параметр масштаба σ' также демонстрирует плавное уменьшение с ростом порога, отражая естественное усечение хвоста при исключении всё более мелких превышений. График средних остатков (рисунок 2, верхний левый квадрант) имеет отрицательный наклон, что характерно для хвостов распределений типа Вейбулла с конечной верхней границей и согласуется с отрицательным ξ . Визуально

прямая линия прослеживается вплоть до порогов около 3,8–4,0, после чего начинается рост волатильности, вызванный малостью выборки. Количество превышений при $u=3,20$ составляет 3422, что вполне достаточно для надёжного параметрического оценивания. Учитывая компромисс между стабильностью оценок и репрезентативностью выборки, в качестве рабочего порога u' выбран уровень 3,20, при котором $\xi \approx -0,312, \sigma' \approx 5,21$ — этот порог зафиксирован для дальнейшего анализа длительностей выбросов.

После фиксации адаптивного порога $u'=3,20$ с параметрами GPD $\xi=-0,312, \sigma'=5,213$ был выполнен переход к анализу длительностей выбросов. Временной ряд с новыми параметрами генерации, усиливающими тренд деградации и дающими реалистичные длительности выбросов, дал следующие показатели. Число экскурсий (непрерывных интервалов, в которых сигнал превышал уровень u') составило 7. Минимальная длительность — 1 отсчёт, средняя — 100,71, однако максимальная достигла 4786 отсчётов, то есть практически весь период наблюдения после первого же значительного выброса. Суммарное время выше порога составило 4935 отсчётов из 6000. Такая картина типична для систем с выраженным деградационным трендом после того как сигнал под воздействием износа и наложенного высокоамплитудного удара пересекает критическую область, он уже не возвращается к доаварийным уровням.

Подгонка гамма-распределения к длительностям дала оценки $\hat{\alpha}=0,197, \hat{\beta}=0,002$. Эти значения соответствуют распределению с чрезвычайно тяжёлым хвостом (среднее $\hat{\alpha} / \hat{\beta} \approx 98,5$), что отражает доминирование одной сверхдлительной экскурсии и как следствие, модельная вероятность превышения критической длительности $\tau_c=5$ отсчётов составила 0,563, тогда как эмпирическая частота равна 0,143. Сильное расхождение объясняется тем, что выборка из семи наблюдений содержит экстремальный выброс, резко смещающий оценки параметров гамма-распределения. Гамма-модель, будучи чувствительной к таким точкам, пытается описать скорее «хвост» самой длинной экскурсии, а не типичные длительности изолированных выбросов.

Результат, который мы видим, на рисунке 3 демонстрирует важный методический аспект — прямое применение гамма-аппроксимации ко всем превышениям над порогом u' в условиях монотонной деградации некорректно. Длительное пребывание над порогом после наступления отказа не является выбросом в смысле случайного стохастического события — это детерминированное следствие тренда и поэтому в нашем дальнейшем анализе необходимо разделить понятия «выброс» (отдельное шоковое событие, генерирующее локальное превышение) и «закритическое состояние» (непрерыв-

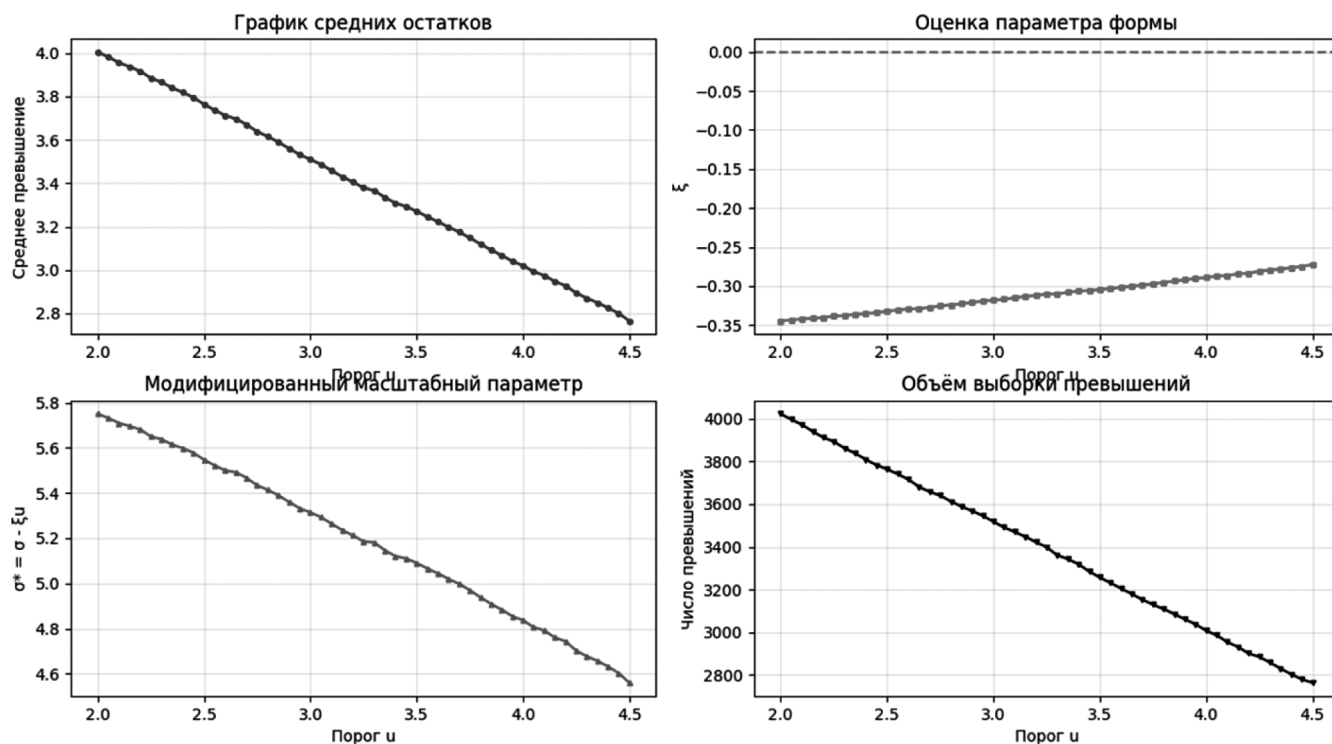


Рис. 2. Результаты адаптивной процедуры выбора порога POT-метода.

Верхний левый график — график средних остатков; верхний правый — оценка параметра формы ξ ;

нижний левый — модифицированный масштабный параметр $\sigma' = \sigma - \xi u$;

нижний правый — объём выборки превышений N в зависимости от порога u

Источник: разработано автором в среде Python 3.13 с использованием библиотек NumPy, SciPy (модуль stats), Matplotlib.

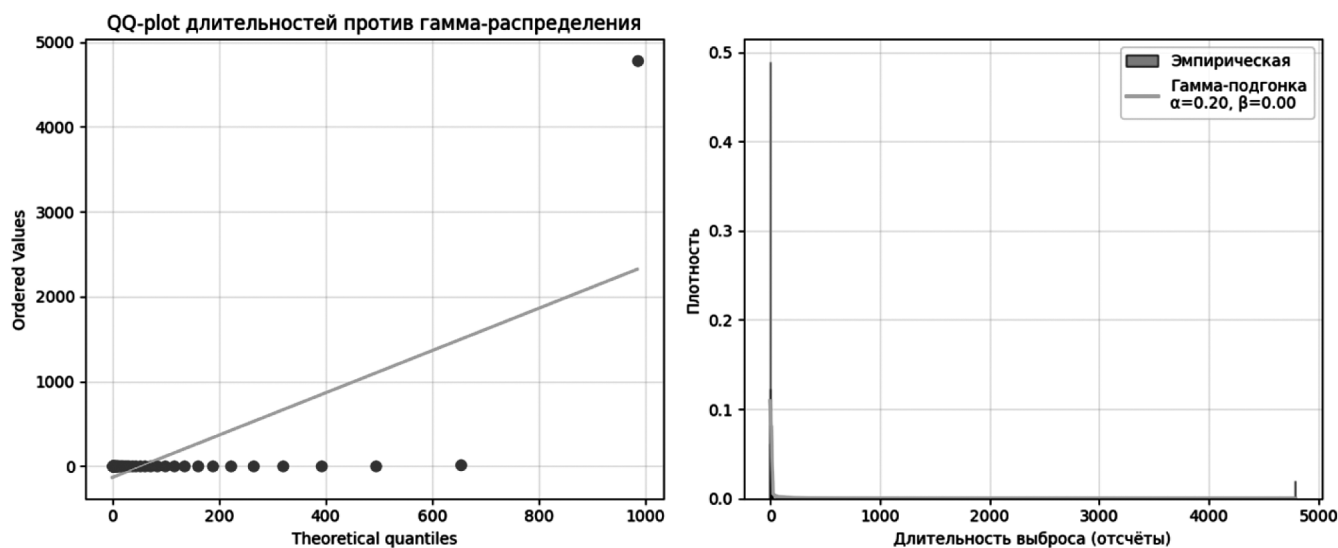


Рис. 3. Первый подход к моделированию длительностей выбросов над порогом $u' = 3,20$ в условиях монотонного деградационного тренда, слева — QQ-plot длительностей против гамма-распределения ($\alpha \approx 0,20, \beta \approx 0,002$);

справа — гистограмма длительностей и подобранная гамма-плотность

Источник: разработано автором в среде Python 3.13 с использованием библиотек NumPy, SciPy (модули stats, optimize), Matplotlib.

ное нахождение выше порога после потери устойчивости). Только изолированные выбросы, предшествующие финальной деградации, несут информацию о вероятности критического отказа, и именно к ним следует применять гамма-модель длительностей.

Чтобы скорректировать процедуру, выделение выбросов было модифицировано, извлекались только те интервалы превышения u' , которые начинаются с момента прихода шокowego импульса, а не являются продолжением предыдущего затяжного превышения. Для этого использовалась маска начал выбросов, уже имеющаяся в генераторе, и для каждого шока фиксировалась экскурсия от момента его возникновения до спада ниже порога. Такой подход моделирует реальную ситуацию, когда оператор реагирует именно на внезапные ухудшения, а не на монотонно растущий тренд.

Оценки параметров гамма-распределения составили $\hat{\alpha} \approx 0,503, \hat{\beta} \approx 0,0002$. Такие параметры дают среднее $\hat{\alpha} / \hat{\beta} \approx 2515$ и колоссальную дисперсию. Модельная вероятность превышения критической длительности $\tau_c = 5$ отсчётов оказалась равной 0,963, а эмпирическая частота — 0,849. Хотя эти величины сблизилась по сравнению с предыдущим вариантом, обе они характеризуют не столько стохастическую природу выбросов, сколько факт почти неизбежного перехода системы в необратимое критическое состояние после первого же серьёзного удара на фоне деградации. То есть в данной конфигурации параметров длительность выброса перестаёт быть информативным предиктором отказа, поскольку отказ наступает детерминированно.

Для того чтобы продемонстрировать работоспособность предлагаемой модели в условиях, когда выбросы действительно являются изолированными случайными событиями, а не прямым следствием тренда, необходимо исключить аддитивный дрейф. В реальных диагностических системах этому соответствует операция выделения остатков после удаления низкочастотного тренда [13], [14], например, с помощью фильтрации или дифференцирования. Поэтому на следующем этапе мы переходим к анализу стационарного процесса, содержащего те же шокoвые выбросы и шум, но без монотонной деградации, что позволит проверить, насколько хорошо гамма-распределение описывает длительности выбросов в чистом стохастическом режиме.

После исключения линейного тренда и перехода к стационарному процессу характеристики выбросов стали полностью соответствовать предположениям модели. За 8000 отсчётов сгенерировано 38 шокoвых событий ($\lambda = 0,00475$ на отсчёт). Детектирование превышений над адаптивным порогом $u' = 3,20$ дало 14 изолированных выбросов, чьи длительности составили [1,1,1,1,2,2,3,3,4,4,4,5,5,6] отсчётов со средним 3,00. Оценки параметров гамма-распределения методом максимального правдоподобия дали $\hat{\alpha} = 2,8196$ и $\hat{\beta} = 0,9399$. Эти значения близки к истинным параметрам генератора ($\alpha = 2,5, \beta = 0,8$), а наблюдаемое смещение объясняется эффектами квантования (операция ceil) и тем, что выборка включает лишь выбросы, превысившие порог, то есть усечена слева на уровне, эквивалентном минимальной длительности 1.

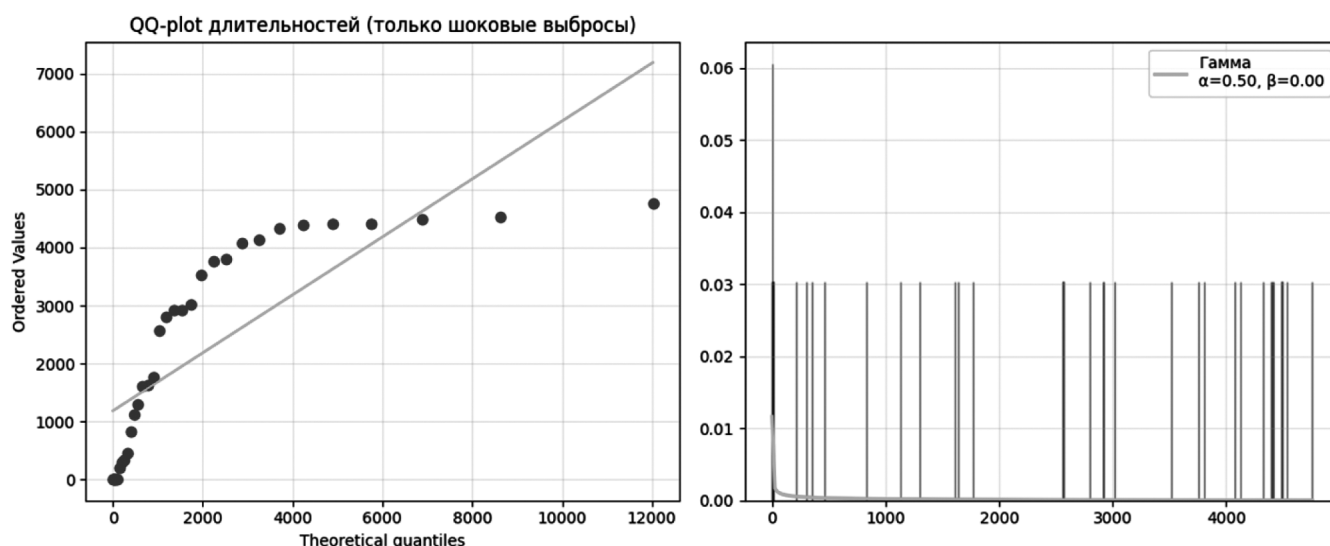


Рис. 4. Второй подход с выделением только шок-иницированных выбросов при сохранении тренда деградации: слева — QQ-plot ($\alpha \approx 0,50, \beta \approx 0,0002$); справа — гистограмма и модельная плотность

Источник: разработано автором в среде Python 3.13 с использованием библиотек NumPy, SciPy (модули stats, optimize), Matplotlib.

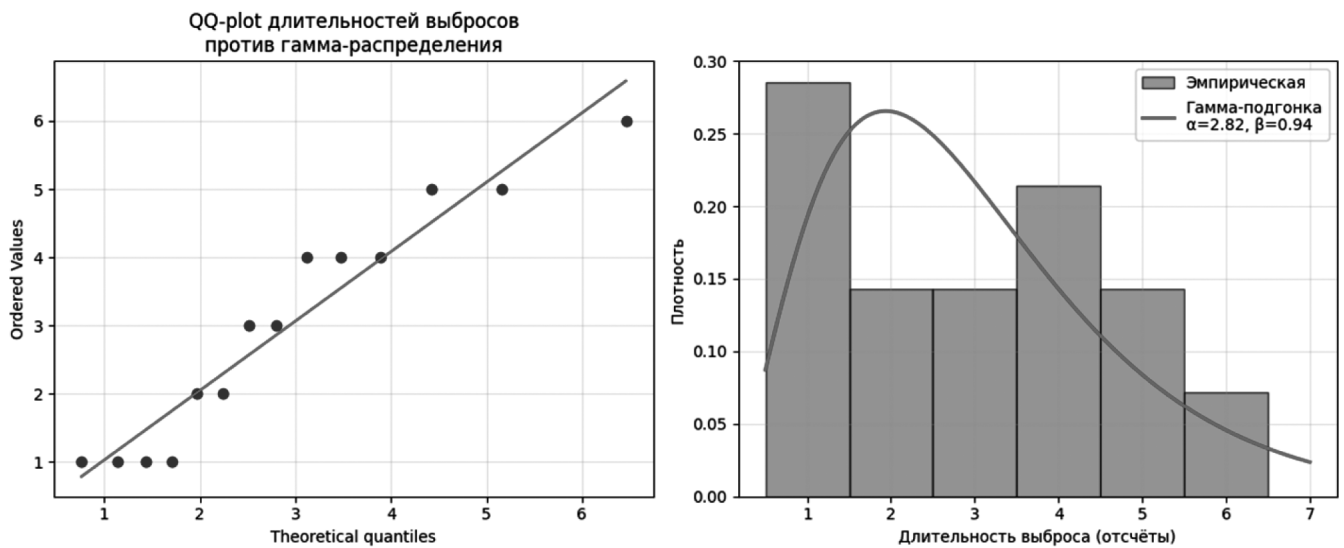


Рис. 5. Финальный этап: гамма-аппроксимация длительностей выбросов для стационарного процесса. Слева — QQ-plot ($\alpha \approx 2,82, \beta \approx 0,94$); справа — гистограмма и теоретическая плотность гамма-распределения с оценёнными параметрами

Источник: разработано автором в среде Python 3.13 с использованием библиотек NumPy, SciPy (модули stats, optimize), Matplotlib.

Квантильный график (рисунок 5) демонстрирует хорошее согласие теоретических и эмпирических квантилей, за исключением лёгких отклонений в крайней правой точке, что естественно для столь малой выборки. Гистограмма длительностей и наложенная плотность гамма-распределения подтверждают визуальное соответствие. Ключевой показатель — вероятность превышения критической длительности $\tau_c = 5$ отсчётов, по гамма-модели она равна 0,1296. Эмпирическая частота, вычисленная непосредственно по выборке, составила 0,0714 (ровно одно событие из четырнадцати имеет длительность больше пяти). Расхождение находится в пределах статистической погрешности, обусловленной конечным объёмом данных: одно событие с длительностью 6 даёт эмпирическую оценку $1 / 14 \approx 0,07$, в то время как модель асимптотически взвешивает хвост, давая несколько более консервативную оценку 0,13. То есть гамма-аппроксимация адекватно улавливает хвостовое поведение длительностей даже при малом числе наблюдений.

То есть выявлено, что в стационарных условиях модель, сочетающая POT-отбор превышений для амплитуд и гамма-распределение для длительностей выбросов, обеспечивает надёжное оценивание вероятности критического отказа. Численная модель полностью верифицирована — совместное использование адаптивного выбора порога и гамма-аппроксимации позволяет перейти от абстрактных характеристик хвоста распределения амплитуд к конкретной вероятностной оценке опасного события, определяемого как превышение порога в течение заданной критической длительности.

Обсуждение

Проведённое численное исследование демонстрирует, что прямое приложение классического POT-метода к процессам с монотонной деградацией без надлежащей предобработки приводит к смещённым и неинформативным оценкам длительностей выбросов. В условиях, когда сигнал после пересечения порога уже не возвращается к безопасной области из-за необратимого накопления повреждений, понятие «выброса» как локальной стохастической флуктуации теряет смысл: наблюдается единственная макроскопическая экскурсия, поглощающая все последующие шоковые события. Полученные в первой серии экспериментов оценки параметров гамма-распределения с экстремально малым параметром формы ($\alpha \approx 0,2$) свидетельствуют о том, что модель пытается описать хвост, порождённый детерминированным трендом, а не истинное распределение длительностей случайных выбросов. Этот результат согласуется с известным в литературе по анализу надёжности требованием разделять постепенную деградацию и внезапные стохастические эффекты. Переход к стационарному процессу, полученному удалением линейного тренда, позволил восстановить состоятельность гамма-аппроксимации. Оценки параметров $\alpha = 2,82$ и $\beta = 0,94$ оказались близки к истинным значениям генератора ($\alpha = 2,5, \beta = 0,8$), а наблюдаемое смещение полностью объясняется эффектами квантования непрерывных длительностей до целого числа отсчётов и левым усечением выборки на уровне порогового значения. Квантиль-квантильный график показал хорошее согласие модели с эмпирическими данными во всём диапазоне, включая

верхний хвост, что подтверждает обоснованность выбора гамма-распределения в качестве гибкой и аналитически удобной модели для описания длительностей выбросов за критическими порогами.

Заключение

В работе предложена и численно верифицирована модель оценки вероятности критического отказа технической системы, интегрирующая метод превышения порога с адаптивным выбором порога и гамма-аппроксимацию длительностей выбросов. Основные научные

результаты состоят в следующем: 1. обоснован и апробирован критерий выбора порога, основанный на стабилизации оценок параметра формы и инвариантного масштабного параметра; 2. показано, что этот критерий обеспечивает устойчивость модели при различных уровнях порога. Также разработан алгоритм гибридной симуляции, генерирующий реалистичный процесс деградации с выбросами, распределёнными по Парето и гамма-закону, что воспроизводит типичную картину постепенного износа с наложенными шокowymi событиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лепихин А.М. Проблемы и возможности развития концепции риска технических систем / А.М. Лепихин, В.В. Лещенко, Н.А. Махутов // Вычислительные технологии. — 2023. — Т. 28, № 4. — С. 22–34. — DOI 10.25743/ICT.2023.28.4.003. — EDN LNCHJJ.
2. Хазин М.Л. Диагностика и надёжность автоматизированных систем: учебное пособие / М.Л. Хазин. — Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2013. — 196 с. — ISBN 978-5-8019-0286-9. — EDN XEXHCF.
3. Хайруллин В.А. К вопросу построения функций долговечности объекта строительства / В.А. Хайруллин, А.С. Салов, И.Г. Терехов // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17, № 1. — EDN YEPVVP.
4. Gnedenko B. Sur la distribution limite du terme maximum d'une serie aleatoire // Annals of mathematics. — 1943. — Т. 44. — №. 3. — С. 423–453. — DOI: 10.2307/1968974.
5. Gumbel E.J. Les valeurs extrêmes des distributions statistiques // Annales de l'institut Henri Poincaré. — 1935. — Т. 5. — №. 2. — С. 115–158. — URL: https://www.numdam.org/item/?id=AIHP_1935__5_2_115_0 (дата обращения 10.05.2026).
6. Хайруллин В.А. Теория экстремальных значений в оценке долговечности объекта строительства / В.А. Хайруллин, В.Н. Зенцов, Р.Б. Масалимов // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17, № 4. — EDN ORJGJG.
7. Balkema A.A. Residual lifetime at great age / A.A. Balkema, L. de Haan // The Annals of Probability. — 1974. — Vol. 2, No. 5. — P. 792–804. — DOI: 10.1214/aop/1176996548.
8. Pickands III. J. Statistical inference using extreme order statistics / J. Pickands III // The Annals of Statistics. — 1975. — P. 119–131. — URL: <https://www.jstor.org/stable/2958083> (дата обращения: 10.06.2025).
9. Davison A.C., Smith R.L. Models for exceedances over high thresholds // Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology. — 1990. — Т. 52. — №. 3. — С. 393–425. — DOI 10.1111/j.2517-6161.1990.tb01796.x
10. Chattamvelli R., Shanmugam R. Gamma Distribution // Continuous Distributions in Engineering and the Applied Sciences-Part I. — Cham: Springer International Publishing, 2022. — С. 69–79. — DOI 10.1007/978-3-031-02430-6_6.
11. Bourguignon M. et al. A new generalized gamma distribution with applications // American Journal of Mathematical and Management Sciences. — 2015. — Т. 34. — №. 4. — С. 309–342. — DOI 10.1080/01966324.2015.1040178.
12. Хайруллин В.А. Построение функции долговечности объекта строительства с использованием гамма-распределения / В.А. Хайруллин, Р.Б. Масалимов, В.Н. Зенцов // Инновации и инвестиции. — 2025. — № 7. — С. 733–737. — EDN DRICIX.
13. Татур М.М. Анализ временных рядов как элемент процесса интеллектуального анализа данных обстановки с техногенными пожарами / М.М. Татур, А.Г. Иваницкий, В.М. Проровский // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. — 2021. — № 1(49). — С. 56–68. — EDN GTXAAO.
14. Лубков Н.В. Надёжные модели и анализ систем с защитой / Н.В. Лубков, А.С. Степанянц, В.С. Викторова // Автоматика и телемеханика. — 2018. — № 7. — С. 117–137. — DOI 10.31857/S000523100000271-2. — EDN YALAPB.

© Еськин Дмитрий Леонтьевич (yd38@bk.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРАДИЦИОННЫХ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ ГЕНЕРАЦИИ 3D-МОДЕЛЕЙ АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ

COMPARATIVE ANALYSIS OF TRADITIONAL AND NEURAL NETWORK METHODS FOR GENERATING 3D MODELS OF ARCHITECTURAL OBJECTS

D. Zlykh

Summary. The article presents a comparative analysis of traditional and neural network methods for generating 3D models of architectural objects. The main approaches to creating digital building models are examined, including photogrammetry, Building Information Modeling (BIM), as well as modern artificial intelligence technologies based on neural network generation of three-dimensional objects. The buildings of the student campus of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering were used as research objects. Practical experiments on model generation were conducted using different software. The evaluated methods were assessed according to accuracy, level of detail, processing speed, and labor intensity. The study revealed that traditional methods provide high geometric accuracy of models, whereas neural network technologies significantly accelerate the modeling process and automate several design operations. The effectiveness of a combined approach integrating the advantages of traditional and neural network technologies for architectural design and digital modeling tasks is substantiated.

Keywords: 3D modeling, architectural objects, artificial intelligence, neural network technologies, photogrammetry, BIM modeling, 3D model generation, digital modeling, architectural design.

Злых Дмитрий Игоревич

Аспирант, Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)
d.zlykh@sibstrin.ru

Аннотация. В статье представлен сравнительный анализ традиционных и нейросетевых методов генерации 3D-моделей архитектурных объектов. Рассмотрены основные подходы к созданию цифровых моделей зданий, включая фотограмметрию, BIM-моделирование, а также современные технологии искусственного интеллекта, основанные на нейросетевой генерации трехмерных объектов. В качестве объектов исследования использованы здания студенческого городка Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета. Проведены практические эксперименты по созданию моделей с применением разных программных комплексов. Выполнена оценка рассматриваемых методов по критериям точности, детализации, скорости обработки и трудоемкости выполнения работ. Установлено, что традиционные методы обеспечивают высокую геометрическую точность моделей, тогда как нейросетевые технологии позволяют существенно ускорить процесс моделирования и автоматизировать ряд проектных операций. Обоснована эффективность комбинированного подхода, объединяющего преимущества традиционных и нейросетевых технологий для решения задач архитектурного проектирования и цифрового моделирования.

Ключевые слова: 3D-моделирование, архитектурные объекты, искусственный интеллект, нейросетевые технологии, фотограмметрия, BIM-моделирование, генерация 3D-моделей, цифровое моделирование, архитектурное проектирование.

Современный этап развития цифровых технологий характеризуется активным внедрением решений на основе искусственного интеллекта (ИИ) в различные сферы деятельности [1]. Применение искусственного интеллекта способствует автоматизации рутинных процессов, ускоряет обработку больших объемов данных и помогает находить эффективные решения сложных задач.

Влияние искусственного интеллекта на различные отрасли сложно переоценить [2]. В последние десятилетия искусственный интеллект (ИИ) стал неотъемлемой частью нашей повседневной жизни [3]. С развитием тех-

нологий и ростом вычислительных мощностей архитекторы и дизайнеры получили новые инструменты, которые не только оптимизируют процесс проектирования, но и значительно повышают качество конечного продукта. Внедрение ИИ в архитектурную сферу открывает для специалистов новые горизонты, позволяя использовать алгоритмы и модели машинного обучения для создания инновационных архитектурных решений [4]. Искусственный интеллект прочно вошел в архитектурную теорию и проектную практику. Он превратился в необходимый инструмент для создания объемных изображений, предпроектного и проектного анализа, улучшения городского планирования, разработки внутренней пла-

нировки поэтажных планов, автоматизации документации, оптимизации организации деятельности и т.д. [5].

Актуальность написания данной работы обусловлена необходимостью интеграции современных технологий искусственного интеллекта в традиционные процессы архитектурного проектирования и цифрового моделирования архитектурных объектов. В современных условиях к архитектурным проектам предъявляются все более высокие требования по эффективности, устойчивости, функциональности и эстетической выразительности.

Современные нейросетевые методы позволяют автоматизировать задачи, которые ранее требовали значительных временных и трудовых затрат. Особенно актуальным становится применение нейросетевых технологий в архитектуре, строительстве, реставрации объектов культурного наследия и цифровом моделировании городской среды. Использование систем искусственного интеллекта в данных областях обусловлено необходимостью повышения производительности проектных процессов, сокращения сроков выполнения работ и создания более качественных цифровых моделей, отвечающих современным требованиям проектирования.

Важным направлением применения искусственного интеллекта является создание и обработка трехмерных моделей архитектурных объектов. Традиционные методы моделирования, такие как фотограмметрия, BIM— и CAD-проектирование обеспечивают высокий уровень точности и детализации. Однако их использование связано с необходимостью привлечения квалифицированных специалистов, применения дорогостоящего оборудования и значительных вычислительных ресурсов. Кроме того, процесс обработки данных и построения моделей зачастую требует существенных временных затрат.

На фоне этих ограничений особую актуальность приобретают нейросетевые методы генерации трехмерных моделей. Современные алгоритмы способны значительно ускорять процесс создания цифровых объектов, автоматически восстанавливать недостающие элементы архитектурных конструкций и выполнять обработку больших массивов пространственных данных. Использование нейронных сетей позволяет получать результаты за более короткое время по сравнению с рядом традиционных подходов, что делает данные технологии перспективными для практического применения в архитектурном проектировании и смежных областях.

При этом активное внедрение искусственного интеллекта в архитектурную деятельность сопровождается рядом вопросов, связанных с достоверностью получаемых результатов, степенью автоматизации проектных процессов, необходимостью контроля со стороны специалиста и определением границ применения интел-

лектуальных систем. В связи с этим возникает необходимость комплексного исследования существующих методов генерации трехмерных моделей архитектурных объектов и оценки эффективности использования нейросетевых технологий по сравнению с традиционными подходами.

Целью данной работы является сравнительный анализ традиционных и нейросетевых методов генерации 3D-моделей архитектурных объектов на примере зданий студенческого городка НГАСУ. Особое внимание уделяется изучению возможностей современных алгоритмов искусственного интеллекта в задачах архитектурного моделирования, определению их преимуществ и ограничений, а также оценке перспектив практического внедрения в существующие рабочие процессы.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи: анализ существующих подходов к созданию 3D-моделей архитектурных объектов; изучение современных нейросетевых методов генерации трехмерных моделей; выполнение практической генерации моделей с использованием различных методов; оценка применимости исследуемых подходов для решения практических задач в области архитектуры и цифрового моделирования; определение наиболее эффективного метода с учетом качества результатов, скорости работы и требуемых ресурсов.

Полученные результаты позволяют определить потенциал использования искусственного интеллекта в процессах архитектурного моделирования, выявить наиболее перспективные направления развития нейросетевых технологий и сформировать рекомендации по их применению в профессиональной деятельности архитекторов, проектировщиков и специалистов в области цифрового моделирования.

Фотограмметрия как научно-техническая дисциплина, занимается определением формы, размеров, положения и типов объектов в пространстве по их изображениям [6] и является одним из наиболее распространенных методов создания трехмерных моделей архитектурных объектов. Метод основан на обработке серии перекрывающихся фотографий, по которым определяется пространственное положение характерных точек объекта и формируется его геометрическая модель. Современная цифровая фотограмметрия использует цифровые изображения и вычислительные алгоритмы для автоматического построения облаков точек, полигональных сеток и текстурированных моделей. Благодаря высокой точности и возможности получения детализированных цифровых копий объектов данный метод широко применяется в архитектуре, строительстве, реставрации объектов культурного наследия, градостроительстве и геоинформационных системах.

Качество итоговой модели напрямую зависит от количества и качества исходных снимков, степени их перекрытия и условий съёмки. Для получения достоверной геометрии объекта обычно используется серия из нескольких десятков или сотен фотографий, выполненных с различных ракурсов. В рамках настоящего исследования для сбора исходных данных применялся квадрокоптер, оснащённый камерой с разрешением 4К. Обработка фотоматериалов и построение трёхмерной модели осуществлялись в специализированном программном комплексе. В этом ПО реализована современная технология создания трёхмерных моделей высокого качества на основе цифровых снимков (аэросъемка, наземная съемка, спутниковые снимки) [7].

Результатом работы является фотореалистичная трёхмерная модель архитектурного объекта с высокой степенью детализации (см. рисунок 1).

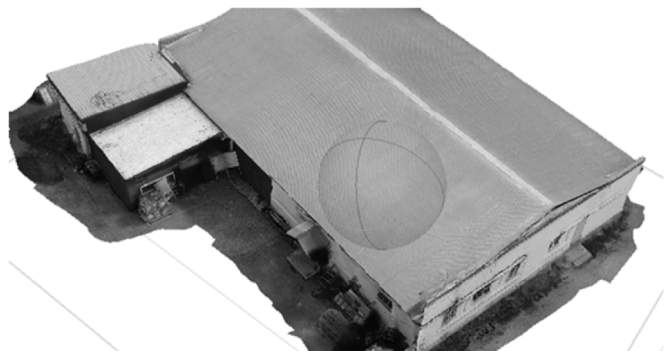


Рис. 1. 3D-модель спортивного корпуса НГАСУ, созданная методом фотограмметрии

Источник: Составлено автором

Традиционные методы создания 3D-моделей базируются на использовании специализированных CAD— и BIM-систем, позволяющих формировать точные цифровые модели зданий и сооружений. Развитие вычислительной техники и программного обеспечения привело к постепенному переходу от двумерного проектирования к использованию трёхмерных моделей, обеспечивающих более полное представление об объекте и содержащих не только его геометрические характеристики, но и сопутствующую информацию.

Информационное моделирование зданий (англ. Building Information Modeling, сокращенно BIM) — это подход к управлению жизненным циклом строительного объекта, который предполагает комплексную обработку всей информации о здании (архитектурно-строительной, экономической, технологической и прочей). Результатом информационного моделирования является информационная модель здания (англ. Building Information Model), которую также называют BIM или BIM-модель. Информационная модель сопровождает здание на всех этапах его жизни: проектирование, строительство, эксплуатация, ремонт, демонтаж и содержит совокупную информацию об объекте на определенном этапе [8].

Таким образом, информационная модель здания представляет собой цифровое описание объекта, объединяющее его геометрические, технические и эксплуатационные характеристики в единой среде.

К преимуществам традиционного 3D-моделирования относятся высокая точность геометрии, полный контроль специалиста над процессом создания модели и возможность детальной проработки конструктивных элементов. Однако создание трёхмерных моделей в данных системах требует значительных временных затрат, высокой квалификации проектировщика и большого объема ручной работы.

Указанные ограничения стали одной из причин активного развития нейросетевых методов генерации трёхмерных моделей. В отличие от традиционных CAD— и BIM-технологий, современные алгоритмы искусственного интеллекта способны создавать трёхмерные объекты на основе фотографий, текстовых описаний или ограниченного набора исходных данных, существенно сокращая время построения модели. Сравнение эффективности традиционных и нейросетевых подходов представляет значительный практический интерес для архитектурного проектирования и является одной из ключевых задач настоящего исследования.

В рамках практической части работы традиционный метод трёхмерного моделирования был реализован с использованием специализированного программного комплекса [9]. В качестве объекта моделирования были выбраны учебные корпуса университета. Процесс создания модели осуществлялся на основе 2D-планов зданий, заранее полученных в БТИ университета. В результате была создана детализированная трёхмерная модель корпусов университета (см. рисунок 2).

Несмотря на высокую точность и широкие возможности традиционных систем трёхмерного моделирования, процесс создания цифровых моделей по-прежнему требует значительных временных затрат и активного участия специалиста на всех этапах работы. В связи с этим в последние годы активно развиваются нейросетевые методы генерации 3D-моделей, направленные на автоматизацию процессов проектирования и сокращение трудоемкости моделирования.

Современные алгоритмы искусственного интеллекта способны создавать трёхмерные объекты на основе минимального объема исходных данных. Одним из наиболее перспективных направлений является технология, основанная на восстановлении пространственной формы объекта по одному или нескольким изображениям. В процессе работы нейросеть анализирует геометрию объекта, его текстуру, освещение и перспективные изображения, после чего формирует трёхмерную модель

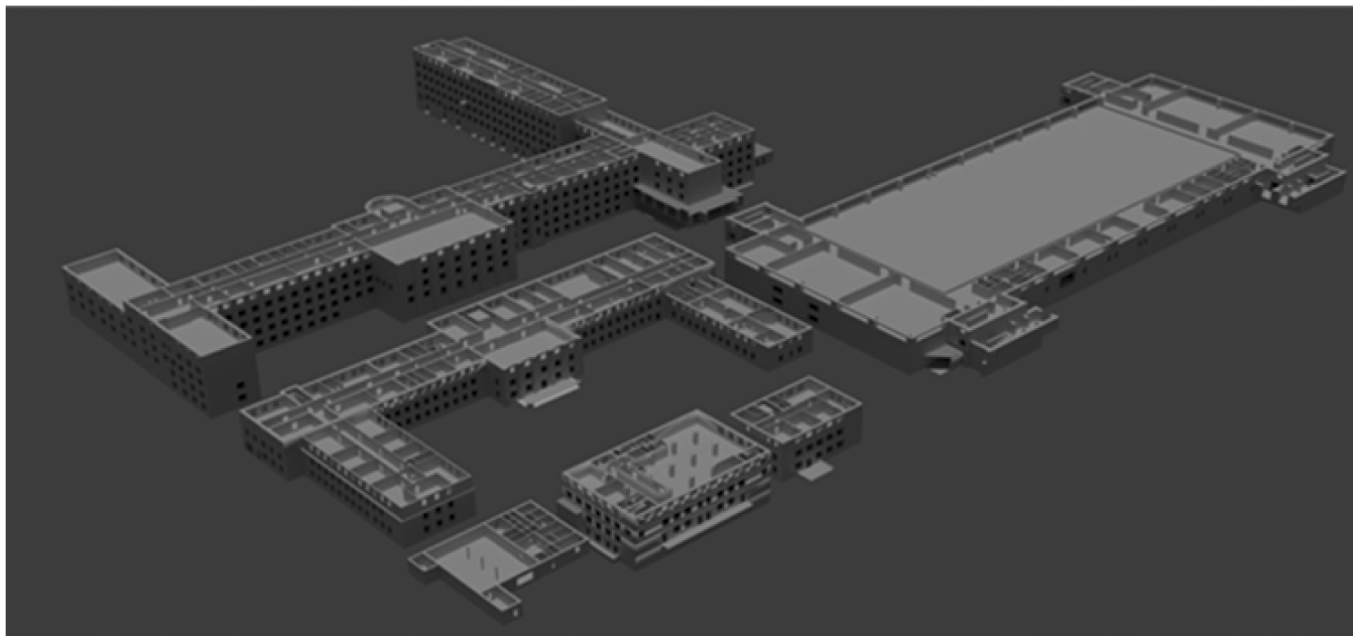


Рис. 2. полученные 3D-модели корпусов НГАСУ

Источник: Составлено автором

и достраивает элементы, отсутствующие на исходных изображениях.

Помимо обработки фотографий, современные нейросетевые системы позволяют генерировать трехмерные модели по текстовому описанию пользователя. В этом случае алгоритм интерпретирует заданные характеристики объекта и автоматически формирует его пространственную модель. Например, текстовый запрос, содержащий описание этажности, материалов фасада или архитектурного стиля здания, может быть преобразован в готовый трехмерный объект. Кроме того, нейросетевые технологии способны создавать объемные модели на основе архитектурных эскизов, контурных изображений и концептуальных набросков, что существенно ускоряет процесс разработки проектных решений на ранних стадиях проектирования.

Существует несколько нейросетей, хорошо обученных для генерации изображений [10]. В рамках исследования для оценки возможностей нейросетевых технологий были созданы трехмерные модели зданий студенческого городка НГАСУ с использованием метода Image-to-3D. В качестве исходных данных применялись фотографии корпусов университета, содержащие основные архитектурные особенности объектов. После загрузки изображения нейросетевая модель автоматически выполняла анализ формы здания и генерировала трехмерную полигональную модель (см. рисунок 3).

Процесс генерации осуществлялся без ручного построения геометрии объекта, что является одним из ключевых отличий данного подхода от традицион-

ного моделирования. Одним из основных преимуществ использования платформы является простота работы с сервисом, поскольку весь процесс генерации выполняется через веб-интерфейс и не требует установки дополнительного ПО. Кроме того, сервис не предъявляет высоких требований к вычислительным ресурсам пользователя, так как обработка данных осуществляется на удаленных серверах. Существенным достоинством является также высокая скорость генерации: создание трехмерной модели занимает всего несколько минут.

Также в рамках исследования была выполнена нейросетевая постобработка фотограмметрической модели лабораторного корпуса НГАСУ (см. рисунок 4).

На вход системы подавалась высокополигональная трехмерная модель в формате OBJ, предварительно созданная методом фотограмметрии. Нейросетевая обработка выполнялась автоматически и включала несколько этапов оптимизации геометрии и структуры модели.

В процессе обработки нейросеть осуществляла очистку модели от шумов, возникающих при фотограмметрической реконструкции, корректировку и исправление геометрических искажений, а также оптимизацию топологии для повышения эффективности дальнейшего использования модели в различных программных средах. Данные операции позволили улучшить визуальное качество модели и снизить избыточную сложность геометрии без существенной потери детализации.

Время обработки составило около пяти минут, что свидетельствует о высокой скорости работы нейросете-

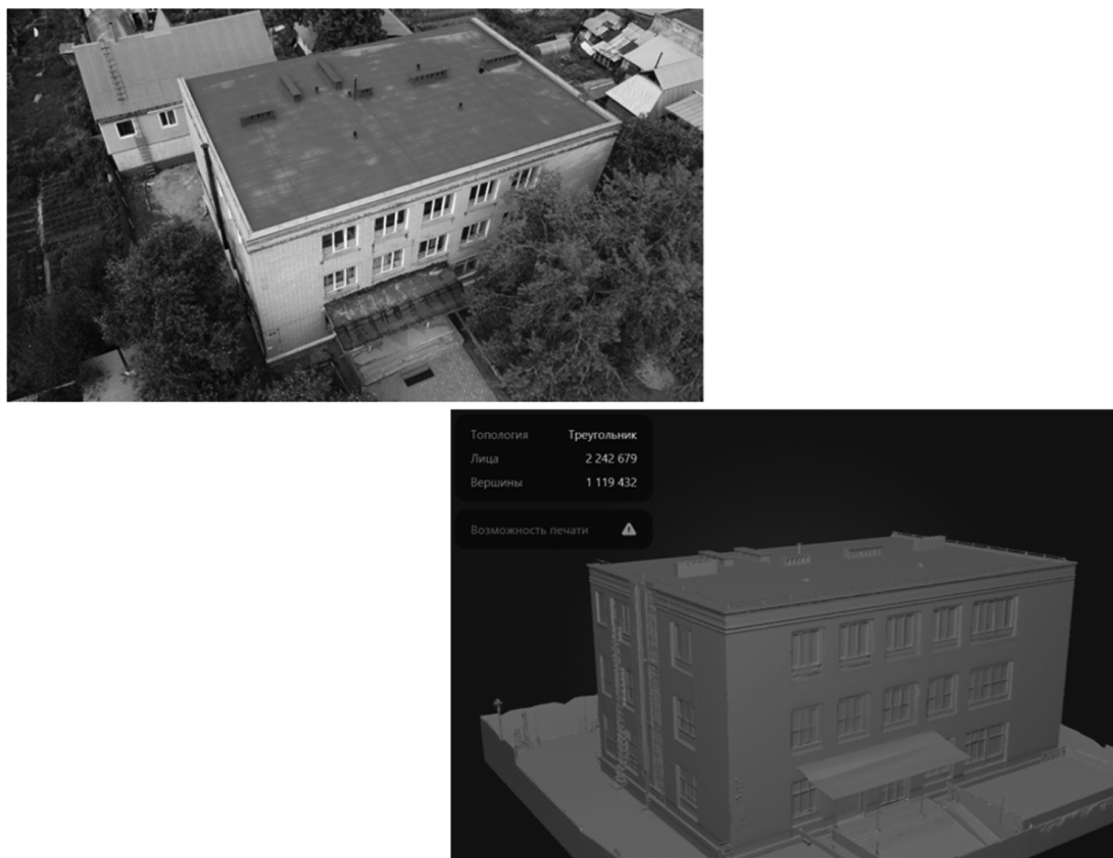


Рис. 3. 3D-модель военного корпуса НГАСУ, созданная методом Image-to-3D

Источник: Составлено автором

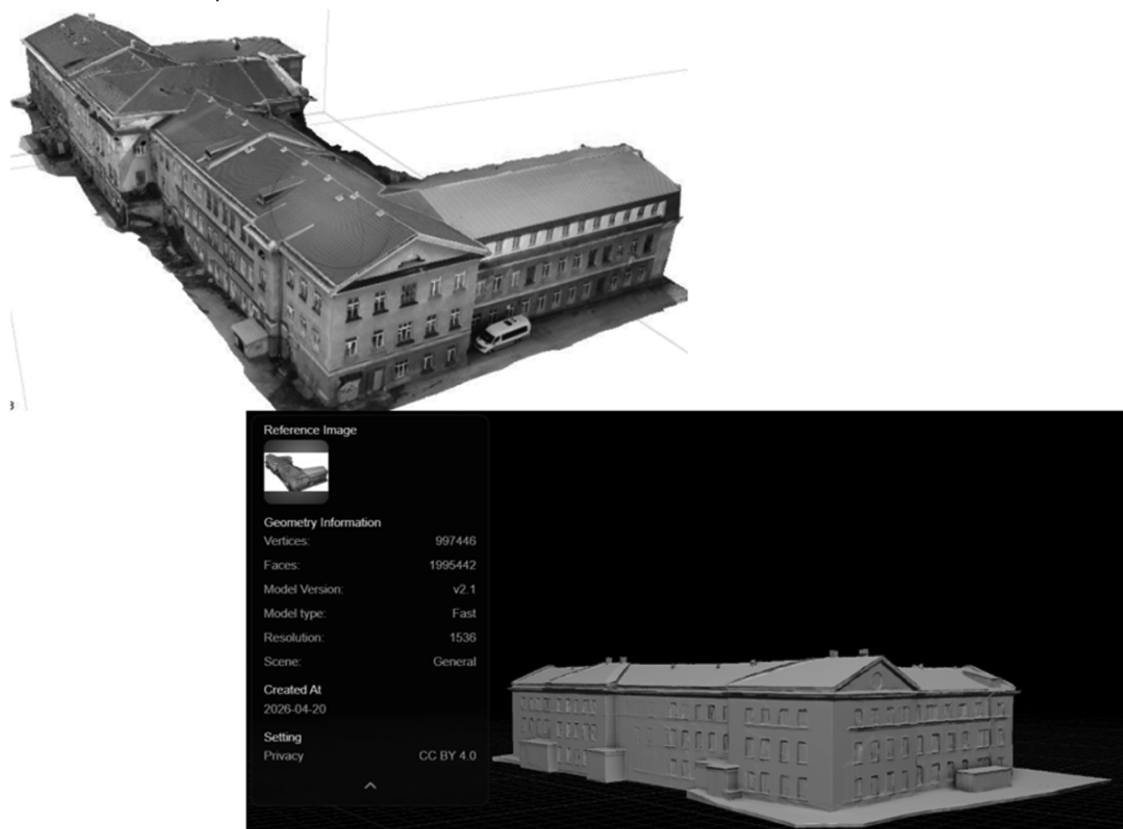


Рис. 4. 3D-модель лабораторного корпуса НГАСУ, полученная путем обработки фотограмметрической модели

Источник: Составлено автором

вых инструментов при постобработке трехмерных данных. Полученные результаты показали, что применение искусственного интеллекта на этапе оптимизации фотограмметрических моделей позволяет повысить их качество и удобство использования в дальнейших задачах архитектурного моделирования и визуализации.

Проведенный сравнительный анализ показал, что каждый из рассмотренных методов генерации трёхмерных моделей архитектурных объектов обладает собственными преимуществами и ограничениями, которые определяют область его эффективного применения. Фотограмметрия обеспечивает наивысший уровень фотореалистичности и геометрической точности, позволяя получать детализированные цифровые копии реальных объектов. Однако данный метод, как и BIM-моделирование, характеризуется значительными затратами времени на сбор исходных данных и обработку изображений, а также требует значительных вычислительных ресурсов и соблюдения строгих условий съёмки.

Методы нейросетевой генерации 3D-моделей, напротив, отличаются высокой скоростью работы и относительной простотой использования. Они позволяют создавать трёхмерные объекты на основе минимального количества исходных данных, включая отдельные изображения или текстовые описания. Вместе с тем такие модели часто уступают фотограмметрическим по точности геометрического воспроизведения, а также могут содержать упрощения или искажения формы, особенно при сложной архитектуре объектов.

В результате проведённого исследования было установлено, что наиболее рациональным и эффективным является комбинированный подход к генерации трёхмерных моделей архитектурных объектов. Он предпо-

лагает использование фотограмметрии для получения высокоточной и детализированной исходной модели с последующей нейросетевой обработкой, направленной на оптимизацию геометрии, устранение дефектов и повышение качества визуализации. Такое сочетание методов позволяет объединить преимущества высокой точности традиционных технологий и высокой скорости обработки, характерной для нейросетевых решений.

В ходе работы был выполнен сравнительный анализ современных методов генерации трёхмерных моделей архитектурных объектов, основанных на традиционных и нейросетевых подходах. Были реализованы практические эксперименты по созданию моделей архитектурных объектов с использованием фотограмметрии, традиционного ручного моделирования и нейросетевых технологий, а также проведена оценка их эффективности по ряду критериев, включая точность, скорость, трудоёмкость и качество результата.

Полученные данные показали, что внедрение нейросетевых технологий существенно ускоряет процесс создания и обработки трёхмерных моделей, снижает трудоёмкость выполнения проектных задач и расширяет возможности автоматизации в архитектурном моделировании. Наиболее перспективным направлением развития является интеграция традиционных и нейросетевых методов в единый рабочий процесс, ориентированный на повышение эффективности цифрового проектирования.

Результаты исследования могут быть использованы в архитектурном проектировании, цифровой реконструкции объектов, строительной отрасли, а также при создании виртуальных и цифровых городских сред, что подтверждает практическую значимость выполненной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Измайлов Т.Е. Искусственный интеллект как фактор трансформации современных технологий / Т.Е. Измайлов. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2026. — № 10 (613). — С. 11–13.
2. Габидулина Ч.Ф. Влияние искусственного интеллекта на профессии креативных индустрий // Общество и государство. 2024. №2 (46).
3. Аксентов В.А. Искусственный интеллект в повседневной жизни: развитие и перспективы // Вестник науки. 2023. №8 (65). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-v-povsednevnoy-zhizni-razvitiye-i-perspektivy> (дата обращения: 31.05.2026).
4. Воличенко О.В. Искусственный интеллект в творчестве современного архитектора (метод работы в Stable Diffusion через интерфейс ComfyUI): учебное пособие для вузов / О.В. Воличенко, Ц. Ван. — Санкт-Петербург: Лань, 2026. — 112 с.
5. Воличенко О.В. Искусственный интеллект в концептуально-прототипном проектировании / О. Воличенко, Т. Цурик // Проект Байкал, 2024. — Т. 21, № 79.С. 38–44.
6. Безменов В.М. Фотограмметрия. Построение и уравнивание аналитической фототриангуляции. / Учебно-методическое пособие для студентов физического факультета КГУ, обучающихся по специальности «Астрономогеодезия». КГУ, Казань, 2009, 86 с.
7. Руководство пользователя Agisoft Metashape Professional Edition, версия 2.2
8. Ахметшин Р.М. Информационное моделирование с применением Renga Architecture: учеб. пособие / Р.М. Ахметшин, Т.В. Печенкина, Т.Ф. Сулейманов. — Уфа: Изд-во УГНТУ, 2019. — 133 с.
9. Петелин А.Ю. 3D-моделирование в Google SketchUp — от простого к сложному: самоучитель / А.Ю. Петелин. — 2-е изд. — Москва: ДМКПресс, 2023. — 345 с.
10. Максимова Светлана Валентиновна, Семина Анастасия Евгеньевна, Райзих Екатерина Викторовна, Белякова Дарья Павловна. Тестирование искусственных нейронных сетей для задач в области архитектуры // АИТ. 2025. №4 (73).

© Злых Дмитрий Игоревич (d.zlykh@sibstrin.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА

MATHEMATICAL METHODS
OF MONITORING

**A. Kamalov
D. Kondratov
O. Ushakova**

Summary. In the presented material, a critical analysis of current approaches to the creation of mathematical support for systems for continuous monitoring of the state of technological complexes is carried out. The authors analyze the specifics of signal processing in the presence of stochastic interference and significant dimensionality of the monitored parameters. Particular attention is paid to the development of adaptive algorithms that allow maintaining the accuracy of estimates in conditions of information deficit. The paper presents key requirements for new models that are being implemented to ensure industrial safety, determines the evolution and current state of mathematical methods used in monitoring complex systems. Classical approaches (statistical control, regression analysis, spectral methods) and modern directions, including machine learning, Bayesian inference and the theory of optimal sensor placement, are analyzed. Particular attention is paid to the problems of processing big data, non-stationary processes, and adaptability of algorithms in real time. Key unresolved tasks and prospects for the development of monitoring methods are formulated.

Keywords: mathematical modeling, mathematical monitoring, technical condition, complex systems, measurement information, diagnostics.

Камалов Акмал Бахрамович

аспирант, Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.

kamalov.aktm@yandex.ru

Кондратов Дмитрий Вячеславович

доктор физико-математических наук, доцент,
Саратовский государственный технический

университет имени Гагарина Ю.А.

kondratovdv@yandex.ru

Ушакова Ольга Валерьевна

кандидат физико-математических наук, доцент,
Саратовский государственный технический

университет имени Гагарина Ю.А.

s_sov@rambler.ru

Аннотация. В представленном материале проводится критический разбор текущих подходов к созданию математического обеспечения для систем непрерывного слежения за состоянием технологических комплексов. Авторы анализируют специфику обработки сигналов при наличии стохастических помех и существенной размерности контролируемых параметров. Особое внимание уделяется разработке адаптивных алгоритмов, которые позволяют сохранять точность оценок в условиях информационного дефицита. В работе представлены ключевые требования к новым моделям, которые внедряются для обеспечения промышленной безопасности, определена эволюция и текущее состояние математических методов, применяемых в задачах мониторинга сложных систем. Анализируются классические подходы (статистический контроль, регрессионный анализ, спектральные методы) и современные направления, включающие машинное обучение, байесовский вывод и теорию оптимального размещения датчиков. Особое внимание уделено проблемам обработки больших данных, нестационарности процессов и адаптивности алгоритмов в реальном времени. Сформулированы ключевые нерешенные задачи и перспективы развития методов мониторинга.

Ключевые слова: математическое моделирование, математический мониторинг, техническое состояние, сложные системы, измерительная информация, диагностика.

Усложнение архитектуры современных промышленных агрегатов требует внедрения совершенных подходов к анализу их текущей деятельности. Современные технические комплексы состоят из множества взаимосвязанных элементов, которые выполняют задачи при агрессивном воздействии внешней среды. Научное сообщество признает приоритетным вектором переход от плановых ремонтов к стратегии управления ресурсом на основе объективных сведений о работоспособности оборудования. Реализация этой цели не представляется возможной без разработки точных математических алгоритмов, которые позволяют оценивать состояние систем в режиме реального времени [1, с. 31].

Создание математических моделей для слежения за поведением объектов наталкивается на серьезные трудности, которые связаны с поиском баланса между детальностью анализа и скоростью вычислений. Достоверность мониторинга определяется способностью программы учитывать нагрузки, которые выходят за рамки нормальной эксплуатации [2, с. 1]. При этом программная база должна обеспечивать интеграцию в контуры автоматики без потери общего быстродействия.

Процесс снижения объема измерительных сведений для разгрузки каналов передачи информации часто приводит к потере признаков предаварийного состояния.

Таблица 1.

Факторы, которые определяют эффективность математического мониторинга

Категория факторов	Характер воздействия на процесс контроля	Направление математического поиска
Физико-структурные	Гибридный характер динамических процессов и многосвязность узлов	Применение систем дифференциальных уравнений высокого порядка [3, с. 19]
Вычислительные	Жесткие ограничения на время принятия решений в темпе процесса	Оптимизация численных методов и редукция размерности моделей [1, с. 32]
Информационные	Наличие помех, пропуски данных и априорная неопределенность среды	Использование аппарата энтропийных оценок и робастных алгоритмов [4, с. 76]

Источник: Составлено авторами на основании [1,3,4,]

Существующие адаптивные системы допускового контроля оперируют лишь фактами выхода величин за установленные пределы, поскольку принимающая сторона часто лишена возможности строить глубокие прогнозы. В подобных условиях математическая модель становится инструментом, который позволяет восстанавливать картину функционирования объекта по отрывочным данным [4, с. 75].

Эволюция технического состояния сложного агрегата представляет собой необратимый процесс, параметры которого постоянно изменяются под воздействием эксплуатационных факторов. Математическое описание подобных трансформаций требует разработки кинетических уравнений, которые отражают скорость накопления повреждений в материалах и узлах [3, с. 28]. Исследователи подчеркивают важность разделения динамических процессов на быстрые составляющие рабочих циклов и медленные переменные, которые описывают постепенную деградацию системы.

Для получения адекватных оценок работоспособности необходимо учитывать многосвязность внутренних явлений и их взаимное влияние. Математический аппарат идентификации должен справляться с задачей восстановления параметров, которые невозможно измерить напрямую, через доступную телеметрию. В рамках системного анализа объект мониторинга рассматривается как совокупность подсистем, чье взаимодействие описывается матричными структурами в пространстве состояний [5, с. 200].

Представим математические формализмы для моделирования функциональной надежности в таблице 2.

Применение статистических методов анализа надежности позволяет перейти от жестких регламентов

Таблица 2.

Математические формализмы для моделирования функциональной надежности

Тип математической модели	Физическая интерпретация изменений	Прикладные задачи мониторинга
Дифференциальные системы	Убывание жесткости и изменение коэффициентов трения	Прогнозирование остаточного ресурса до критической точки [3, с. 37]
Марковские цепи	Вероятностные переходы между дискретными состояниями здоровья	Оценка риска возникновения внезапного отказа оборудования [6, с. 10]
Когнитивные структуры	Интеграция измерительных данных с экспертными знаниями	Интерпретация многомерной информации в условиях неопределенности [7, с. 27]

Источник: Составлено авторами на основании [3,6,7]

к гибкому прогнозированию моментов возникновения отказов. Важным инструментом здесь выступает аппарат теории вероятностей, который дает возможность рассчитывать мгновенную функцию надежности с учетом текущей наработки. Идентификация параметров распределения времени до поломки осуществляется на основе накопленной истории эксплуатации аналогичных технических средств [1, с. 34].

Для выявления скрытых аномалий в данных телеметрии привлекаются методы анализа временных рядов, которые позволяют отделять полезный сигнал от случайного шума [8, с. 12]. Сравнительная характеристика алгоритмов для выявления скрытых гармоник в данных мониторинга представлена в таблице 3.

Метрики оценки состояния объектов на основе теории информации приведем в таблице 4.

Нейронные сети и алгоритмы машинного обучения открывают новые возможности в области автоматической классификации состояний. Эти методы позволяют находить скрытые закономерности в больших массивах данных, которые остаются невидимыми для традиционных статистических критериев. Математический аппарат глубокого обучения обеспечивает построение нелинейных разделяющих поверхностей в многомерных пространствах диагностических признаков [7, с. 112]. Рост вычислительной мощности бортовых процессоров дает возможность внедрять обучаемые модели непосредственно в контуры управления, что существенно повышает автономность систем мониторинга. Использование подобных технологий требует тщательной подготовки обучающих выборок, поскольку достоверность распознавания дефектов зависит от качества исторических данных.

Таблица 3.
Сравнительная характеристика алгоритмов
для выявления скрытых гармоник
в данных мониторинга

Метод математического анализа	Специфика реализации процедуры	Особенности применения в системах контроля
Спектральное оценивание по методу Уэлча	Сегментация временного ряда и расчет средних периодограмм	Снижение дисперсии шума при сохранении общей структуры сигнала [2, с. 5]
Авторегрессионный анализ временных рядов	Моделирование динамики через линейную комбинацию прошлых отсчетов	Высокое разрешение частот на малых интервалах наблюдения [8, с. 45]
Кепстральная трансформация спектра	Логарифмическая обработка данных для поиска периодичности гармоник	Эффективное выделение сигналов от поврежденных редукторов

Источник: Составлено авторами на основании [2,8]

Таблица 4.
Метрики оценки состояния объектов на основе
теории информации

Индикатор сложности процесса	Математический смысл показателя	Роль в предиктивном анализе состояния
Спектральная энтропия	Мера равномерности энергетического распределения по частотам	Обнаружение признаков перехода к хаотическим режимам [4, с. 78]
Вейвлет-энтропия	Характеристика неопределенности вейвлет-коэффициентов	Фиксация структурных изменений в сигналах на ранних стадиях
Информационный выигрыш	Изменение меры неопределенности после обработки новых данных	Количественная оценка ценности измерительных сведений [4, с. 77]

Источник: Составлено авторами на основании [4]

Синтез оптимальных стратегий контроля представляет собой завершающий этап построения систем математического мониторинга. Математический аппарат теории управления позволяет определять наиболее рациональные интервалы проведения диагностических процедур, поскольку это дает возможность минимизировать затраты ресурсов при сохранении высокого уровня безопасности. Исследователи часто обращаются к принципу максимума Понтрягина, который позволяет находить оптимальные траектории переключения режимов работы систем защиты [9, с. 328]. В процессе применения подобных методов обеспечивается математическая строгость при выборе параметров настройки автоматики, так как каждое решение основывается

на минимизации целевого функционала рисков, что позволило систематизировать методы оптимизации стратегий математического мониторинга.

Таблица 5.
Методы оптимизации стратегий
математического мониторинга

Наименование подхода	Математическая основа метода	Результат применения в системах контроля
Динамическое программирование	Уравнение Беллмана для последовательных решений	Формирование гибких графиков технического обслуживания [9, с. 5]
Принцип максимума Понтрягина	Вариационное исчисление в пространстве состояний	Поиск граничных режимов для предотвращения отказов [9, с. 320]
Методы многокритериального поиска	Парето-оптимальность и весовые коэффициенты	Баланс между стоимостью контроля и глубиной диагностики [1, с. 34]

Источник: Составлено авторами на основании [1,9]

Разработка алгоритмов принятия решений в условиях нестационарности требует интеграции методов оптимального управления с аппаратом динамического программирования. Подобный синтез позволяет системе мониторинга адаптироваться к текущему износу оборудования и менять интенсивность сбора данных в зависимости от близости параметров к критическим отметкам. Математическая модель в этом случае выступает в роли предсказателя, который оценивает вероятность выхода системы из области безопасного функционирования на заданном горизонте времени [1, с. 31]. Эффективность управления ресурсом в такой постановке повышается за счет исключения избыточных проверок в периоды стабильной работы агрегатов.

Заключение

Перспективы развития отрасли связаны с созданием цифровых двойников, которые представляют собой динамические математические модели, функционирующие синхронно с реальным оборудованием. Эти структуры позволяют проводить виртуальные испытания и имитировать сценарии аварийных ситуаций, для того чтобы оценить устойчивость системы без угрозы для физического объекта [5, с. 410]. Математические методы мониторинга сегодня выходят на новый уровень, где алгоритмы идентификации и прогнозирования объединяются в единую интеллектуальную среду. В результате внедрения граничных вычислений вычислительная нагрузка переносится непосредственно на уровень первичных сенсоров, что существенно сокращает время реакции на критические изменения параметров [10, с. 1]. Определим перспективные векторы развития математического обеспечения мониторинга.

Таблица 6.

Перспективные векторы развития математического обеспечения мониторинга

Направление развития	Характеристика технологий анализа	Ожидаемый эффект для безопасности объектов
Цифровые двойники	Синхронизированные модели высокого порядка	Повышение точности прогнозирования деградации систем [5, с. 405]
Граничные вычисления	Реализация алгоритмов ИИ на микроконтроллерах	Снижение задержек при передаче экстренных сигналов [10, с. 3]
Гибридные модели	Сочетание физических уравнений и нейросетей	Обеспечение интерпретируемости выводов алгоритмов [7, с. 15]

Источник: Составлено авторами на основании [5,7,10]

Современное состояние проблемы математического мониторинга характеризуется переходом к гибридным схемам, которые объединяют достоинства аналитических уравнений и мощь нейросетевых классификаторов. Подобный симбиоз позволяет преодолеть ограничения «черных ящиков», поскольку физическая основа модели гарантирует корректность выводов в ситуациях, которые отсутствовали в обучающих выборках [11, с. 2]. Итогом развития математического инструментария станет создание полностью автономных систем слежения, которые способны не только фиксировать отклонения, но и самостоятельно оптимизировать режимы эксплуатации для продления срока службы сложных технических объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трутаев С.Ю. О построении адекватных и экономичных математических моделей в задачах постоянного мониторинга особо опасных и технически сложных объектов // Математическое моделирование и численные методы. 2021. № 1. С. 31–48. URL <https://cyberleninka.ru/article/n/o-postroenii-adekvatnyh-i-ekonomichnyh-matematicheskikh-modeley-v-zadachah-postoyannogo-monitoringa-osobo-opasnyh-i-tehnicheskikh-obektov> (дата обращения 22.04.2026).
2. Пюкке Г.А., Папшева С.Ю., Горева Т.И. Применение математического моделирования в технической диагностике // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия Технические науки. 2008. № 6. URL <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-matematicheskogo-modelirovaniya-v-tehnicheskoy-diagnostike> (дата обращения 22.04.2026).
3. Александрова И.Е., Александрова Т.Е. Математическое моделирование, системный анализ и синтез сложных технических объектов. Монография. Красноярск. Научно-инновационный центр, 2016. 207 с.
4. Винограденко А.М. Моделирование систем мониторинга технического состояния сложных технических объектов на основе методов теории энтропийных потенциалов // Техника средств связи. 2019. № 2. URL <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-sistem-monitoringa-tehnicheskogo-sostoyaniya-slozhnyh-tehnicheskikh-obektov-na-osnove-metodov-teorii-entropiynykh-potentsialov> (дата обращения 22.04.2026).
5. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М. Наука, 2006. 410 с.
6. Будко П.А., Винограденко А.М., Литвинов А.И., Юров А.С. Способ мониторинга предаварийного состояния контролируемых объектов // Датчики и системы. 2014. № 9. С. 8–14.
7. Королева М.Н. Мониторинг сложного технического объекта на основе когнитивных измерений. Тверь, 2019. 220 с.
8. Афанасьев В.Н., Юзбашев М.М. Анализ временных рядов и прогнозирование. Учебник. М. Финансы и статистика, 2019. 320 с.
9. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов. М. Наука, 2020. 328 с.
10. Оленская Т.Л. Актуальные вопросы применения цифровых технологий в медико-социальной реабилитации // Здоровье для всех. 2025. № 1. URL <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnye-voprosy-primeneniya-tsifrovyyh-tehnologiy-v-mediko-sotsialnoy-reabilitatsii> (дата обращения 22.04.2026).
11. Ельшин Л.А. Методические подходы к многоуровневой оценке деловой активности и ее влияние на промышленное развитие региональных экономических систем // Теоретическая и прикладная экономика. 2017. № 2. URL <https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskie-podhody-k-mnogourovnevoy-otsenke-delovoy-aktivnosti-i-ee-vliyanie-na-promyshlennoe-razvitiye-regionalnyh-ekonomicheskikh-sistem> (дата обращения 22.04.2026).

© Камалов Акмал Бахрамович (kamalov.akm@yandex.ru); Кондратов Дмитрий Вячеславович (kondratovdv@yandex.ru);

Ушакова Ольга Валерьевна (s_sov@rambler.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К РОУТИНГУ МОДЕЛЕЙ ДЕТЕКЦИИ КЛОНОВ КОДА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФЕРЕНСА ПРИ СОХРАНЕНИИ КАЧЕСТВА ДЕТЕКЦИИ

Комлев Данила Александрович

Университет науки и технологий МИСИС
(национальный исследовательский технологический
университет), г. Москва
komlevdaniila742@gmail.com

DEVELOPMENT OF A MODEL ROUTING APPROACH FOR CODE CLONE DETECTION AND INVESTIGATION OF METHODS FOR IMPROVING INFERENCE EFFICIENCY WHILE MAINTAINING DETECTION QUALITY

D. Komlev

Summary. Large software systems may contain code duplicates—fragments that solve the same problem. The presence of duplicates makes system maintenance more difficult and increases the likelihood of errors. Duplicates may differ, for example, in variable names, the structure of statements, or the way an algorithm is implemented. Modern neural network models demonstrate high performance in the task of detecting such duplicates. However, the use of more complex and higher-quality models requires significant computational resources and computation time, which limits their application in industrial development. This article discusses an approach to routing two code duplication detection models. One of them is lighter and is applied to all pairs of source code. The second is heavier and is used only if the first model is not sufficiently confident in its answer. The approach aims to reduce the computational and time costs of the calculation while maintaining the detection quality of the heavier model. An experiment was conducted to validate the proposed solution. The BigCloneBench dataset was used as input data. The proposed scheme achieved an F1 score of 0.8209, which corresponds to the result of fully applying GraphCodeBERT with a difference of less than 0.1 percentage points. The average processing time per pair decreased from 190.2 ms to 145.7 ms, corresponding to a 1.31-fold speedup. The results show that selectively applying a more complex model can reduce inference cost without compromising detection quality.

Keywords: code clones, code clone detection, Neuro-Linguistic Programming -NLP, CodeBERT, GraphCodeBERT, BigCloneBench.

Аннотация. Крупные программные системы могут содержать в себе клоны кода — фрагменты, решающие одну и ту же задачу. Наличие клонов затрудняет поддержку систем, повышает вероятность возникновения ошибок. Клоны могут отличаться, например, именами переменных, структурой операторов, способом реализации алгоритма. Современные нейросетевые модели показывают высокое качество на задаче поиска таких клонов. Однако применение тяжелых и более качественных моделей требует больших вычислительных ресурсов и времени на расчёт, что ограничивает их применение в промышленной разработке. В статье рассматривается подход к роутингу двух моделей детекции клонов кода. Одна из них — более легкая и применяется ко всем парам исходного кода. Вторая — более тяжелая и используется только в том случае, если первая модель недостаточно уверена в ответе. Подход направлен на уменьшение временных и вычислительных затрат на расчёт при сохранении качества детекции более тяжелой модели. Для проверки полученного решения был проведен эксперимент. В качестве исходных данных применялся датасет BigCloneBench. Предложенная схема достигла F1-меры 0,8209 что соответствует результату полного применения GraphCodeBERT с различием менее 0,1 п.п. Среднее время обработки одной пары снизилось с 190,2 мс до 145,7 мс, что соответствует ускорению в 1,31 раза. Результаты показывают, что выборочное применение более сложной модели может уменьшать стоимость инференса без ухудшения качества детекции.

Ключевые слова: клоны кода, детекция клонов, нейролингвистическое программирование (Neuro-Linguistic Programming — NLP), CodeBERT, GraphCodeBERT, BigCloneBench.

Введение

Клоны кода возникают, когда разработчик при реализации определенной функциональности не знает, что она уже реализована в системе и делает это ещё раз [1]. При дальнейших изменениях возникает риск несогласованных изменений, когда лишь один или несколько из всех клонов будут модифицированы. Также,

это замедляет развитие системы, так как разработчику при внесении изменений необходимо тратить время на поиск клонов.

Наиболее простые примеры клонов обнаруживаются по текстовому совпадению или по сходству синтаксических структур [2,3,4]. Однако, такие методы не подходят для случаев, где сильно меняется структура кода,

используются другие алгоритмы. Для поиска функционально эквивалентных фрагментов также применяются методы динамического анализа, основанные на сравнении результатов выполнения программ на наборах входных данных [5]. Другим направлением являются модели представления программного кода, обученные на больших корпусах кода и естественного языка [6]. Одна из таких моделей — CodeBERT. Она основана на архитектуре трансформера и используется в задачах, где требуется совместная обработка программного кода и естественного языка. Модель GraphCodeBERT является развитием модели CodeBERT, она дополнительно включает в себя информацию о потоке данных (Data Flow Graph, DFG), которая важна для анализа зависимостей между переменными и операциями. GraphCodeBERT выдает более качественное представление исходного кода, однако это модель требует большего времени на инференс и потребляет больше вычислительных мощностей, что затрудняет применение этой модели ко всей кодовой базе, особенно в крупных проектах. Однако, не для всех методов необходимо применение GraphCodeBERT. Некоторые клоны могут быть вычислены с помощью CodeBERT. Понять достаточно ли применения CodeBERT можно по значению вероятности клона. Если значение модели близко к 0 или 1, то модель сильнее уверена в ответе и ее ответ можно брать как финальный результат. Если же модель не уверена, то обрабатываемая пара методов передает GraphCodeBERT для получения финального результата.

Цель данной статьи в разработке и экспериментальной оценке подхода к роутингу моделей детекции клонов, позволяющего снизить время инференса и потребляемые ресурсы при сохранении качества модели GraphCodeBERT.

Обзор моделей CodeBERT и GraphCodeBERT

CodeBERT — предварительно обученная модель представления программного кода, построенная на трансформерной архитектуре [7]. Модель получает на вход последовательность токенов и формирует контекстное векторное представление фрагмента кода. В отличие от статических представлений, один и тот же токен может получать разные векторные представления в зависимости от окружающего контекста. Это важно для программного кода, где значение оператора или идентификатора определяются не изолированно, а через его использование внутри метода.

В задаче детекции клонов CodeBERT используется как энкодер программных фрагментов. Для каждого метода строится эмбединг, после чего пара методов описывается через признаки, полученные из соответствующих эмбедингов. Далее, эти признаки подаются классификатор, который оценивает вероятность принадлежности к классу клонов.

Ограничение CodeBERT связано с тем, что основным входным представлением для модели является токенизированный текст программы. Такое представление учитывает контекст токенов, но не задаёт явно зависимости между переменными и операциями. Поэтому для пар методов, отличающихся структурой, но сохраняющих общее поведение, одного текстового представления может быть недостаточно.

GraphCodeBERT — дополняет CodeBERT структурной информацией о программе [8]. В качестве такой информации используется граф потока данных. Он отражает зависимости между переменными: где значение определяется, где используется и как передаётся между операциями. За счёт этого модель получает не только последовательность токенов, но и сведения о связях внутри метода.

Использование графа потока данных делает GraphCodeBERT более пригодной для анализа случаев, где методы отличаются текстово, но близки по вычислительной логике. Для задачи поиска клонов кода это существенно: совпадение поведения может сохраняться даже при значительных изменениях в реализации.

Данные и подготовка выборки

В качестве исходного корпуса использовался датасет BigCloneBench [9]. Перед проведением экспериментов данные были очищены от дублирующихся пар и некорректно извлечённых фрагментов кода. Каждая запись приводилась к виду (code1, code2, label), где code1 и code2 — тексты сравниваемых методов, а label — бинарная метка функциональной эквивалентности.

Для обучения, подбора параметров и итоговой оценки использовались отдельные выборки: 8000 пар для обучения, 3000 пар для валидации и 3000 пар для тестирования. Разбиение выполнялось с фиксированным значением random_state = 42, что обеспечивает воспроизводимость эксперимента. Валидационная выборка использовалась для подбора пороговых значений и доли примеров, передаваемых на второй этап. Тестовая выборка использовалась только для итоговой оценки качества и времени обработки.

Предлагаемое решение

Решение основано на том, что не все пары методов требуют обработки наиболее сложной моделью. В задаче детекции клонов часть пар можно с высоким качеством классифицировать по признакам, построенным с помощью CodeBERT. Такие пары соответствуют случаям, где сходство или различие между методами достаточно хорошо отражается в токеновом и контекстном представлении кода. Для них применение GraphCodeBERT

не даёт принципиально нового сигнала, но увеличивает время обработки.

Более затратную модель GraphCodeBERT целесообразно использовать только для тех случаев, где первый этап не даёт достаточно уверенного решения. Это соответствует общей идее роутинга: вычислительно сложная модель применяется не ко всему множеству входных данных, а только к той его части, где требуется более глубокий анализ. В рассматриваемой задаче такой частью являются пары методов, расположенные близко к границе между классами клонов и неклонов. Задача сводится к построению правила, которое по результату первого этапа определяет, какую модель применять к конкретной паре методов.

Общая схема решения состоит из двух этапов. На первом этапе каждая пара методов обрабатывается с использованием CodeBERT. Для каждого метода строится эмбединг, после чего из двух эмбедингов формируется признаковое описание пары. Это описание подаётся в классификатор, который возвращает вероятность p того, что пара относится к классу клонов. Значение p используется не только как результат классификации, но и как показатель уверенности первого этапа.

Признаковое описание пары строится на основе эмбедингов двух методов. Пусть v_1 и v_2 — векторные представления сравниваемых методов размерности 768. Для передачи пары в классификатор формируется единый вектор признаков, включающий конкатенацию исходных эмбедингов $[v_1, v_2]$, поэлементную абсолютную разность $|v_1 - v_2|$, поэлементное произведение $v_1 * v_2$ и косинусное сходство между эмбедингами. Такое представление позволяет учитывать не только сами эмбединги методов, но и различия между ними, координатную согласованность и общую близость в векторном пространстве. Итоговая размерность признакового вектора составляет $768 * 4 + 1 = 3073$.

Для классификации используется LightGBM — модель градиентного бустинга над решающими деревьями [10]. Выбор такого классификатора связан с тем, что после формирования признаков задача принимает вид бинарной классификации по табличному векторному описанию пары методов. LightGBM позволяет учитывать нелинейные зависимости между компонентами признакового вектора и возвращает вероятность принадлежности пары к положительному классу. В экспериментах использовались параметры `n_estimators=400`, `num_leaves=64`, `min_child_samples=10`, `class_weight=balanced`, `random_state=42`. Параметр `class_weight=balanced` применялся из-за дисбаланса классов в выборке.

Если вероятность p близка к нулю, пара с высокой уверенностью относится к неклонам. Это означает, что

признаки, полученные на основе CodeBERT, не указывают на функциональную эквивалентность методов. Если вероятность p близка к единице, пара с высокой уверенностью относится к клонам. В этом случае первый этап, наоборот, фиксирует выраженное сходство между методами. В обоих случаях дополнительная обработка GraphCodeBERT считается избыточной, поскольку решение уже находится далеко от границы между классами.

Наиболее сложными считаются примеры, для которых первый классификатор демонстрирует наименьшую уверенность. Для оценки уверенности используется расстояние от вероятности p до границы принятия решения: чем меньше значение $|p - 0.5|$, тем менее устойчивым считается решение первого этапа. Именно такие случаи передаются на второй этап, где используется GraphCodeBERT. Выбор GraphCodeBERT для второго этапа связан с тем, что модель учитывает не только последовательность токенов, но и информацию о потоке данных, то есть зависимости между переменными и операциями внутри метода.

Для описания правила роутинга вводятся два пороговых значения t_1 и t_2 , где $t_1 < t_2$. Эти пороги задают границы области неопределённости. Если $p < t_1$, пара классифицируется как неклон без дополнительной обработки. Если $p > t_2$, пара классифицируется как клон. Если выполняется условие $t_1 < p < t_2$, решение первого этапа считается недостаточно уверенным, и пара передаётся на обработку GraphCodeBERT.

Таким образом, промежуток между t_1 и t_2 определяет область, в которой используется вторая модель. Чем шире эта область, тем больше примеров поступает на GraphCodeBERT и тем выше вычислительные затраты. В предельном случае, если область неопределённости охватывает почти всю выборку, схема приближается к полному применению GraphCodeBERT. Чем уже область неопределённости, тем меньше пар передаётся на второй этап и тем ниже среднее время обработки, но тем выше риск оставить сложные пары методов на первом этапе. Поэтому выбор порогов является основным механизмом управления компромиссом между качеством детекции и временем инференса.

Для задания порогов t_1 и t_2 используется настройка доли примеров, передаваемых на второй этап. Сначала задаётся требуемая доля таких примеров, после чего область дополнительной обработки определяется по распределению вероятностей, полученных на первом этапе. Такой способ напрямую связывает правило роутинга с вычислительной нагрузкой на GraphCodeBERT: если на второй этап передаётся $N\%$ пар, то остальные $100 - N\%$ пар обрабатываются только первым этапом. Это позволяет оценивать не только качество классификации, но и ожидаемое среднее время обработки.

Доля примеров для второго этапа подбирается на валидационной выборке. Для каждой пары после первого этапа вычисляется вероятность p принадлежности к классу клонов. Затем рассчитывается величина $|p - 0,5|$, показывающая близость предсказания к границе принятия решения. Чем меньше это значение, тем менее уверенным считается решение первого этапа. Если $|p - 0,5|$ мало, значит вероятность находится около 0.5, и классификатор не имеет выраженного преимущества в пользу одного из классов.

После вычисления этой величины пары упорядочиваются по возрастанию $|p - 0,5|$. В начале списка оказываются наиболее неопределённые примеры, то есть пары, для которых CodeBERT даёт наименее уверенное предсказание. Далее последовательно рассматриваются разные доли таких примеров, передаваемых на второй этап: от 0 % до 100 % с шагом 1 %. Для каждой доли строится своё разбиение выборки на область уверенных решений и область дополнительной обработки.

Для каждого варианта разбиения формируется итоговое предсказание каскадной схемы. Примеры, находящиеся вне области неопределённости, классифицируются только по результату CodeBERT. Примеры, попавшие в область неопределённости, дополнительно обрабатываются GraphCodeBERT, и для них итоговое решение принимается по результату второго этапа. После этого для всей выборки рассчитывается F1-мера, а также оценивается среднее время обработки одной пары с учётом доли примеров, передаваемых на GraphCodeBERT.

Такой подбор позволяет сравнивать конфигурации не только по качеству, но и по вычислительной стоимости. При малой доле передаваемых примеров время обработки минимально, но качество может быть ниже, поскольку часть сложных случаев остаётся на первом этапе. При большой доле качество приближается к полному применению GraphCodeBERT, но среднее время обработки растёт. Следовательно, оптимальная настройка должна сохранять качество на уровне полной GraphCodeBERT-модели, но использовать минимально возможную долю примеров для второго этапа.

В качестве ограничения на качество используется результат полного применения GraphCodeBERT. Допустимыми считаются только те конфигурации, в которых F1-мера каскадной схемы отличается от полной GraphCodeBERT-модели не более чем на 0,1 процентного пункта. Среди таких конфигураций выбирается вариант с минимальной долей примеров, передаваемых на второй этап. Это позволяет не просто подобрать наилучшее качество, а найти минимальную вычислительную нагрузку, при которой качество ещё сохраняется на уровне более сложной модели.

По результатам такого подбора на валидационной выборке в качестве рабочего значения была выбрана передача 30 % наиболее неопределённых пар. Это значение соответствует точке, в которой дальнейшее увеличение числа примеров, направляемых на GraphCodeBERT, уже не даёт существенного прироста качества, но продолжает увеличивать время обработки. Поэтому 30 % используется как компромиссная настройка: на второй этап попадает достаточная часть спорных примеров, а большая часть пар обрабатывается только первым этапом.

После выбора этой доли фактические пороги t_1 и t_2 определяются по распределению вероятностей p на валидационной выборке. Для каждой пары вычисляется значение $|p - 0,5|$, после чего пары упорядочиваются по возрастанию этой величины. В область дополнительной обработки включаются 30 % пар с наименьшими значениями $|p - 0,5|$. Значения t_1 и t_2 затем определяются как нижняя и верхняя границы вероятностей внутри выбранной области. Для выбранной конфигурации были получены значения $t_1 = 0,01$ и $t_2 = 0,52$.

Следовательно, пары с вероятностью $p < 0,01$ классифицируются на первом этапе как неклоны, пары с вероятностью $p > 0,52$ — как клоны, а пары с $0,01 < p < 0,52$ передаются на обработку GraphCodeBERT.

Результаты

Экспериментальная проверка проводилась на тестовой выборке BigCloneBench объёмом 3000 пар фрагментов программного кода. Из них 423 пары относятся к классу функционально эквивалентных методов, а 2577 пар — к отрицательному классу. Доля положительного класса составляет 14,1 %, поэтому для оценки качества использовалась F1-мера, учитывающая одновременно точность и полноту классификации.

В область уверенных решений CodeBERT попадает 2100 пар, что составляет 70 % выборки. Из них 199 пар являются положительными, то есть доля функционально эквивалентных методов в этой части составляет 9,5 %. В область неопределённых решений, передаваемую на обработку GraphCodeBERT, попадает 900 пар, или 30 % выборки. Среди них 224 положительных примера, что соответствует доле 24,9 %.

Такое распределение показывает, что в tail-части сосредоточена более сложная и более насыщенная положительными примерами область выборки. Доля функционально эквивалентных методов в ней почти в 2,6 раза выше, чем в conf-части. Это важно для оценки роутинга: на второй этап передаются не случайные пары, а именно та часть данных, где первый классификатор чаще сталкивается с неопределёнными случаями.

Качество моделей в разных зонах приведено в таблице 1.

Таблица 1.

Качество классификации в областях уверенных и неопределённых решений

Модель и зона обработки	F1	Precision	Recall	ROC-AUC
CodeBERT, conf-зона	0,8817	0,9480	0,8241	0,9555
CodeBERT, tail-зона	0,5579	0,6795	0,4732	0,8202
GraphCodeBERT, tail-зона	0,7685	0,7981	0,7411	0,9259

В зоне уверенных решений CodeBERT показывает $F1 = 0,8817$ при $\text{precision} = 0,9480$ и $\text{recall} = 0,8241$. Эти значения подтверждают, что значительная часть пар действительно может быть обработана без применения более сложной модели. Для таких примеров запуск GraphCodeBERT не является обязательным, поскольку первый этап уже даёт устойчивое решение.

Иная картина наблюдается в tail-зоне. На 30 % наиболее неопределённых примеров качество CodeBERT заметно ниже: $F1 = 0,5579$, $\text{precision} = 0,6795$, $\text{recall} = 0,4732$. Это означает, что в области, близкой к границе решения, представления CodeBERT хуже отделяют функционально эквивалентные пары от неэквивалентных. Особенно заметно снижение полноты: модель пропускает значительную часть положительных примеров.

Применение GraphCodeBERT к этой же tail-зоне повышает F1-меру до 0,7685. Precision возрастает до 0,7981, recall — до 0,7411, ROC-AUC — до 0,9259. Прирост F1 относительно CodeBERT на tail-части составляет 21,06 процентного пункта. Для проверки устойчивости результата был выполнен бутстрэппинг по tail-зоне: на каждой из 500 итераций из этой зоны формировалась выборка с возвращением, после чего рассчитывалась разность F1 между GraphCodeBERT и CodeBERT. Полученный 95 % доверительный интервал для прироста F1 составил [14,37; 26,60] процентного пункта. Это показывает, что улучшение на tail-зоне не является случайным.

Итоговая F1-мера каскадной схемы на всей тестовой выборке составила 0,8209. По сравнению с использованием только CodeBERT прирост равен 10,28 процентного пункта. При этом результат отличается от полного применения GraphCodeBERT менее чем на 0,1 процентного пункта. Следовательно, обработка 30 % наиболее неопределённых пар с помощью GraphCodeBERT позволяет выйти на уровень качества полной модели, не применяя её ко всей выборке.

Вычислительная эффективность оценивалась по среднему времени обработки одной пары. При измерении времени инференса на GPU NVIDIA T4 среднее время обработки одного фрагмента составило 44,31 мс

для CodeBERT и 95,12 мс для GraphCodeBERT. Поскольку одна пара содержит два фрагмента, время обработки пары составляет 88,62 мс для CodeBERT и 190,2 мс для GraphCodeBERT.

Для выбранной конфигурации, в которой 30 % пар передаются на второй этап, среднее время обработки одной пары рассчитывается как сумма времени обработки пары моделью CodeBERT и дополнительного времени обработки доли пар моделью GraphCodeBERT:

$$T = 88,62 + 0,3 \cdot 190,2 = 145,68 \text{ мс.}$$

Для сравнения, полное применение GraphCodeBERT ко всем парам требует 190,2 мс на пару. В данном сравнении под полным применением GraphCodeBERT понимается режим, в котором все пары обрабатываются только GraphCodeBERT, без предварительного этапа CodeBERT. Таким образом, роутинг обеспечивает ускорение примерно в 1,31 раза при сохранении качества на уровне полной GraphCodeBERT-модели.

Таблица 2.

Итоговое сравнение режимов обработки

Режим обработки	Доля пар, обрабатываемых GraphCodeBERT	F1	Среднее время обработки пары, мс
CodeBERT	0 %	0,7181	88,62
GraphCodeBERT	100 %	0,8210	190,2
CodeBERT → GraphCodeBERT	30 %	0,8209	145,7

Полученные результаты подтверждают неоднородность примеров в задаче обнаружения функционально эквивалентных методов. Для 70 % пар, попавших в область уверенных решений, CodeBERT обеспечивает высокое качество классификации. Для оставшихся 30 % пар качество CodeBERT существенно снижается, и именно на этой части выборки применение GraphCodeBERT даёт основной прирост.

Таким образом, эксперимент показывает, что более ресурсоёмкая модель требуется не для всех пар программных фрагментов. Её достаточно применять к области неопределённости, где базовая модель даёт менее устойчивые предсказания. При выбранной настройке роутинг сохраняет качество на уровне полного применения GraphCodeBERT, но сокращает среднее время обработки одной пары со 190,2 до 145,7 мс.

Заключение

В статье предложен подход к роутингу моделей детекции клонов кода, при котором CodeBERT применяется ко всем парам методов, а GraphCodeBERT используется

только для примеров, отнесённых к области неопределённых решений. Решение о передаче пары на второй этап принимается на основе вероятности, полученной первым классификатором, и расстояния этой вероятности до границы принятия решения.

Экспериментальная проверка на выборке BigCloneBench показала, что передача 30 % наиболее неопределённых пар на обработку GraphCodeBERT позволяет получить F1-меру 0,8209. Этот результат соответствует полному применению GraphCodeBERT с различием менее 0,1 процентного пункта. При этом среднее время обработки одной пары снижается со

190,2 до 145,7 мс, что соответствует ускорению примерно в 1,31 раза.

Полученные результаты показывают, что более ресурсоёмкая модель требуется не для всех пар программных фрагментов. Выборочное применение GraphCodeBERT к области неопределённости позволяет сохранить качество детекции на уровне полной модели и одновременно снизить вычислительные затраты. Дальнейшее развитие работы может быть связано с проверкой предложенного подхода на других языках программирования, корпусах данных и комбинациях моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Roy C.K., Cordy J.R. A survey on software clone detection research // Queen's School of Computing TR. — 2007. — Vol. 541. — № 115. — P. 64–68.
2. Kamiya T., Kusumoto S., Inoue K. CCFinder: A multilingual token-based code clone detection system for large scale source code // IEEE Transactions on Software Engineering. — 2002. — Vol. 28. — № 7. — P. 654–670.
3. Roy C.K., Cordy J.R. NICAD: Accurate detection of near-miss intentional clones using flexible pretty-printing and code normalization // 2008 16th IEEE International Conference on Program Comprehension. — IEEE, 2008. — P. 172–181.
4. Baxter I.D. et al. Clone detection using abstract syntax trees // Proceedings. International Conference on Software Maintenance. — IEEE, 1998. — P. 368–377.
5. Jiang L., Su Z. Automatic mining of functionally equivalent code fragments via random testing // Proceedings of the 18th International Symposium on Software Testing and Analysis. — 2009. — P. 81–92.
6. Allamanis M. et al. A survey of machine learning for big code and naturalness // ACM Computing Surveys. — 2018. — Vol. 51. — № 4. — P. 1–37.
7. Feng Z. et al. CodeBERT: A pre-trained model for programming and natural languages // Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP 2020. — 2020. — P. 1536–1547.
8. Guo D. et al. GraphCodeBERT: Pre-training code representations with data flow // arXiv preprint arXiv:2009.08366. — 2020.
9. Svajlenko J., Islam J.F., Keivanloo I., Roy C.K., Mia M.M. Towards a Big Data Curated Benchmark of Inter-Project Code Clones // 2014 IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution. — IEEE, 2014. — P. 476–480.
10. Ke G. et al. LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2017. — Vol. 30.

© Комлев Данила Александрович (komlevdaniila742@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СИСТЕМНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ С ЗАДВОЕННЫМИ ДАННЫМИ

SYSTEMIC MANAGEMENT AS A TOOL FOR SOLVING PROBLEMS WITH DATA DUALISM

O. Lobanov
V. Petrov

Summary. The paper examines the problem of data dualism as a systemic challenge for modern information systems. The analysis covers existing solutions — from built-in DBMS mechanisms to fuzzy matching methods and master data management systems. The results of studies by other authors on context-dependent search for fuzzy duplicates, data cleaning in business systems, identification of duplicate records in bibliographic and cadastral databases, as well as the use of large language models are presented. The limitations of each approach — reactivity, static nature, and lack of contextual sensitivity — are identified. The necessity of transitioning to data dualism management at the system management level as a strategy providing proactive protection and differentiated treatment of different types of multiplicity is substantiated. The application of artificial intelligence methods for automating identification, classification, and arbitration of data dualism is considered a promising direction.

Keywords: data dualism, deduplication, master data management, fuzzy matching, database management systems, digital culture, artificial intelligence.

Лобанов Олег Андреевич

Аспирант, преподаватель,
Московский государственный технологический
университет СТАНКИН, г. Москва
lobanov98oleg@mail.ru

Петров Валерий Евгеньевич

Кандидат технических наук, доцент,
Московский государственный технологический
университет СТАНКИН, г. Москва
cu58@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема задвоенности данных как системный вызов современным информационным системам. Проводится анализ существующих решений — от встроенных механизмов СУБД и специализированных инструментов дедупликации до методов нечеткого сравнения и систем управления мастер-данными. Приводятся результаты исследований других авторов, включая работы по контекстно-зависимому поиску нечетких дубликатов, методам очистки данных в бизнес-системах, выявлению задвоенных записей в библиографических и кадастровых базах данных, а также применению больших языковых моделей для нормализации данных. Выявляются ограничения каждого подхода, обусловленные статичностью, реактивностью и отсутствием контекстной чувствительности. Обосновывается необходимость перехода к управлению задвоенностью на уровне систем управления как единственной стратегии, обеспечивающей проактивную защиту и дифференцированное отношение к разным типам множественности. В качестве перспективного направления рассматривается применение методов искусственного интеллекта для автоматизации идентификации, классификации и арбитража задвоенностей.

Ключевые слова: задвоенность данных, дедупликация, управление мастер-данными, нечеткое сравнение, системы управления базами данных, цифровая культура, искусственный интеллект.

Введение

Проблема задвоенности данных — наличия двух или более записей, относящихся к одной сущности реального мира, — сопровождает информационные системы с момента их возникновения. Как отмечают А.А. Князева, И.Ю. Турчановский и О.С. Колобов [1], при объединении электронных каталогов различных библиотек одна и та же публикация может описываться несколькими библиографическими записями, которые существенно отличаются по структуре, степени полноты, содержат перестановки слов, опечатки и т.д. На протяжении десятилетий исследователи разрабатывали методы обнаружения и устранения повторяющейся информации. Однако, несмотря на значительный прогресс, проблема не только не решена, но и приобретает новые

измерения в условиях цифровой трансформации, многоконтурного учета и распределенных архитектур.

Встроенные механизмы систем управления базами данных

Наиболее фундаментальный и широко распространенный класс решений представлен встроенными механизмами систем управления базами данных (СУБД), работающими на уровне физического хранения данных, и обеспечивают первичную защиту от определенных типов задвоенностей.

Ограничения уникальности являются наиболее простым и эффективным средством предотвращения точных дубликатов. Они работают автоматически, не требу-

ют дополнительных решений и гарантируют отсутствие точных дублей. Однако они бессильны против нечетких дубликатов — записей, которые относятся к одной сущности, но имеют незначительные различия в написании (например, «ООО Ромашка» и «ООО «Ромашка»»). Они также не позволяют реализовать контекстно-зависимую уникальность (например, разные типы контрагентов могут иметь одинаковые ИНН в разных странах). Кроме того, ограничения уникальности требуют, чтобы уникальные поля были обязательно заполнены, что не всегда возможно.

Первичные ключи являются частным случаем ограничений уникальности, обеспечивающим уникальную идентификацию каждой записи. Внешние ключи поддерживают ссылочную целостность, гарантируя, что значение в одной таблице соответствует существующей записи в другой. Однако эти механизмы не решают проблему дублирования сущностей напрямую.

Для ситуаций, где декларативных ограничений недостаточно, используются триггеры — процедуры, автоматически выполняемые при вставке, обновлении или удалении записи. Триггер может выполнить поиск потенциальных дубликатов с использованием нечеткого сравнения. Однако триггеры сложны в разработке и отладке, могут снижать производительность и не решают проблему ретроспективной очистки уже накопленных дублей.

Для эффективного поиска потенциальных дублей используются специализированные типы индексов, включая полнотекстовые индексы и индексы на основе n-грамм. Однако индексы сами по себе не предотвращают создание дублей — они лишь ускоряют их обнаружение при последующих проверках.

Исследования других авторов в области обнаружения дубликатов

Контекстно-зависимый поиск нечетких дубликатов. В работе С.В. Тарасова и В.В. Буракова «Контекстно-зависимый способ поиска нечетких дубликатов в реляционных базах данных» (2015) авторы отмечают принципиальное ограничение реляционных баз данных: они не имеют встроенных механизмов для распознавания нечетких дубликатов [2]. Предложенный метод использует n-граммы в сочетании со смысловыми весами атрибутов, что позволяет вычислять взвешенную схожесть составных идентификаторов объектов. Ключевая особенность — возможность реализации средствами PostgreSQL. Это приближает решение проблемы дубликатов к стандартной инженерной практике, а не оставляет её на уровне разовых реактивных мер. Однако метод требует настройки весов атрибутов под конкретную предметную область и не решает проблему динамического расхождения проекций.

Многокритериальный метод выявления нечетких дубликатов. Группа исследователей под руководством А.М. Андреева предложила метод обнаружения нечеткого «дублирования» в потоке текстовых сообщений на основе метода опорных векторов (SVM) [3]. Достоинство метода — применимость к потоковым данным и способность работать с текстами естественного языка, ограничение — необходимость построения обучающей выборки для настройки классификатора, что требует трудозатрат и наличия экспертных знаний в предметной области.

Выявление дубликатов в библиографических базах данных. А.А. Князева, И.Ю. Турчановский и О.С. Колобов предложили специализированный метод для электронных каталогов и библиотек [1]. Ограничение подхода — необходимость построения обучающей выборки, которое можно обойти при наличии уникальных идентификаторов (ISBN, ISSN).

Модель «Пространство словосочетаний». А.А. Кушкин, Т.В. Игнатова и А.А. Смирнов разработали модель для поиска неполных дублей новостных текстов, использующую интегральный коэффициент на основе модифицированных коэффициентов Дайса-Сёренсена [4].

Методы очистки и нормализации данных. Р.М. Веремейчик и А.А. Часовских рассматривают очистку данных как обязательный этап предобработки, выделяя дедупликацию в качестве ключевой задачи [5]. Авторы предлагают использовать хеш-функции и механизмы сопоставления строк с учетом опечаток, подчеркивая связь дедупликации с нормализацией данных.

Выявление дублированных кадастровых данных. А.В. Гранкин и М.Б. Фомин рассматривают проблему на примере Единой учётной базы Росреестра, предлагая использовать методы OLAP-анализа и формирования многомерных витрин данных [6].

Применение LLM для поиска дублей. П.Д. Волосников и Э.К. Сагилова предлагают подход на основе больших языковых моделей (LLM) для нормализации данных нормативно-справочной информации (НСИ) [7]. LLM обеспечивают глубокое понимание контекста и позволяют идентифицировать схожие записи даже при различных формулировках. Ключевая особенность — полная автоматизация процесса.

Решение проблемы дублей в «1С: Бухгалтерии». Е.В. Крайнева отмечает, что при работе со справочниками номенклатуры и контрагентов в 1С часто возникают ситуации, когда один и тот же объект реального мира описывается разными наименованиями: из-за перестановки слов, сокращений, наличия лишней информации, орфографических ошибок или копирования из других

систем вместе с лишними символами. Всё это приводит к некорректной информации в базе данных и, в запущенных случаях, к потере прибыли из-за проведения операций с не теми данными. Автор предлагает использовать методы на основе векторного представления текста с разбиением на биграммы и вычислением косинусной дистанции [8]. Аналогичные решения предлагает Е.В. Фальтина, реализуя проактивный подход с предложением пользователю существующих записей перед созданием новой [9, 10].

Методика оценки качества данных реестра операторов. С.Е. Духовенский в статье «Методика оценки качества данных реестра операторов персональных данных» предложил методику количественной оценки качества данных, выявляющую зоны с высокой концентрацией задвоенных записей [11].

Обобщение. Проведенный анализ позволяет сделать несколько ключевых выводов. Большинство решений ориентированы на поиск уже сформировавшихся дублей, а не на предотвращение их возникновения. Почти все авторы отмечают проблему настройки параметров под конкретную предметную область. Большинство подходов игнорируют динамический характер задвоенности, работая со статическим срезом данных. В работах, посвященных практической реализации (особенно в контексте 1С), прослеживается переход от реактивной очистки к проактивному предотвращению — это направление наиболее перспективно.

Инструменты дедупликации и очистки данных

Простейшие инструменты дедупликации основаны на поиске полных совпадений. Более продвинутые используют метрики нечеткого сравнения строк: расстояние Левенштейна, коэффициент Жаккара, косинусное расстояние. Особое место занимают n-граммные методы, устойчивые к перестановкам слов и небольшим опечаткам [2].

Проблема квадратичной сложности попарных сравнений $O(N^2)$ решается с помощью блочных методов (blocking), когда записи разбиваются на блоки по некоторому признаку. Недостаток — возможный пропуск дублей на границах блоков.

В практике российских предприятий особое место занимают инструменты, встроенные в системы семейства 1С. Обработка «Поиск и удаление дублей» позволяет обнаруживать дублирующиеся элементы в справочниках, однако носит реактивный характер [12, 13].

На стыке дедупликации и интеграции данных находятся инструменты нечеткого сопоставления записей (fuzzy matching, record linkage), используемые при сли-

янии баз данных и построении «золотых записей». Пример — обработчик «Дубликаты и противоречия» в платформе Loginot, описанный в работе Д. Обуховой [14].

Системы управления мастер-данными (MDM)

MDM-системы предназначены для создания и поддержания «золотой записи» для каждой ключевой сущности предприятия. Они интегрируют данные из различных источников, выполняют очистку и нормализацию, разрешают конфликты по заданным правилам. MDM-подход решает проблему задвоенности на уровне всей организации, но правила разрешения конфликтов часто слишком жестки и не учитывают контекст. MDM-системы дороги и сложны во внедрении, не решая проблему задвоенностей, возникающих в оперативном режиме в реальном времени.

Принципиальные ограничения существующих решений

Несмотря на разнообразие инструментов и методов, все существующие решения объединяет ряд принципиальных ограничений, которые не позволяют считать проблему задвоенности решенной.

Первое ограничение — реактивность. Подавляющее большинство решений ориентированы на обнаружение и устранение уже возникших дублей. Они не предотвращают создание новых дублей в будущем, создавая «эффект маятника» — после каждой чистки данных через некоторое время дубли накапливаются снова, требуя повторных усилий. Даже проактивные подходы, предлагаемые в некоторых работах, ограничены рамками конкретной системы и не решают проблему на уровне архитектуры.

Второе ограничение — статичность. Существующие решения работают с фиксированным срезом данных, не отслеживая динамику расхождения проекций во времени. Между тем, две записи, которые в момент создания были идентичны, могут со временем разойтись из-за независимых обновлений. Классическая дедупликация этого не фиксирует. Как отмечают Тарасов и Бураков, даже контекстно-зависимые методы не учитывают временной аспект существования записей [2].

Третье ограничение — игнорирование полезной задвоенности. Все существующие решения исходят из постулата, что любая множественность вредна. Однако существуют целые классы систем, где множественность проекций функционально необходима — бухгалтерская двойная запись, цифровые двойники, многоконтурный учет. Применение стандартных процедур дедупликации к таким случаям разрушает механизмы контроля и верификации.

Четвертое ограничение — отсутствие контекстной чувствительности. Существующие решения не учитывают контекст использования данных. Одна и та же пара записей может быть вредным дублем для налоговой отчетности и полезной множественностью для управленческого учета. Классическая дедупликация не делает такого различия. Даже в работах, где контекст учитывается, речь идет о семантике атрибутов, а не о контексте принятия управленческих решений.

Пятое ограничение — отсутствие сопровождения. Нет механизмов фиксации точки бифуркации, истории расхождения, прогнозирования достижения критических порогов. Большинство авторов ограничиваются констатацией факта наличия дубля и предложением методов его устранения, не рассматривая жизненный цикл задвоенности как процесс.

Предложение: переход к управлению задвоенностью на уровне систем управления

Осознание ограничений существующих решений приводит к необходимости принципиально иного подхода. Вместо разовых актов дедупликации и локальных инструментов предлагается переход к управлению задвоенностью на уровне систем управления как непрерывному, проактивному, контекстно-чувствительному процессу.

Первый принцип — смещение фокуса с удаления на идентификацию. Система должна не просто находить похожие записи, а определять, являются ли они вредным дублем, нейтральной множественностью или полезной комплементарной проекцией.

Второй принцип — непрерывное сопровождение. Система должна фиксировать точку бифуркации, отслеживать динамику расхождения проекций, прогнозировать достижение критических порогов и оповещать пользователя о приближении опасной зоны.

Третий принцип — контекстно-зависимый арбитраж. В зависимости от цели использования данных должна выбираться та проекция, которая легитимна в данном контексте.

Четвертый принцип — интеграция с существующей инфраструктурой. Управление задвоенностью может быть реализовано как надстройка над существующими СУБД, без их замены.

Пятый принцип — комплексный подход. Управление на уровне систем должно дополняться формированием цифровой культуры персонала и стандартизацией информационных баз. Только синергия этих трех направлений создает устойчивую, многоуровневую систему защиты от задвоенностей.

Перспективное направление: применение искусственного интеллекта

Методы искусственного интеллекта открывают новые возможности для решения задачи управления задвоенностью. Как показали П.Д. Волосников и Э.К. Сагилова, применение LLM позволяет автоматизировать процесс поиска дублей на качественно новом уровне [7].

Методы машинного обучения могут автоматически определять оптимальные веса атрибутов на основе размеченных примеров. Методы контролируемого обучения могут классифицировать выявленные пары записей по типам. Рекуррентные нейронные сети могут прогнозировать динамику расхождения проекций. LLM способны понимать семантическую близость текстов на уровне, недоступном традиционным методам. В системах с измеримыми последствиями может применяться обучение с подкреплением.

Однако применение ИИ не является панацеей. Модели требуют размеченных данных, могут быть непрозрачными и воспроизводить системные ошибки прошлого. Наиболее перспективен гибридный подход, где ИИ решает подзадачи, требующие адаптивности, а критические решения остаются за формальными правилами и человеком.

Заключение

Проблема задвоенности данных имеет долгую историю, и за это время создано множество решений — от простых ограничений уникальности в СУБД до сложных систем управления мастер-данными и методов машинного обучения, включая работы представленных авторов. Каждое из этих решений имеет свою область эффективности, но ни одно не является универсальным. Все они объединены общими ограничениями: реактивностью, статичностью, игнорированием полезной множественности и отсутствием контекстной чувствительности.

Выход видится в переходе к управлению задвоенностью на уровне систем управления — непрерывному, проактивному, контекстно-зависимому процессу, включающему идентификацию, сопровождение, арбитраж и интеграцию с существующей инфраструктурой. Такой подход позволяет не только бороться с последствиями, но и предотвращать возникновение вредных задвоенностей, сохраняя полезную множественность.

Перспективным направлением является интеграция методов искусственного интеллекта для автоматизации трудоемких задач. Однако ИИ должен рассматриваться как инструмент, усиливающий возможности человека. Только комплексный подход, объединяющий технологические, организационные и человеческие аспекты, способен обеспечить устойчивое решение проблемы задвоенности данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Князева А.А., Турчановский И.Ю., & Колобов О.С. (2013). Выявление дубликатов в библиографических базах данных. В Труды XV Всероссийской научной конференции RCDL'2013 (с. 276–282). Ярославль: ЯрГУ.
2. Тарасов С.В., & Бураков В.В. (2015). Контекстно зависимый способ поиска нечётких дубликатов в реляционных базах данных. Информационно-управляющие системы, (2), 76–81.
3. Андреев А.М., Березкин Д.В., Козлов И.А., & Симаков К.В. (2015). Многокритериальный метод выявления нечетких дубликатов в потоке текстовых сообщений. Системы и средства информатики, 25(1), 34–53.
4. Кукушкин А.А., Игнатова Т.В., & Смирнов А.А. (2022). Модель «Пространство словосочетаний» для поиска неполных дублей новостных текстов. Известия Тульского государственного университета. Технические науки, (10), 160–165.
5. Веремейчик Р.М., & Часовских А.А. (2025). Методы очистки и нормализации данных в бизнес-системах. В Сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции (с. 18–21). Пенза: Наука и Просвещение.
6. Гранкин А.В., & Фомин М.Б. (2019). Метод выявления «задвоенных» кадастровых данных в Единой учётной базе Росреестра. В Материалы Всероссийской конференции с международным участием (с. 227–229). Москва: РУДН.
7. Волосников П.Д., & Сагилова Э.К. (2025). Обоснование применения LLM для решения задачи поиска дублей при создании инструмента нормализации данных НСИ. В Сборник докладов XIX международной конференции студентов и молодых ученых (с. 853–855). Екатеринбург: Издательский Дом «Ажур».
8. Крайнева Е.В. (2023). Решение проблемы дублей в справочниках «1С: Бухгалтерия» с помощью математических алгоритмов. В Материалы Всероссийской научно-практической конференции (с. 26–28). Кемерово: КузГТУ.
9. Фальтина Е.В. (2024). Решение проблемы дублей в справочниках базы данных «1С: Бухгалтерия» с помощью математического алгоритма расчета косинусной дистанции. В Миссия интеллектуалов в современном мире (с. 416.1–416.6). Кемерово: КузГТУ.
10. Фальтина Е.В. (2024). Решение проблемы дублей в справочниках на примере базы данных «1С: Бухгалтерия» компании ООО «Реверс Плюс». В Сборник материалов XVI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых (с. 31688.1–31688.4). Кемерово: КузГТУ.
11. Духовенский С.Е., Пушкин П.Ю., & Никульчев Е.В. (2024). Методика оценки качества данных реестра операторов персональных данных. International Journal of Open Information Technologies, 12(1), 129–136.
12. Как обнаружить и убрать задвоения в 1С 8. (б.д.). ITCONS99.RU. URL: <https://itcons99.ru/chasto-zadavaemye-voprosy/kak-obnaruzhit-i-ubrat-zadvoeniya-v-1s-8/> (дата обращения: 20.01.2026).
13. Парфёнова К. (2021). Дубли в 1С: Управление торговлей — как найти и свернуть. 1eska.ru. URL: <https://1eska.ru/projects/publications/upravlenie-torgovley/dubli-v-1s-upravlenie-torgovley-kak-nayti-i-svernuty/> (дата обращения: 20.01.2026).
14. Обухова Д. (2023). Очистка данных с помощью обработчика «Дубликаты и противоречия». Loginom.ru. URL: <https://loginom.ru/blog/duplicates-contradictions> (дата обращения: 20.02.2026).

© Лобанов Олег Андреевич (lobanov98oleg@mail.ru); Петров Валерий Евгеньевич (cu58@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ПОСАДКИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ И ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

AUTOMATION OF THE PROCESS OF MANAGING INFORMATION SUPPORT FOR AIRCRAFT LANDINGS BASED ON THE USE OF INTELLIGENT SYSTEMS AND DIGITAL TWINS

A. Maslov

Summary. This paper examines methods for using intelligent systems to manage landing information support for civil aviation aircraft, as well as the concept of a «digital twin» for predicting landing system performance and planning its modernization. A method for solving a problem based on a precedent-based knowledge base is described, allowing the use of accumulated experience to generate recommendations for the crew. A multi-criteria alternatives (MCAA) method is presented, enabling the rapid, automated selection of the optimal solution from a set of possible options based on a set of criteria. An approach based on an optimality criterion is presented, formulating the landing information support problem as an optimization problem for an objective function under given constraints.

Keywords: intelligent systems, landing information support, multi-criteria choice, precedent method, digital twin, optimization, flight automation.

Маслов Александр Константинович

Аспирант, Московский государственный технический
университет гражданской авиации
aleksandr.maslov.00@mail.ru

Аннотация. В данной работе рассматриваются методы применения интеллектуальных систем для управления информационным обеспечением посадки воздушных судов гражданской авиации, а также концепция «цифрового двойника» для прогнозирования работы системы посадки и планирования ее модернизации. Описан метод решения задачи по прецеденту на основе информационной базы знаний, позволяющий использовать накопленный опыт для выработки рекомендаций экипажу. Изложен метод многокритериального выбора альтернатив (МКВА), обеспечивающий оперативный автоматизированный выбор оптимального решения из набора возможных вариантов по совокупности критериев. Приведен подход на основе критерия оптимальности, формулирующий задачу информационного обеспечения посадки как задачу оптимизации целевой функции при заданных ограничениях.

Ключевые слова: интеллектуальные системы, информационное обеспечение посадки, многокритериальный выбор, метод прецедентов, цифровой двойник, оптимизация, автоматизация полётов.

Введение

Этап захода на посадку и посадки воздушного судна гражданской авиации (ВС ГА) является одним из самых важных в полёте из-за ограничения временного ресурса и точности представляемых данных. Таким образом, решение задачи информационного обеспечения ВС на этапе посадки приобретает особую важность.

В условиях развития авиационных технологий, значимый вклад в повышение безопасности полетов могут внести интеллектуальные системы поддержки экипажа. Интеллектуальная система (ИС) определяется как программно-технический комплекс, способный решать неформализованные заранее задачи на основе заложенных знаний и поступающей информации о сложившейся ситуации. Типичная бортовая ИС включает базу знаний, механизм вывода решений и интеллектуальный интерфейс с экипажем [1,2].

В авиационных приложениях выделяют несколько уровней таких систем: от систем, действующих по заложенным правилам в рамках конкретных функций, до обобщаемых систем с адаптацией к среде и самосовершенствованием алгоритмов. На самом верхнем уровне ИС способна изменять методы контроля и цели функционирования в зависимости от обстановки [1].

Даже при штатной работе посадочных средств ВС возможно возникновение факторов, требующих оперативного вмешательства (ухудшение видимости, деградация/отказ наземного оборудования, внешние вмешательства и др.). В таких случаях ИС должна оперативно выполнить следующие шаги [3]:

- 1) идентифицировать возникшую угрозу среди множества событий;
- 2) подобрать способ парирования данной угрозы;
- 3) адаптировать выбранный способ под возможности имеющихся бортовых и наземных средств.

Построить универсальный, заранее заданный алгоритм для всех сценариев затруднителен, поэтому целесообразно рассматривать гибридные подходы, совмещающие знания, многокритериальную оценку и оптимизацию [4]. Далее в статье будут рассмотрены методы, которые могут быть использованы бортовой ИС для решения задачи информационного обеспечения безопасной посадки в реальном времени:

- метод решений по прецедентам,
- метод многокритериального выбора альтернатив
- оптимизационный метод.

Также рассматривается применение цифровых двойников для прогнозирования состояния системы посадки и планирования ее модернизации.

Метод решения задачи по прецеденту

Данный метод опирается на успешно накопленные знания и опыт по решению подобных ситуаций (прецедентов), аналогично текущей ситуации. Если в базе знаний ИС имеется информация о ранее успешно решенных сходных задачах (прецедентах), то новая проблема может решаться по аналогии с ними. Предлагается следующий алгоритм решения сложившегося прецедента:

1. Собрать информацию о текущей проблеме в виде ситуационного вектора $\overline{SV}$, характеризующего ключевые параметры обстановки (ввод лингвистических переменных);
2. Найти в базе знаний несколько схожих ситуаций;
3. Отобрать из них подмножество тех, где прецедент был успешно решен;
4. Сформировать для каждого прецедента ситуационный вектор с переменными, описывающими обстановку и матрицу знаний (набор существенных параметров и исходов) на основе экспертных данных и экспериментов;
5. Вычислить степень близости текущего прецедента к каждому прецеденту и ранжировать их по степени пригодности.

Для количественной оценки сходства прецедентов предлагается процедура расчёта приоритетов и ввод лингвистических переменных, описывающих условия ситуации. Для примера возьмем посадку ВС ГА:

X_1 — положение кромки облачности (низкая/нормальная/высокая база облаков),

X_2 — видимость ВПП (нет/видна),

X_3 — боковой ветер (допустимый/превышен),

X_4 — попутный ветер (отсутствует/слабый/сильный),

X_5 — состояние ВПП (сухая/влажная/мокрая).

Каждой переменной X сопоставлен набор термов и численная шкала (универсальное множество) для перевода качественных оценок в количественные. Например:

ЛП-1 «Край облачности»: термы {низкая, нормальная, высокая} соответствуют высоте облаков в диапазоне 0–2000 м;

ЛП-2 «Видимость ВПП»: {не видно, видно} по шкале 0–10 баллов видимости;

ЛП-3 «Боковой ветер»: {допустимый, выше допустимого} относительно порога, например 15 м/с, по шкале до 50 м/с, и т.д.

Далее рассчитываются расхождения между текущим $\overline{SV}$ и $\overline{SV}$ каждого прецедента.

В результате ИС определяет приоритетный прецедент, наиболее похожий случай из базы знаний и выдает экипажу рекомендацию действовать по аналогичному сценарию. Таким образом, метод прецедентов позволяет использовать ранее накопленный опыт и экспертные знания для выбора оптимальной стратегии в сложившихся нетипичных или аварийных условиях.

Метод многокритериального выбора альтернатив

В базе знаний может не оказаться подходящего прецедента, так как каждая ситуация уникальна. В таком случае можно воспользоваться методом многокритериального выбора альтернатив (МКВА), при условии его удовлетворения специфике использования [5]. Основой данного метода выступает теория принятия решений с несколькими критериями, адаптированная для работы на борту без привлечения внешних экспертов, так как в условиях ограниченного временного ресурса нет возможности для обращения к ним.

В системе заранее закладываются следующие множества:

- множество потенциальных альтернатив $A_1, A_2, \dots, A_j$;
- множество критериев $K_1, K_2, \dots, K_j$ для их оценки.

Первоначально при подготовке базы знаний привлекаются эксперты, определяющие возможные альтернативы и значимость критериев. Например, эксперты могут задать, что в посадочной ситуации на первом месте будет критерий безопасности, на втором ограничения на прием ВС в аэропорту и т.д. Однако во время реального захода на посадку нет возможности корректировки значимости с участием экспертов, поэтому система действует автономно. Важно предоставить экипажу возможность вручную изменять приоритеты критериев прямо

во время посадки (например, в нетипичной ситуации сделать упор на минимизацию времени или на расход топлива).

Для решения такой задачи, предлагается следующий алгоритм:

На первом этапе необходимо сформировать подходящее множество альтернатив A_i , применимо к текущей ситуации и множество критериев K_j для их оценки.

На втором этапе необходимо произвести оценку всех альтернатив по каждому из критериев. Каждой паре $A_i - K_j$ ставится в соответствие количественная μ_{ij} оценка, характеризующая, насколько альтернатива A_i удовлетворяет критерию K_j . В результате получается матрица оценок $|\mu_{ij}|$ размером $n \times s$ (где n — число альтернатив, а s — число критериев).

На третьем этапе необходимо произвести оценку самих критериев, учитывая сложившуюся ситуацию: $K_j \rightarrow \beta_n$.

На четвёртом этапе необходимо вычислить агрегированные показатели альтернатив с учетом весовых коэффициентов критериев для данного случая. Приоритет альтернативных вариантов, можно представить как сумму всех критериев: $P_i = \sum_{j=1}^s \beta_n \mu_{ij}$.

На пятом этапе происходит выбор альтернативного решения A_k , имеющего максимальный приоритет $P_k = \max_i P_i$. Именно это решение будет рекомендовано ИС экипажу для реализации.

Таким образом, метод МКВА позволяет автоматически выбирать наилучшую альтернативу на основе сразу нескольких критериев, что повышает безопасность и эффективность принимаемого решения.

Важно отметить, что для корректного применения этого метода в реальном времени, база знаний ИС должна содержать априорные знания экспертов по возможным альтернативам и их оценке, поскольку привлечение экспертов непосредственно в ситуации с ограниченным временным ресурсом невозможно.

Метод МКВА учитывает быстро меняющуюся ситуацию на борту ВС, поэтому необходимо предоставлять возможность экипажу оперативно изменять веса критериев по мере изменения внешних условий, однако набор альтернатив и критериев должен оставаться фиксированным. Для динамичной обработки информации и корректировки альтернатив с учетом сложившихся текущих данных об окружающей обстановке, применяются специальные программные модули — интеллектуальные агенты [6]. Это позволяет автономно вычислять значение критериев K_j для каждой альтернативы в за-

данных условиях. В результате моделирования всех сгенерированных альтернатив формируется матрица критериев, передающаяся в блок расчета приоритетов. Такой подход интегрирует МКВА с элементами ситуационного моделирования, обеспечивая более точный выбор оптимального решения.

Метод на основе критерия оптимальности

В данном методе информационная система формулирует и решает задачу оптимизации по ключевому параметру. Суть метода можно описать так: выбрать такую стратегию информационного обеспечения посадки (или конфигурацию системы), чтобы максимизировать (или минимизировать) некоторый ключевой параметр при соблюдении ограничений по другим параметрам.

Например, можно поставить цель максимизировать вероятность безопасной посадки $P_1 \rightarrow \max$ при ограничении затрат $C \leq C_{\text{зат}}$ и времени задержки информации $\leq t_{\text{max}}$. Если выбрать цель минимизировать затраты, то можно поставить такие ограничения $C \rightarrow \min$ при условии, что безопасность $P \geq P_{\min}$ и надёжность связи $R \geq R_{\min}$.

В общем виде задачу максимизации или минимизации можно описать так:

$$P_1 \rightarrow \max, P_2 \geq \gamma_2, P_3 \geq \gamma_3, \dots, P_n \geq \gamma_n \quad (1)$$

или

$$P_1 \rightarrow \min, P_2 \geq \gamma_2, P_3 \geq \gamma_3, \dots, P_n \geq \gamma_n, \quad (2)$$

где: P_1 — оптимизируемый параметр, $P_2, \dots, P_n$ — остальные показатели системы с заданными пороговыми значениями $\gamma_2, \dots, \gamma_n$. В контексте информационного обеспечения посадки в качестве P_i рассматриваются: вероятность безаварийного завершения посадки, экономические затраты на обеспечение (стоимость оборудования, эксплуатация, зарплата персонала), технические показатели (точность навигации, устойчивость связи, помехозащищённость) и др. Внешние условия — интенсивность воздушного движения в аэропорту, сложность рельефа, вероятность неблагоприятной погоды, наличие помех (атмосферных, рельефных, антропогенных) — рассматриваются как исходные данные, влияющие на ограничения и выбор оптимального решения.

На рис. 1 приведена блок-схема алгоритма, реализующего этот метод.

Метод использования цифровых двойников

В последние годы широкое распространение получила концепция использования цифровых двойников. Применимо к авиации отметим два основных направления:

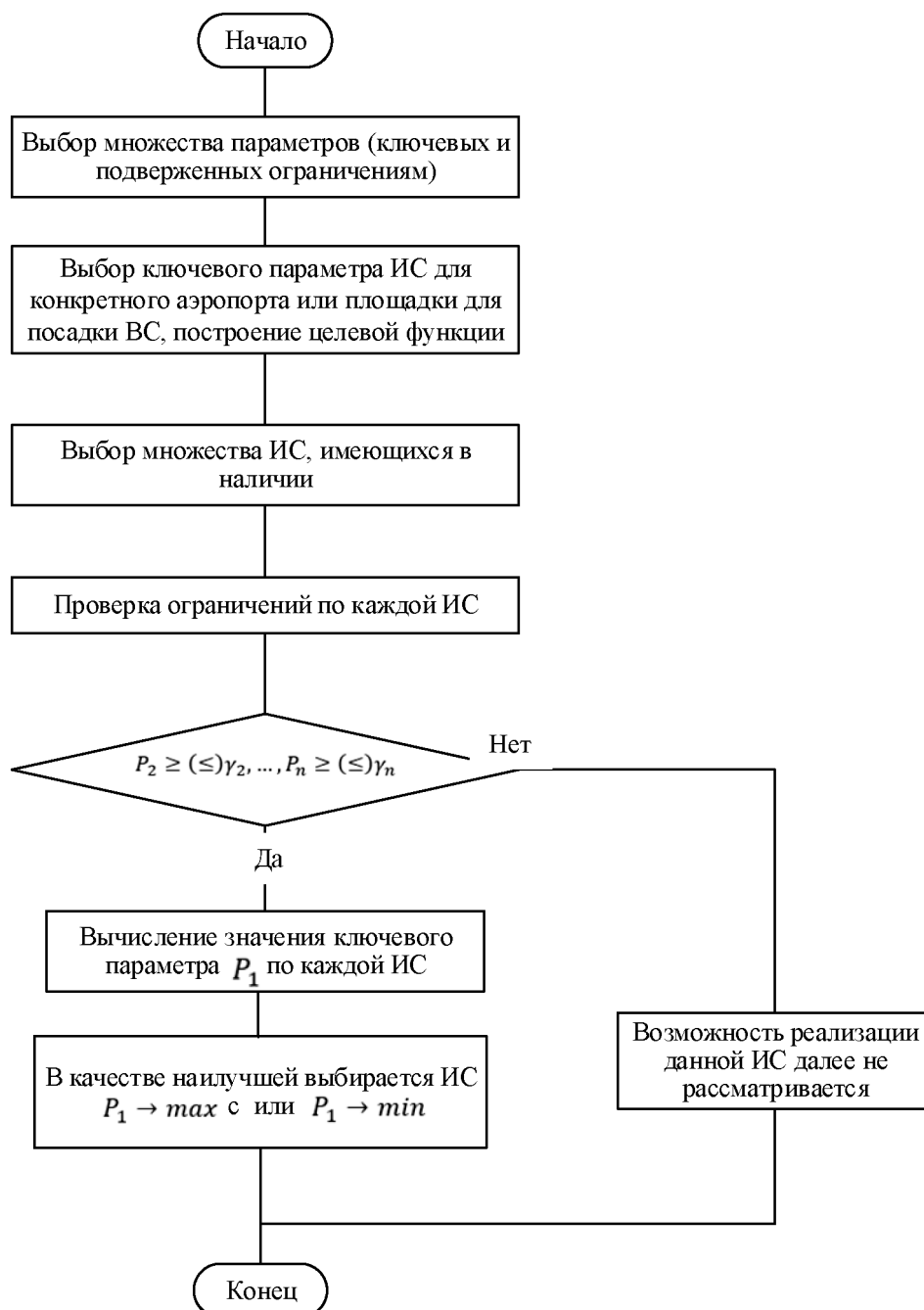


Рис. 1. Блок-схема алгоритма информационного обеспечения посадки ВС ГА на основе критерия оптимальности

- Комплексная цифровая модель уже созданного физического объекта, содержащая информацию обо всех его дефектах, уязвимостях и особенностях, которая регулярно обновляется в процессе эксплуатации [7].
- Модель, формируемая на основе данных с датчиков реального устройства (системы) и позволяющая имитировать функционирование объекта в реальном времени [3].

Накопление и анализ данных физического объекта в разных состояниях и за длительный период эксплуа-

тации дает возможность прогнозировать поведение системы в будущем и своевременно проводить ее модернизацию с целью повышения эффективности. Создание виртуальных копий информационных систем посадки позволяет минимизировать риски их использования и повысить качество функционирования за счет тестирования изменений в цифровой модели перед внедрением в реальный комплекс.

Одной из задач, решаемых с помощью цифрового двойника, является интеграция данных от нескольких датчиков для повышения точности данных о состоянии

ВС ГА. Для примера решим следующую задачу: лайнер заходит на посадку с неизвестной истинной скоростью a . На борту ВС ГА имеются два независимых датчика скорости, которые одновременно выдают оценки скорости x_1 и x_2 . Погрешности измерений подчиняются нормальному закону распределения с известными дисперсиями σ_{v1}^2 и σ_{v2}^2 .

В рамках цифрового двойника применим критерий максимума апостериорной информации для оценки параметра a на основе двух измерений. Если совместная плотность вероятности наблюдаемых значений при параметре a обозначена как $p(x_1, x_2 | a)$, то оптимальная оценка $\hat{a}$ определяется из условия максимума этой величины. Для нормального распределения ошибок плотности имеют вид:

$$p(x_1|a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{v1}^2}} \exp\left[-\frac{(x_1 - a)^2}{2\sigma_{v1}^2}\right] \quad (3)$$

и

$$p(x_2|a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{v2}^2}} \exp\left[-\frac{(x_2 - a)^2}{2\sigma_{v2}^2}\right] \quad (4)$$

Перемножая эти плотности и найдя максимум по a , получаем оптимальную оценку скорости в виде взвешенного суммирования весовых коэффициентов:

$$\hat{a} = \frac{\frac{x_1}{\sigma_{v1}^2} + \frac{x_2}{\sigma_{v2}^2}}{\frac{1}{\sigma_{v1}^2} + \frac{1}{\sigma_{v2}^2}}. \quad (5)$$

Таким образом, наилучшая оценка $\hat{a}$ представляет собой среднее значение измеренных скоростей, взвешенных обратно пропорционально их дисперсиям. Чем точнее датчик (меньше σ_v), тем больший вес имеет его показание в итоговой оценке. Погрешность оценивания $a - \hat{a}$ распределена по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием, её дисперсия рассчитывается как $D[\hat{a}] = \left(\frac{1}{\sigma_{v1}^2} + \frac{1}{\sigma_{v2}^2}\right)^{-1}$.

В практическом применении данный подход может включать в себя большее количество источников информации и более сложные задачи оценки состояния самолета при посадке). Использование цифрового двойника позволяет осуществлять обработку подобных данных в режиме реального времени, повышая достоверность и надежность информационного обеспечения.

Другой задачей может выступать прогнозирование функционирования системы посадки и обоснование ее модернизации в будущем. Предлагается следующий алгоритм:

На первом этапе необходимо произвести анализ влияния потенциальной модернизации на ключевые параметры системы. Каждый из параметров имеет свой вес, который влияет на эффективность работы всей системы. Обозначим через x_i величину изменения i -го параметра системы в результате модернизации, а через w_i вес данного параметра. Тогда каждому изменению можно сопоставить показатель $\gamma_i = x_i w_i$, характеризующий эффект (улучшения или ухудшения) по i -му параметру.

На втором этапе необходимо произвести оценку рисков, связанных с внесением изменений. Выделяются такие основные риски:

- технический риск — возможность снижения надежности или появления несовместимости компонентов системы
- временной риск — простой системы на период доработки
- экономический риск — стоимость модернизации

Методом экспертных оценок определяются соответствующие показатели риска r_j для каждого из рассматриваемых аспектов. Из этих показателей составляются вектора риска: $R = (r_1, \dots, r_n)$.

На третьем этапе вычисляется показатель сложности модернизации. Он зависит от количества и трудоемкости отдельных операций, необходимых для внедрения улучшений. Представим перечень необходимых действий как $op_k = (op_1, \dots, op_l)$ и их условных стоимостных коэффициентов y_k , отражающих относительную трудозатратность или цену каждой операции. Тогда суммарный показатель сложности модернизационного процесса оценивается суммой $M_{sl} = \sum_{k=1}^l y_k op_k$.

На четвертом этапе формулируется критерий выбора оптимального плана модернизации. Предпочтительным считается тот вариант, для которого показатель сложности M_{sl} минимален, при условии, что достигнуты допустимые улучшения по всем ключевым параметрам (изменения γ_i не меньше требуемого эффекта) и уровни риска не превышают установленных ограничений. На основании изложенного выведем правило:

$$M_{sl} \rightarrow \min, \quad \forall i : \gamma_i \geq \gamma_{пред}, \quad r_i \leq r_{пред},$$

где $\gamma_{пред}$ обозначает минимально допустимый запрос на улучшение i -го показателя, а $r_{пред}$ обозначает максимально допустимый уровень риска (по каждому фактору риск не должен превышать этого порога).

Таким образом, с помощью цифрового двойника можно промоделировать различные сценарии обновления системы посадки ВС ГА, количественно оценить их

последствия и выбрать оптимальный план модернизации на основании необходимого критерия. Применение данного подхода позволит в будущем поддерживать системы в актуальном состоянии, своевременно улучшая их характеристики при минимальных затратах и без снижения безопасности полетов.

Заключение

В данной статье представлены современные методы интеллектуальной поддержки посадки воздушных судов, основанные на интеграции экспертных знаний, алгоритмов принятия решений и технологий цифровых двойников. Предложенный метод прецедентов дает возможность экипажу воспользоваться накопленным опытом аналогичных полетов для преодоления внештатных ситуаций на посадке. Метод многокритериального выбора обеспечивает автоматическую выработку рекомендаций на основе сразу нескольких критериев эффективности, что повышает обоснованность принимаемых

решений в сложной обстановке. Оптимизационный подход позволяет в явном виде задать приоритетные показатели качества информационного обеспечения и формально обосновать выбор состава и структуры системы посадки, удовлетворяющих требованиям безопасности и экономической эффективности. Комплексирование данных разных датчиков на основе цифрового двойника демонстрирует существенное увеличение точности оценки параметров полета, что напрямую влияет на процедуру посадки. Применение цифровых двойников открывает новые возможности для прогнозирования работы авиационных систем: имитация поведения системы посадки в виртуальной среде позволяет выявлять уязвимые места, оценивать риски и принимать решения о модернизации на основе анализа. Все перечисленные методы и подходы в совокупности направлены на повышение безопасности и качества информационного обеспечения посадки ВС ГА за счет применения элементов искусственного интеллекта и современных информационных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федун Б.Е. Бортовые интеллектуальные системы тактического уровня для антропоцентрических объектов (примеры для пилотируемых летательных аппаратов). — Москва: Де Либри, 2018. — 246 с.
2. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. — М.: Радио и связь, 1976.
3. Бобков И.А., Бурдина А.А., Нехрест-Бобкова А.А. Моделирование неопределенности при помощи нейронных сетей // *Ars Administrandi* (Искусство управления), 2023, т. 15, № 1, с. 45–59.
4. Указ Президента РФ от 10.10.2019 № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» (вместе с «Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года») // СПС КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_335184/
5. Федун Б.Е., Юневич Н.Д. Оперативный способ решения задач многокритериального выбора альтернативы в базах знаний бортовых оперативно-советующих экспертных систем. *ТисУ*, №3, 2021, стр.111–128.
6. Федун Б.Е. Интеллектуальные агенты в базах знаний бортовых оперативно-советующих экспертных систем типовых ситуаций функционирования антропоцентрического объекта. // *Изв. РАН. ТисУ*. 2019. № 6. С.90–102.
7. Шведенко В.Н., Мозохин А.Е. Применение концепции цифровых двойников на этапах жизненного цикла производственных систем // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2020. Т. 20. № 6. С. 815–827.

© Маслов Александр Константинович (aleksandr.maslov.00@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИНТЕГРАЛЬНАЯ МЕТРИКА ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УСПЕХА В EDTECH

INTEGRAL METRIC OF EDUCATIONAL SUCCESS IN EDTECH

K. Nosov

Summary. The article examines the problem of fragmented assessment of educational success in digital educational platforms. It is shown that the existing approaches mainly rely on disparate academic and behavioral metrics, ignoring the psychometric characteristics of students, which limits the possibilities of a comprehensive analysis. The purpose of the study is to substantiate the concept of an integral metric (supermetrics) that combines academic, psychometric, and behavioral indicators into a single index. A methodological approach to the construction of supermetrics based on factor analysis, weighted indexes and machine learning methods is proposed, allowing to integrate heterogeneous data and identify hidden patterns. A hypothesis is formulated about the higher validity of the integral indicator in comparison with individual metrics. The directions of application of supermetrics are considered: diagnostics, forecasting, personalization of training and support of managerial decisions. The limitations of the approach are noted, including data requirements, interpretability, and ethical aspects.

Keywords: integral metrics, educational success, EdTech, learning analytics, psychometrics, academic performance, behavioral data, learning personalization, adaptive education.

Носов Кирилл Андреевич

Аспирант, ФГАОУ ВО Уральский федеральный
университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург
nosowork@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема фрагментарности оценки образовательного успеха в цифровых образовательных платформах. Показано, что существующие подходы преимущественно опираются на разрозненные академические и поведенческие метрики, игнорируя психометрические характеристики обучающихся, что ограничивает возможности комплексного анализа. Целью исследования является обоснование концепции интегральной метрики, объединяющей академические, психометрические и поведенческие показатели в единый индекс. Предложен методологический подход к построению метрики на основе факторного анализа, взвешенных индексов и методов машинного обучения, позволяющих интегрировать гетерогенные данные и выявлять скрытые закономерности. Сформулирована гипотеза о более высокой валидности интегрального показателя по сравнению с отдельными метриками. Рассмотрены направления применения интегральной метрики образовательного успеха: диагностика, прогнозирование, персонализация обучения и поддержка управленческих решений. Отмечены ограничения подхода, включая требования к данным, интерпретируемость и этические аспекты.

Ключевые слова: интегральная метрика, образовательный успех, EdTech, learning analytics, психометрия, академическая успеваемость, поведенческие данные, персонализация обучения, адаптивное образование.

Введение

В современном мире онлайн-образование становится всё более популярным: люди удалённо получают профессии, готовятся к экзаменам, проходят переквалификацию. Это является эффективным и доступным способом приобретения новых знаний и умений. С ростом EdTech (интеграции цифровых технологий и инструментов в сферу образования, для того чтобы сделать обучение более персонализированным и удобным) происходит резкое увеличение объёма доступных данных о студентах. Компании собирают большие массивы информации: от результатов тестов и выполнения домашних заданий до паттернов взаимодействия с платформой и эмоциональных реакций. Но эти данные часто анализируются разрозненно, что ограничивает возможности для комплексной оценки образовательных траекторий.

В большинстве случаев психометрические показатели в онлайн-образовании либо вовсе не собираются

образовательными платформами, либо остаются вне сферы аналитики. В работе Psychometrics of MOOCs: Measuring Learners' Proficiency авторы подчёркивают, что массовые открытые онлайн-курсы используют простые прокси-метрики (процент правильно решённых заданий, число завершённых модулей), вместо использования психологически обоснованных моделей измерения способностей и знаний [1]. Даже если отдельные данные о мотивации студентов, их стрессоустойчивость, уровень удовлетворённости собираются, они редко используются в системном анализе [2]. В результате образовательные платформы ограничиваются лишь академическими и поведенческими метриками, что снижает возможности комплексной оценки и прогнозирования успеха обучения.

Целью данного исследования является изучение возможности, перспективности разработки и применения интегральной метрики, которая объединяет в себе ключевые показатели в единый индекс. Такая метрика позволит расширить инструментарий диагностики

и прогнозирования, а также обеспечит более глубокое понимание факторов, определяющих успешность и устойчивость образовательных траекторий.

Теоретическая основа

Чтобы эффективно измерять результаты обучения учащихся в удаленных условиях, необходимо пересмотреть традиционные методы оценки, потому что они могут не учитывать уникальные проблемы, связанные с виртуальными средами. В последнее время EdTech привлекает внимание подход с использованием психометрических оценок, которые предназначены для оценки когнитивных способностей, личностных черт и других индивидуальных характеристик, предоставляя ценную информацию о потенциале учащихся и стилях обучения [3]. Другое исследование [4] показывает, что включение психометрических данных в модели анализа обучения повышает точность прогнозирования на 15 %, что говорит о ценности таких оценок в персонализированном образовании.

В последние годы в EdTech наблюдается устойчивый интерес к разработке интегральных метрик образовательного успеха — комплексного показателя, которых объединяет несколько частных традиционных академических показателей (оценки, успеваемость, прогресс на курсе) и психометрических измерений (мотивация, когнитивные способности).

Классические метрики успеха в онлайн-образовании обычно опираются на количественные показатели: средний балл, доля выполненных заданий и/или просмотренных занятий, количество студентов, завершивших курс. Но такие индикаторы отражают лишь часть образовательной динамики и не учитывают психические, мотивационные и стратегические факторы (самооценку, метакогнитивные навыки и др.) [5].

Большинство опубликованных научных работ по-прежнему узко измеряют академический успех как академическую успеваемость; более конкретно, в виде оценок и среднего балла. Это проблематично для исследователей и практиков: во-первых, исследования показали, что оценки и средний балл не всегда являются точными показателями обучения или роста когнитивных способностей [6]. Обоснованность этой меры крайне важна для специалистов в сфере образования не только из-за возросшего общественного внимания к «истинной» ценности образования, но и потому, что обучение студентов занимает центральное место в задачах образовательной организации.

В связи с этим возникли инициативы измерения «целостного» студента (holistic student) и «полного» успеха (whole-student success), что предполагает расширенные

метрики, включая благополучие, саморегуляцию, вовлечённость и социальные навыки [7].

EdTech-платформы предоставляют данные о поведении учащихся (время активности, регулярность, порядок действий и др.), что позволяет дополнить традиционные показатели «произведением цифрового следа» (digital trace). Например, регулярность посещений, время реакции, закономерности использования платформы. Несмотря на это, существующие метрики остаются разрозненными и фрагментарными, что существенно ограничивает их аналитическую ценность.

Во-первых, большинство исследований и практических решений опираются на единичные показатели: посещаемость, успеваемость, вовлечённость, выполнение заданий или активность в системе. Каждый из этих индикаторов фиксирует лишь отдельный аспект образовательного процесса, не позволяя оценить его целостно [8].

Во-вторых, разнородные метрики часто строятся на несопоставимых источниках данных — цифровом следе (clickstream), результатах тестов, анкетных опросах, поведенческих паттернах. Эти данные различаются по шкале, контексту и степени надёжности, что делает затруднительным прямое сопоставление и приводит к фрагментации интерпретаций [9]. В результате аналитические модели рискуют быть перегруженными несогласованными показателями, каждый из которых описывает лишь часть картины.

Кроме того, множество метрик без теоретически обоснованной структуры создаёт иллюзию информативности, тогда как фактически мешает выделить ключевые зависимости. При избыточном количестве показателей наблюдается эффект «шума данных» — увеличение объёма информации не повышает точность анализа, а наоборот, усложняет выявление причинно-следственных связей [10].

Таким образом, практика работы с множеством отдельных метрик, которая сейчас существует и активно применяется, приводит к фрагментарному, а не системному пониманию образовательного успеха. Она фиксирует локальные проявления, но не объясняет внутренние механизмы, не позволяет увидеть динамику и взаимосвязи между когнитивными, мотивационными и поведенческими компонентами обучения.

Методологический подход

Как уже было сказано выше, современные подходы к оценке образовательного успеха демонстрируют высокую степень фрагментарности: каждый показатель отражает лишь часть когнитивной, эмоциональной или поведенческой динамики обучения. В ответ на этот ме-

тодологический разрыв предлагается разработка интегральной метрики, способной объединить разнотипные данные (академические, психометрические и поведенческие) в единый показатель с высокой аналитической и прогностической ценностью.

Основной идеей данного подхода является многомерная интеграция гетерогенных показателей в одну метрику, которая обеспечивает комплексную оценку образовательного успеха.

Основанием для подобной интеграции служат концепции композитных индексов [11] и моделей латентных факторов, используемых в психометрии и образовательной аналитике. Данные подходы позволяют объединять разнородные данные, до этого переводя их в сопоставимую шкалу и выявляя скрытые закономерности, которые не являются очевидными при анализе отдельных метрик.

Гипотеза: интегральный показатель образовательного успеха, который объединяет в себе академические, психометрические и поведенческие метрики, будет более достоверно и полно отражать уровень образовательных достижений и вовлечённости учащихся, чем отдельные метрики, рассматриваемые по отдельности.

Основанием для выдвижения гипотезы является предположение о большом количестве аспектов образовательного успеха, который не может быть адекватно описан только лишь академическими результатами или поведенческой активностью. Обучение включает в себя

когнитивные, мотивационные, эмоциональные и социальные компоненты, взаимодействие которых формирует целостный образовательный опыт.

Агрегирование разнородных показателей в единый интегральный индекс позволяет: во-первых, устранить фрагментарность в интерпретации данных; во-вторых, выявить устойчивые взаимосвязи между академическими и психометрическими аспектами обучения; в-третьих, повысить валидность оценки образовательного успеха за счёт учёта как внешних факторов (результаты, активности), так и внутренних (мотивация, самооэффективность).

Таким образом, предполагается, что интегральная метрика обеспечит более репрезентативную и сбалансированную оценку образовательного процесса, которая будет отражать и результаты, и механизмы их достижения.

Для объединения множества показателей в единую метрику могут применяться классические статистические и современные вычислительные методы. Эти подходы имеют собственные методологические основания, преимущества и ограничения, что определяет разумность их применения в зависимости от целей исследования, объёма данных и требуемого уровня интерпретируемости результатов.

В таблице 1 представлены основные методы, используемые для построения интегральных метрик образова-

Таблица 1.

Сравнительный анализ методов построения интегральной метрики образовательного успеха

Метод	Цель и суть подхода	Преимущества	Ограничения
1. Факторный анализ и метод главных компонент (РСА)	Выделение латентных факторов, лежащих в основе множества коррелированных метрик. Позволяет выявить структуру взаимосвязей между академическими, психометрическими и поведенческими показателями.	— Снижает размерность данных. — Повышает теоретическую согласованность показателей. — Позволяет выделить базовые факторы образовательного успеха.	— Требует линейности связей между переменными. — Не отражает нелинейные зависимости. — Зависит от корректного выбора числа факторов.
2. Индексы с весами на основе корреляций и предсказательной силы	Построение взвешенного индекса, где каждый показатель имеет вес, пропорциональный его вкладу в общий результат (успеваемость, вовлечённость и др.).	— Обеспечивает дифференцированный учёт влияния метрик. — Прост в интерпретации. — Может быть применён к данным любой природы (академические, психометрические, поведенческие).	— Зависит от выбора целевой переменной. — Может терять устойчивость при мультиколлинеарности. — Требует экспертной валидации весов.
3. Методы машинного обучения (взвешенный композитный скоринг)	Формирование нелинейных композитных оценок на основе больших массивов данных с автоматическим определением весов признаков.	— Учитывает сложные, нелинейные зависимости. — Автоматически определяет оптимальные веса. — Высокая адаптивность и точность при больших данных.	— Снижение интерпретируемости результатов. — Требует больших выборок и вычислительных ресурсов. — Сложность воспроизводимости без контроля параметров модели.

Источник: Составлено автором на основании [11; 12; 13]

тельного успеха, их ключевые характеристики и особенности применения.

Таким образом, комбинация статистических и машинных методов позволяет не только агрегировать показатели, но и обеспечить их аналитическую валидность, сохраняя баланс между интерпретируемостью и точностью модели.

Возможные направления применения интегральной метрики образовательного успеха

Интегральная метрика образовательного успеха призвана выполнять две функции:

1. Диагностическую: фиксировать текущее состояние обучающегося с учётом когнитивных, мотивационных и поведенческих факторов;
2. Прогностическую: позволять предсказывать будущие результаты на основе совокупности характеристик, а не отдельных наблюдений.

Интегральная метрика образовательного успеха может использоваться не только как инструмент оценки, но и как основа для принятия управленческих и педагогических решений в цифровой образовательной среде. Благодаря объединению академических, психометрических и поведенческих данных в единый показатель, интегральная метрика открывает возможности для более точной и персонализированной поддержки учащихся.

Данный показатель может применяться для динамической настройки траектории обучения — адаптации сложности, объёма и скорости подачи материала в зависимости от уровня подготовленности, темпа усвоения и эмоционального состояния студента. Такой подход позволяет повысить эффективность обучения за счёт индивидуализации и своевременной коррекции нагрузки.

Интегральный показатель может выступать в качестве входной переменной для прогнозных моделей, связанных с поведением и результатами учащихся. Например:

1. прогноз вероятности продления подписки или участия в следующем курсе;
2. оценка риска оттока или временного снижения активности;
3. выявление вероятности успешной сдачи экзамена или достижения целевого результата по предмету.

Интегральная метрика может использоваться для раннего выявления учащихся с признаками снижения вовлечённости, выгорания или демотивации. Анализ изменений интегрального показателя во времени позволяет своевременно направлять таких учеников на индивидуальные консультации, адаптировать учебный план или предложить эмоциональную поддержку. Это делает данную метрику инструментом не только измерения, но и профилактики проблем в обучении.

Интегральная метрика может стать основой для создания или улучшения геймификации в образовательном процессе — построение рейтингов, достижений и наград, отражающих не только академический прогресс, но и личностные качества обучающегося. Такой подход делает систему вознаграждения более справедливой и мотивирующей, снижает конкуренцию по узким показателям и усиливает внутреннюю мотивацию к обучению.

Можно сказать, что интегральная метрика способна выполнять многофункциональную роль: от аналитического и прогностического инструмента до механизма адаптации, мотивации и сопровождения учащихся в цифровой образовательной экосистеме.

Обсуждение

Разработка, внедрение и использование интегральной метрики образовательного успеха представляют собой серьёзный и существенный шаг в направлении комплексной диагностики и персонализации обучения. Но стоит понимать, что данный метод, как и любой интеграционный подход, имеет как очевидные преимущества, так и существенные ограничения, требующие внимательного анализа.

Преимущества подхода

Интегральная метрика позволяет объединить академические результаты, когнитивные характеристики и психометрические параметры в единую систему координат. Это обеспечивает многомерное понимание образовательного успеха, отражающее не только результаты деятельности, но и механизмы, которые к ним приводят — уровень мотивации, самооффективности, устойчивости к стрессу и вовлечённости. Такой подход способствует формированию более точных и научно обоснованных моделей взаимодействия учащегося с образовательной средой.

Интегральная метрика может служить инструментом для выявления индивидуальных паттернов развития и определения оптимальной траектории обучения. На основании динамики метрики возможно определять точки роста, периоды снижения вовлечённости и моменты, требующие педагогического вмешательства. Это создаёт основу для адаптивных систем, которые не просто реагируют на результаты, а предвосхищают изменения в обучении [9].

Ограничения подхода

Для обеспечения статистической надёжности и репрезентативности интегральной метрики требуется широкая база наблюдений с достаточной вариативностью. Малые или однородные выборки затрудняют кор-

ректное определение весов и латентных факторов, что может привести к смещённым результатам и снижению обобщающей силы модели.

Чем выше уровень интеграции данных и математической сложности модели, тем труднее обеспечить прозрачность и понятность интерпретации для педагогов, администраторов и самих студентов. Возникает риск, что итоговый индекс будет восприниматься как «чёрный ящик», не позволяющий понять, какие конкретные действия или изменения привели к его росту или снижению [13].

Интеграция психометрических данных в системы образовательной аналитики ставит вопросы приватности, согласия и справедливости. Использование личностных характеристик для оценки или ранжирования учащихся требует строгого соблюдения этических принципов: прозрачности алгоритмов, добровольного участия и недопустимости дискриминации. Кроме того, важно предотвращать чрезмерное упрощение сложных психологических конструкторов до цифровых индексов.

В целом, предложенный подход открывает широкие перспективы для развития персонализированного и научно обоснованного обучения. Однако его реализация требует баланса между аналитической точностью, интерпретируемостью и этическими стандартами, что должно стать предметом дальнейших исследований и междисциплинарного обсуждения.

Заключение

В современных условиях цифровой трансформации образования возникает потребность в инструментах, способных не только фиксировать результаты обучения, но и отражать его внутренние механизмы — мотивационные, когнитивные и поведенческие. Предложенная

в работе концепция интегральной метрики образовательного успеха представляет собой перспективное направление развития аналитики обучения (learning analytics), направленное на создание более полных и осмысленных показателей качества образовательного процесса.

Интегральный показатель объединяет разнородные источники данных (академические достижения, психометрические характеристики и цифровое поведение учащихся) в единый комплексный индекс, обеспечивая целостное представление об образовательной динамике. Такой подход позволяет преодолеть фрагментарность традиционных метрик, повысить валидность оценки успеха и заложить основу для адаптивных и персонализированных моделей обучения.

Вместе с тем реализация интегральной метрики требует дальнейших исследований, направленных на методологическое уточнение и эмпирическую проверку модели. Перспективные направления работы включают:

1. апробацию предложенного подхода на данных реальных онлайн-курсов и EdTech-платформ;
2. сравнение эффективности интегрального показателя с традиционными методами анализа академических и поведенческих показателей;
3. валидацию модели на выборках различных возрастных и образовательных групп для проверки универсальности и культурной инвариантности метрики.

Таким образом, интегральная метрика образовательного успеха может стать новым шагом в развитии образовательной аналитики, обеспечивая переход от количественного измерения результатов к системному пониманию процессов, которые эти результаты формируют.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abbakumov D., Desmet P., Van den Noortgate W. (2020). Psychometrics of MOOCs: Measuring Learners' Proficiency. *Psychologica Belgica*, 60(1), 115–131. DOI: <https://doi.org/10.5334/pb.515>.
2. Gray G., McGuinness C., Owende Ph., Carthy A. (2014). A Review of Psychometric Data Analysis and Applications in Modelling of Academic Achievement in Tertiary Education. *Journal of Learning Analytics*, 1(1), 75–106. DOI: <https://doi.org/10.18608/jla.2014.11.5>.
3. Ezzaim A., Dahbi A., Aqqal A., Haidine A. (2024). AI-based learning style detection in adaptive learning systems: a systematic literature review. *Journal of Computers in Education*, 1–39. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40692-024-00328-9>.
4. Orsoni M. (2024) Exploring the psychometric dimensions: theoretical and practical applications of artificial intelligence and gamification in education, learning, and neuropsychological assessment, [Dissertation thesis], Alma Mater Studiorum Università di Bologna. Dottorato di ricerca in Psychology, 36 Ciclo. DOI: 10.48676/unibo/amsdottorato/11482.
5. York T.T., Gibson C., Rankin S. (2015). Defining and Measuring Academic Success. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, 20(5). Available online: <http://pareonline.net/getvn.asp?v=20&n=5>.
6. Arum R., Roksa J. (2011). *Academically adrift: Limited learning on college campuses*. Chicago, IL: University of Chicago Press. ISBN: 9780226028576.
7. Blankstein M., Wolff-Eisenberg C. (2020). *Measuring the Whole Student Landscape Review of Traditional and Holistic Approaches to Community College Student Success*. Ithaca S+R: Research Report. DOI: <https://doi.org/10.18665/sr.313888>.

8. Siemens G. (2013). Learning Analytics: The Emergence of a Discipline. *American Behavioral Scientist* 57 (10), 1380–1400. DOI: <https://doi.org/10.1177/0002764213498851>.
9. Gašević D., Dawson S., Siemens G. (2015). Let's not forget: Learning analytics are about learning. *TechTrends* 59 (1), 64–71. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11528-014-0822-x>.
10. Clow D. (2013). An overview of learning analytics. *Teaching in Higher Education*. DOI: <https://doi.org/10.1080/13562517.2013.827653>.
11. Saisana M., Saltelli A. (2011). Rankings and Ratings: Instructions for Use. *Hague Journal on the Rule of Law* 3(02), 247–268. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1876404511200058>.
12. Fabrigar L.R., Wegener D.T., MacCallum R.C., Strahan E.J. (1999). Evaluating the use of exploratory factor analysis in psychological research. *Psychological Methods*, 4(3), 272–299. DOI: <https://doi.org/10.1037//1082-989X.4.3.272>.
13. Lundberg S.M., Lee S.I. (2017). A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems*, Long Beach, 4–9 December 2017, 4766–4777. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.07874>.

© Носов Кирилл Андреевич (nosowork@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПОСТРОЕНИЕ ДАШБОРДА ВИЗУАЛИЗАЦИИ СОСТОЯНИЯ ХОСТА В ZABBIX НА ОСНОВЕ ДАННЫХ DDOS-АТАКИ

BUILDING A HOST STATE VISUALIZATION DASHBOARD IN ZABBIX BASED ON DDOS ATTACK DATA

V. Pavlovsky
A. Trubacheva-Gudovich

Summary. This paper presents a methodology for designing a specialized host-state visualization dashboard in the Zabbix monitoring system targeted at DDoS attack detection. A controlled experiment was carried out on a laboratory testbed using the OWASP Juice Shop web application as a target, with SYN-flood and Slowloris attacks reproduced. A mathematical model of the host state is proposed, including a baseline observation vector, a normalized z-score anomaly detection function, and an integral Attack Impact Score (AIS). It is shown that the proposed combination of user-defined metrics and triggers detects DDoS activity within approximately 30 seconds of its onset, with AIS reaching the DISASTER level (≥ 5.0) within 60–120 seconds. Recommendations for transferring the approach to production SOC scenarios are formulated.

Keywords: Zabbix, DDoS, network monitoring, dashboard, SYN-flood, Slowloris, TCP connections, OWASP Juice Shop, Attack Impact Score, Z-score, information security.

Павловский Владимир Владимирович

Преподаватель, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина
pavlovskiy.v@gubkin.ru

Трубачева-Гудович Анна Евгеньевна

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина
anagudovitch@yandex.ru

Аннотация. В работе предложена методика построения специализированного дашборда визуализации состояния хоста в системе мониторинга Zabbix, ориентированного на обнаружение DDoS-атак. На лабораторном стенде с использованием веб-приложения OWASP Juice Shop проведен эксперимент с воспроизведением SYN-flood и Slowloris. Разработана математическая модель состояния хоста, включающая baseline-вектор наблюдений, нормализованную z-функцию обнаружения аномалий и интегральный показатель Attack Impact Score (AIS). Показано, что предложенный набор пользовательских метрик и правил оповещения обеспечивает обнаружение DDoS-активности в среднем за 30 секунд после ее начала, а AIS достигает критического уровня DISASTER ($\geq 5,0$) в течение 60–120 секунд. Сформулированы рекомендации по переносу подхода в продуктивные SOC-сценарии.

Ключевые слова: Zabbix, DDoS, мониторинг сети, дашборд, SYN-flood, Slowloris, TCP-соединения, OWASP Juice Shop, Attack Impact Score, Z-score, информационная безопасность.

Введение

В условиях нарастающей активности киберугроз непрерывный мониторинг сетевой инфраструктуры становится одной из базовых задач информационной безопасности. По данным отраслевых обзоров, атаки типа «отказ в обслуживании» (DDoS) удерживают лидирующее место среди векторов воздействия на доступность веб-приложений и сетевых сервисов, причем заметную долю инцидентов составляют атаки прикладного уровня L7 — в первую очередь Slowloris-подобные, не требующие большой полосы пропускания и плохо обнаруживаемые средствами защиты, ориентированными только на объемные показатели трафика [1, 5, 8].

Система мониторинга Zabbix получила широкое распространение благодаря открытому коду, наличию агентского сбора метрик, поддержке пользовательских параметров и встроенным механизмам оповещения. Однако стандартные шаблоны Zabbix для Linux (в частности, «Template OS Linux by Zabbix agent») ориентированы

на штатный мониторинг ресурсов хоста и не содержат метрик, специфичных для обнаружения DDoS[2]: отсутствуют элементы анализа состояний TCP-соединений, частоты пакетов и интегральные показатели угрозы.

Объектом исследования выступает процесс мониторинга целевого узла (victim) в изолированной виртуальной среде, моделирующей взаимодействие атакующей машины Kali Linux с целевым веб-приложением OWASP Juice Shop под управлением Zabbix-агента. Предметом исследования является методология построения дашборда визуализации состояния хоста в Zabbix на основе экспериментальных данных DDoS-атаки.

Целью работы является разработка и экспериментальная проверка дашборда мониторинга DDoS-атаки в Zabbix с обоснованием выбора метрик, правил оповещения и принципов компоновки визуализации.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: развертывание изолированного лабо-

раторного стенда; конфигурирование пользовательских метрик (Items) для сбора показателей сетевого трафика, TCP-состояний и ресурсов хоста; разработка DDoS-специфичных правил оповещения (triggers); построение и обоснование компоновки дашборда; статистический анализ экспериментальных данных методами IQR и Z-score; построение математической модели поведения метрик при атаке и интегрального показателя Attack Impact Score (AIS).

- Научная новизна работы заключается в следующем:
- 1) Предложен набор пользовательских метрик Zabbix (UserParameter) для отслеживания распределения TCP-состояний (SYN-RECV, ESTABLISHED, CLOSE-WAIT, TIME-WAIT, LISTEN, TOTAL), отсутствующий в типовых шаблонах;
 - 2) Сформулирована математическая модель состояния хоста, включающая baseline-вектор, нормализованную z-функцию обнаружения аномалий и интегральный показатель Attack Impact Score (AIS) с экспертно обоснованными весовыми коэффициентами для трех типов атак (volumetric flood L3/L4, SYN-flood L4, HTTP-flood L7);
 - 3) Экспериментально верифицирована работоспособность предложенной модели на воспроизводимом стенде с OWASP Juice Shop, получены оценки времени обнаружения атаки и характеристик деградации сервиса;
 - 4) Отдельно проанализированы артефакты виртуализированной среды (VirtualBox), позволяющие исключить ложные индикаторы из состава AIS и повысить точность модели при переносе на физическую инфраструктуру.

Материалы и методы

Лабораторный стенд

Стенд развернут в гипервизоре VirtualBox и состоит из трех виртуальных машин, объединенных в изолированную сеть 192.168.10.0/24 (табл. 1, рис. 1). Атакующая машина kali (Kali Linux, 192.168.10.1) используется для генерации DDoS-нагрузки. Целевой хост victim (Ubuntu Server 24.04, 192.168.10.30) содержит веб-приложение OWASP Juice Shop, развернутое в Docker и слушающее порт 3000 [3], а также Zabbix-агент. Сервер мониторинга srv-mon (Ubuntu Server 24.04, 192.168.10.20) содержит Zabbix Server 7.0 и инстанс Grafana.

Целевой хост зарегистрирован в Zabbix и сопоставлен с шаблоном «Linux by Zabbix agent». Сбор данных проводился непрерывно; интервал обновления Items составлял от 5 до 30 секунд в зависимости от типа метрики. Активная фаза атаки длилась 12 минут (с 23:00 по 23:12).

Таблица 1.

Компоненты лабораторного стенда

Хост	ОС	IP-адрес	CPU / RAM	Роль
kali	Kali Linux	192.168.10.1	2 / 4096 МБ	Машина, атакующего
victim	Ubuntu 24.04	192.168.10.30	1 / 2048 МБ	Цель атаки, OWASP Juice Shop (порт 3000)
srv-mon	Ubuntu 24.04	192.168.10.20	2 / 4096 МБ	Zabbix Server 7.0 + Grafana

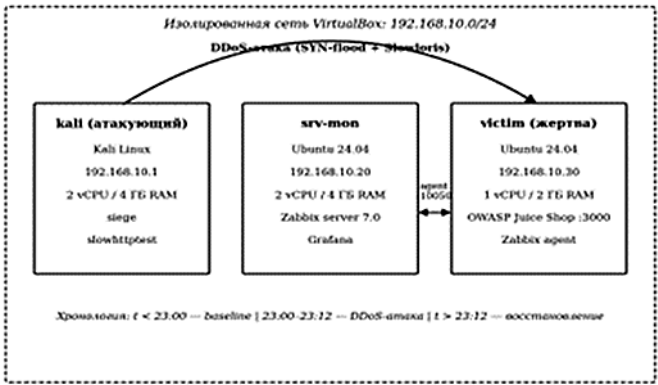


Рис. 1. Схема лабораторного стенда

Состав метрик дашборда

Базовые метрики сетевого трафика собирались штатными средствами Zabbix-агента [6] (табл. 2). Настройка Item «Traffic Inbound» выполняется путем выбора ключа net.if.in[ens3], типа Zabbix agent, интервала 5 с и применения preprocessing «Custom multiplier 8» для перевода байт/с в бит/с.

Таблица 2.

Метрики сетевого трафика

Item	Item key	Ед.	Обновл., с	Описание
Traffic Inbound	net.if.in[ens3]	бит/с	5	Входящий трафик (после preprocessing ×8)
Traffic Outbound	net.if.out[ens3]	бит/с	5	Исходящий трафик
Inbound pps	net.if.in[ens3, pkts]	пакет/с	5	Входящие пакеты
Outbound pps	net.if.out[ens3, pkts]	пакет/с	5	Исходящие пакеты
Dropped pkts	net.if.in[ens3, pkts, drop]	пакет/с	10	Отброшенные пакеты

Для мониторинга состояния TCP-стека был создан пользовательский параметр (UserParameter) в файле /etc/zabbix/zabbix_agentd.d/tcp_states.conf, обращаю-

щийся к утилите `ss` и каталогу `/proc/net/tcp`. Данный подход является первым ключевым элементом научной новизны: типовые шаблоны Zabbix не предусматривают мониторинг TCP-состояний на уровне ядра, тогда как именно эти показатели являются прямой сигнатурой SYN-flood и Slowloris (табл. 3).

Таблица 3.
Метрики TCP-соединений (UserParameter)

Item	Ед.	Обновл., с	Описание
TCP SYN-RECV	conn	5	Полуоткрытые соединения — индикатор SYN-flood
TCP ESTABLISHED	conn	5	Активные соединения
TCP CLOSE-WAIT	conn	5	Зависшие соединения, признак Slowloris
TCP TIME-WAIT	conn	5	Соединения ожидания закрытия
TCP LISTEN	conn	5	Слушающие сокет
TCP TOTAL	conn	10	Суммарное число TCP-соединений

Доступность сервиса контролировалась на прикладном уровне Web-сценарием (HTTP-код, время отклика) и TCP-проверкой порта; ресурсы хоста (CPU, RAM, swap) собирались штатными средствами Zabbix agent. Дополнительно введен вычисляемый Item «DDoS Threat Score» — агрегированный композитный индекс, отображаемый в виджете Gauge. Сводный перечень метрик приведен в табл. 4.

Таблица 4.
Метрики доступности сервиса и ресурсов хоста

Item	Item key	Ед.	Описание
HTTP response code	web.test.rspcode[JuiceShop,main]	code	200 — норма, 503 — отказ
Port 3000 status	net.tcp.port[,3000]	0/1	Состояние TCP-порта
JuiceShop Resp. Time	web.test.time[JuiceShop,main,resp]	мс	Время отклика приложения
DDoS Threat Score	Calculated	score	Композитный индекс угрозы
CPU Load avg1	system.cpu.load[all,avg1]	avg	Средняя загрузка CPU за 1 мин
CPU util (user/sys)	system.cpu.util[,user system]	%	Доля времени user / ядра
Memory used / available	vm.memory.size[used available]	байт	Используемая / свободная RAM
Swap used	system.swap.size[,used]	байт	Использование swap

Правила оповещения

На основе анализа нормального поведения хоста были настроены DDoS-специфичные правила оповещения (табл. 5) с градацией уровней критичности WARNING / HIGH / DISASTER. Для каждого правила в Zabbix создается триггер с выражением на языке триггерных выражений (avg/last/min) и привязывается действие (Action) с оповещением в нужные каналы (email, Telegram, webhook), что соответствует рекомендациям по настройке систем обнаружения вторжений [7].

Таблица 5.
Правила оповещения

Правило	Условие срабатывания	Уровень
Высокий входящий трафик	net.if.in [ens3, pps] > 1000 пакет/с (avg 1 мин)	WARNING
Критический flood	net.if.in [ens3, pps] > 5000 пакет/с (50 замеров)	HIGH
Деградация Juice Shop	web.test.time > 2000 мс	WARNING
Недоступность Juice Shop	web.test.time > 10000 мс OR HTTP-код ≠ 200	HIGH
Переполнение буфера NIC	net.if.in [ens3, pkts, drop] > 10 пакет/с	WARNING
Высокое CLOSE-WAIT	CLOSE-WAIT > 50 соединений	WARNING

Компоновка дашборда и инструменты атаки

Дашборд «Juice-shop DDoS overview» организован по принципу «от критичного к второстепенному» сверху вниз и включает четыре уровня наблюдаемости: сетевой трафик, TCP-стек, доступность сервиса и ресурсы хоста. SYN-flood генерировался утилитой `siege` (-c 100 -d 0 -t 10M, 100 параллельных потоков); Slowloris — утилитой `slowhttptest` (-c 500 -H -i 10 -r 200, 500 медленных соединений).

Математическая модель

Вектор наблюдений в нормальном состоянии (baseline) $X_{norm} = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ определяется за период $T_{base} = 5$ минут до начала атаки (t_0). Для каждой метрики x_i фиксируются среднее μ_i и стандартное отклонение σ_i :

$$\mu_i = E[x_i | t \in T_{base}], \quad (1)$$

$$\sigma_i = \sqrt{Var[x_i | t \in T_{base}]}, \quad (2)$$

где $E[\cdot]$ — математическое ожидание, $Var[\cdot]$ — дисперсия метрики x_i за период T_{base} . Базовые значения параметров приведены в табл. 6.

Для каждой метрики в момент времени t вычисляется нормализованное отклонение от базовой линии:

Таблица 6.

Базовые значения параметров нормального состояния

Метрика	μ (baseline)	σ (baseline)
Traffic Inbound (Kbps)	1,2	0,3
TCP TOTAL (conn)	5	2
TCP SYN-RECV (conn)	0	0,5
CPU util sys (%)	0,4	0,2
Resp. Time (мс)	80	40
Memory used (ГБ)	1,06	0,02

$$z_i(t) = (x_i(t) - \mu_i) / \max(\sigma_i, \epsilon), \quad (3)$$

где $\epsilon = 0,001$ — защита от деления на ноль для метрик с нулевой дисперсией в нормальном состоянии (например, TCP SYN-RECV $\approx 0 \pm 0$).

Условие обнаружения атаки (индикатор аномалии J) определяется как среднее превышение z -порога:

$$J(t) = (1/n) \cdot \sum_i \max(z_i(t) - z_{\text{thresh}}, 0) \geq J_{\text{min}} \quad (4)$$

где $z_{\text{thresh}} = 3,0$ — стандартный порог (метод 3σ); в виртуализированной среде с повышенным шумом гипервизора применяется $z_{\text{thresh}} = 2,0$; $J_{\text{min}} = 0,001$.

Вторым ключевым элементом научной новизны является введение интегрального показателя Attack Impact Score (AIS) — взвешенной суммы положительных нормализованных Z -score по ключевым метрикам:

$$AIS(t) = \sum_i w_i \cdot \max(z_i(t), 0), \quad (5)$$

где w_i — весовой коэффициент i -й метрики, удовлетворяющий условию $\sum w_i = 1$. Оператор $\max(z_i, 0)$ исключает вклад метрик, значения которых ниже базовой линии (например, снижение трафика после атаки), что предотвращает компенсацию вкладов и ложно-низкие оценки во время затухающей атаки. Состав и интерпретация весов приведены в табл. 7.

Соотношение $w_1 = w_2 = 0,25$ обусловлено равнозначностью трафика и SYN-RECV как индикаторов первого уровня: трафик фиксирует volumetric-составляющую (L3/L4), SYN-RECV — ее протокольную сигнатуру (полукоткрытые соединения). Веса $w_3 = w_4 = 0,20$ отражают вторичный характер CPU sys% и времени отклика как следствий, а не причин атаки. Минимальный вес $w_5 = 0,10$ для HTTP-кода обусловлен бинарным характером этой метрики, что делает ее менее информативной на стадии нарастания атаки.

Пороговые уровни AIS: 0–1,0 — норма; 1,0–3,0 — WARNING; 3,0–5,0 — HIGH; > 5,0 — DISASTER.

Таблица 7.

Весовые коэффициенты и пороги Attack Impact Score

Компонент	Вес w_i	Интерпретация	AIS-вклад при $z = 4$
w_1 — Traffic pps	0,25	Главный индикатор volumetric flood (L3/L4)	1,00
w_2 — SYN-RECV	0,25	Прямой признак SYN-flood (L4)	1,00
w_3 — CPU sys%	0,20	Нагрузка ядра на обработку пакетов	0,80
w_4 — Resp. Time	0,20	UX-деградация L7	0,80
w_5 — HTTP code	0,10	Бинарный признак отказа	0,40

Результаты

Фаза 1. Нормальное состояние (до атаки, 22:10–22:59)

В нормальном состоянии все метрики устойчиво находились в пределах 1σ от базового значения (рис. 2). Трафик не превышал $\approx 2,3$ Kbps по входящему направлению; число TCP-соединений колебалось в диапазоне 4–7; CPU sys% удерживался на уровне 0,3–0,5 %; время отклика Juice Shop составляло 60–180 мс при стабильном HTTP-коде 200; виджет «DDoS Threat Score» показывал значение 0,0.

Фаза 2. Активная атака (23:00–23:12)

После запуска инструментов атаки наблюдался резкий переход всех ключевых метрик в аномальную область (рис. 3). Входящий трафик скачкообразно вырос с baseline 1,2 Kbps до пиковых значений 1,58 МБ/с ($\times 1000$ от нормы), число TCP-соединений TOTAL достигло 3000–6000 при baseline 5–7 ($\times 500$ –1000), CPU sys% за 60–90 секунд вышел на 100 % (load average — до 120 при двух vCPU), время отклика Juice Shop увеличилось до 4–5 секунд и продолжило расти вплоть до timeout, HTTP-код перешел в состояние «service available: NO». Виджет «DDoS Threat Score» отобразил рост значения с 0,0 до 1,1.

Фаза 3. Восстановление (после 23:12)

После прекращения атаки трафик снизился в течение 60–90 секунд, однако число TCP-соединений в состоянии TIME-WAIT удерживалось на уровне 100–500 в течение 2–5 минут — это согласуется с типовым значением TCP TIME-WAIT timeout в ядре Linux (по умолчанию 60–120 с) и объясняет задержку полного восстановления (рис. 4). CPU- и RAM-показатели возвращались к baseline за 1–2 минуты.



Рис. 2. Состояние хоста до атаки: трафик и TCP-соединения



Рис. 3. Начало DDoS-атаки: рост трафика и TCP TOTAL, выход CPU на 100 % и рост времени отклика

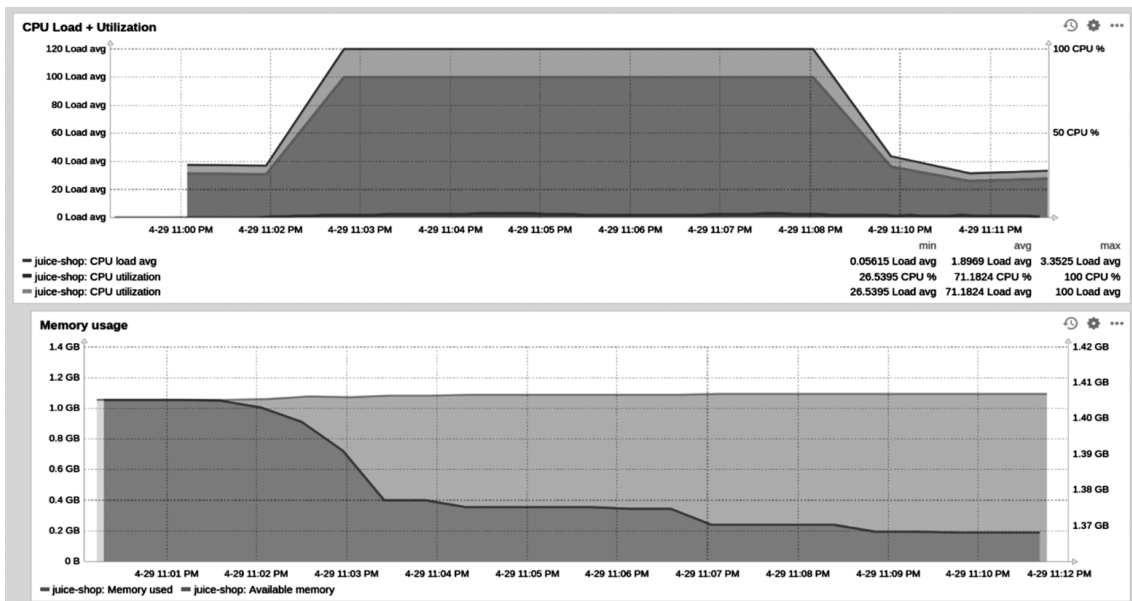


Рис. 4. Состояние CPU/RAM и трафика после завершения атаки

Перцентильный анализ

Сводная статистика по ключевым метрикам в фазах «норма» и «атака» представлена в табл. 8.

Таблица 8.

Перцентили показателей хоста по фазам эксперимента

Метрика	Фаза	P50	P90	P95	P99	Макс.
Traffic Inbound (Kbps)	Норма	1,1	1,6	1,7	1,8	≈ 2,3
Traffic Inbound (Kbps)	Атака	1200	1500	1590	1600	> 1600
TCP TOTAL (conn)	Норма	4–5	6	7	8	10
TCP TOTAL (conn)	Атака	3000	4800	5200	5500	> 6000
TCP SYN-RECV (conn)	Норма	0	0	1	1	2
TCP SYN-RECV (conn)	Атака	5	8	9	10	10+
CPU util sys (%)	Норма	0,3	0,5	0,6	0,8	1,2
CPU util sys (%)	Атака	37	65	85	100	100
Resp. Time (мс)	Норма	60	90	120	180	250
Resp. Time (мс)	Атака	8000	–	–	–	timeout

Применение методов IQR и Z-score

Для обнаружения аномалий применены два статистических метода. Метод межквартильного размаха (IQR) устойчив к выбросам [5,10] и не требует допущения о нормальности распределения: выброс фиксируется

при значении $> Q3 + 1,5 \cdot IQR$ или $< Q1 - 1,5 \cdot IQR$. Для метрики TCP TOTAL в нормальном состоянии $Q1 = 6$, $Q3 = 7$, $IQR = 1$, верхняя граница $= 7 + 1,5 = 8,5 \approx 10$ соединений. В момент атаки значение достигает 5000–6000 соединений, что превышает верхнюю границу IQR в 500–600 раз. Метод подтверждает, что TCP TOTAL является наиболее информативным индикатором DDoS.

Метод Z-score: для CPU util sys ($\mu = 0,4 \%$, $\sigma \approx 0,2 \%$) при значении атаки $x = 100 \%$ получаем $z \approx 498$; для входящего трафика ($\mu = 1,2 \text{ Kbps}$, $\sigma \approx 0,3 \text{ Kbps}$) при $x = 1600 \text{ Kbps}$ значение $z \approx 5329$. Столь экстремальные z-значения свидетельствуют, что предположение о нормальности распределения при атаке неприменимо, и Z-score используется как бинарный индикатор аномалии, а не как точная статистическая оценка. Для корректной агрегации в AIS применена операция мягкого сжатия (log-clip) больших z-значений.

Динамика интегрального показателя AIS

Расчет AIS по формуле (5) с весами из табл. 7 дает следующую динамику (рис. 5): на baseline AIS близок к нулю, в момент t_0 резко возрастает, в течение 60–120 секунд проходит уровни WARNING (1,0), HIGH (3,0) и DISASTER (5,0), достигая плато ≈ 9 –10 в активной фазе атаки. После прекращения атаки AIS опускается ниже DISASTER за 2–3 минуты.

Среднее время от начала атаки до первого срабатывания правила оповещения составило приблизительно

Динамика интегрального показателя AIS в ходе эксперимента

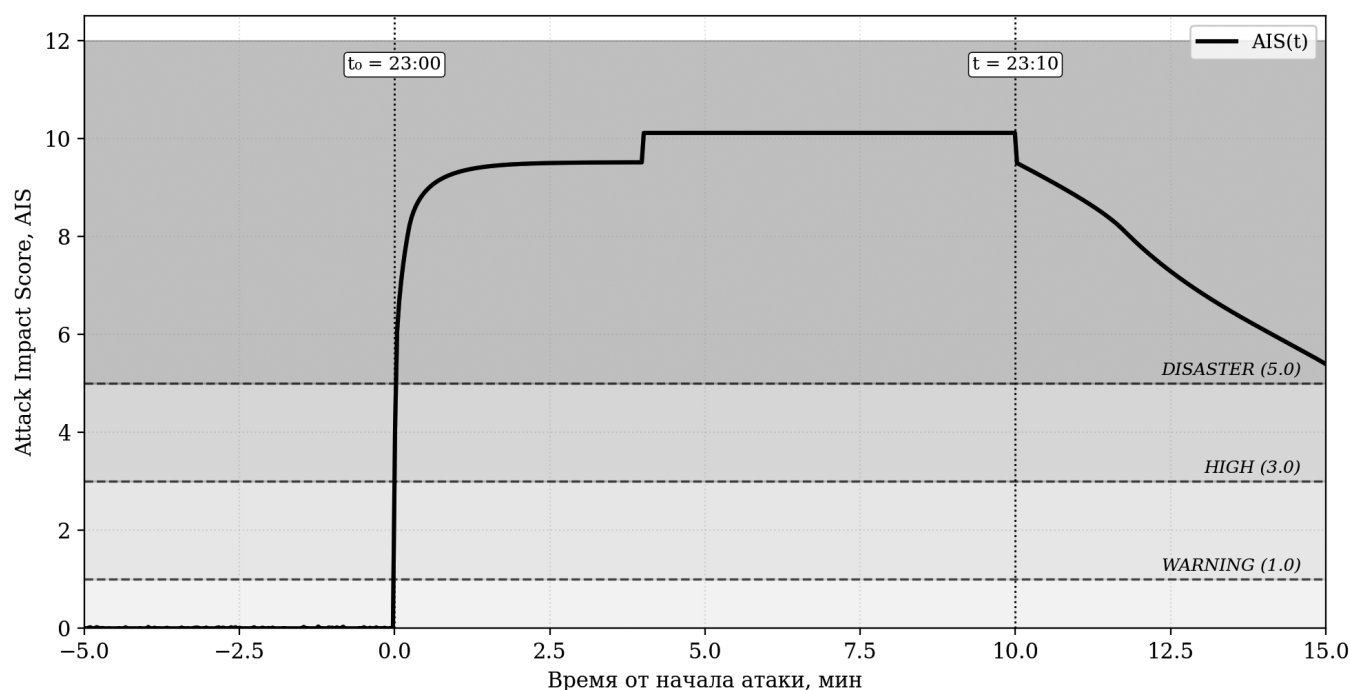


Рис. 5. Динамика интегрального показателя AIS в ходе эксперимента

30 секунд, что подтверждает работоспособность пороговых триггеров.

Соответствие отраслевым стандартам

Предложенная система мониторинга укладывается в этапы обработки инцидентов согласно NIST SP 800-61 Rev. 2 [9]: фаза фиксации baseline соответствует этапу Preparation, срабатывание правил оповещения — этапу Detection and Analysis, значение AIS > 5,0 является сигналом для перехода к фазе Containment. В терминах MITRE ATT&CK отслеживаемые метрики соответствуют технике T1498 (Network Denial of Service) и T1499 (Endpoint Denial of Service) тактики Impact.

Обсуждение

Артефакты виртуализированной среды

В ходе работы ряд метрик был признан непригодным для применения в AIS из-за артефактов VirtualBox, что согласуется с известными ограничениями виртуализированных сред при мониторинге сетевых параметров [8]:

- 1) system.cpu.util[,steal] — VirtualBox не экспортирует CPU steal в гостевую машину, метрика всегда равна 0 и не несет диагностической ценности;
- 2) net.if.in[ens3, pkts, drop] — виртуальный NIC не фиксирует отброс пакетов на уровне гипервизора, поэтому метрика равна 0 независимо от интенсивности атаки;
- 3) vm.memory.size[available] — balloon-driver VirtualBox искажает показание свободной RAM, динамика не коррелирует с реальным давлением на память;
- 4) system.cpu.load[all,avg1] при коротких burst-атаках (< 60 с) запаздывает, рекомендуется использовать cpu.util вместо load.avg;
- 5) значения web.test.time ниже 15 мс представляют собой шум планировщика гипервизора и не интерпретируются как сигнал.

На физическом железе перечисленные показатели становятся валидными и могут быть включены в расширенную модель AIS. Это позволяет рассматривать предложенную конфигурацию как **переносимую**: относительные изменения ($\times$ factor от baseline) сохраняются, абсолютные значения масштабируются.

Ограничения исследования

Ограничения работы: (1) виртуализированная среда искажает часть метрик; (2) формула AIS требует верифи-

кации на большей выборке атак и калибровки весов; (3) текущая настройка не предусматривает отправку оповещений во внешние каналы, что снижает оперативность реагирования.

Заключение

В ходе исследования реализован полный цикл построения дашборда мониторинга DDoS-атаки в Zabbix: от развертывания лабораторного стенда и конфигурирования агента до создания пользовательских Items, правил оповещения и визуальных элементов компоновки.

Экспериментально подтверждено, что атаки SYN-flood (siege, 100 параллельных соединений) и Slowloris (slowhttptest, 500 соединений) вызывают полный отказ OWASP Juice Shop в течение 60–120 секунд. Ключевыми индикаторами атаки выступили: скачок входящего трафика ($\times 1000$ от baseline), рост TCP TOTAL до 5000+ соединений, выход CPU sys% на 100 % и переход HTTP-кода в 503. Среднее время от начала атаки до первого срабатывания правила оповещения составило ≈ 30 секунд.

Предложенная математическая модель включает baseline-вектор наблюдений, функцию обнаружения аномалии на основе нормализованной Z-оценки и интегральный показатель Attack Impact Score (AIS), позволяющий автоматически классифицировать уровень угрозы. AIS достиг уровня DISASTER (> 5,0) в течение 60–120 секунд после начала атаки.

Научная новизна работы состоит в авторском наборе пользовательских метрик TCP-состояний для Zabbix, разработке интегрального показателя AIS с экспертно обоснованными весами для трех типов атак, а также в систематическом исключении из модели VM-артефактов, что обеспечивает ее переносимость на физическую инфраструктуру.

Практическая ценность дашборда — обеспечение мониторинга состояния хоста в реальном времени с возможностью раннего обнаружения DDoS-активности. Решение применимо в учебных целях и в реальных SOC-сценариях при масштабировании на продуктивную инфраструктуру.

Направления дальнейших исследований: тестирование на физическом оборудовании; уточнение весов AIS методами ANP или SHAP; расширение покрытия дашборда метриками прикладного уровня; настройка оповещений в корпоративные каналы.

ЛИТЕРАТУРА

6. Лукацкий А.В. Обнаружение атак. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб.: БХВ-Петербург, 2003. — 608 с. — ISBN 5-94157-246-8.
7. Zabbix LLC. Zabbix Documentation 7.0 [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.zabbix.com/documentation/7.0/> (дата обращения: 15.03.2026).
8. OWASP Foundation. OWASP Juice Shop Project [Электронный ресурс]. — URL: <https://owasp.org/www-project-juice-shop/> (дата обращения: 15.03.2026).
9. Лизунов М.И., Истратова Е.Е. Исследование программного обеспечения для мониторинга сетевого трафика // Программно-техническое обеспечение автоматизированных систем. — 2021. — С. 37–40.
10. Жаркова М.С., Козачок А.И., Тезин А.В. Использование протокола SNMP для контроля параметров безопасности компьютерной сети // Инновации. — 2021. — № 4 (6). — С. 651–656.
11. Scarfone K., Mell P. Guide to Intrusion Detection and Prevention Systems (IDPS): NIST Special Publication 800-94. — Gaithersburg: NIST, 2007. — 127 p.
12. Уймин А.Г. Цифровые двойники сетевых инфраструктур: точность, методы и практические решения // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. — 2023. — № 3 (51). — С. 44–52. — DOI: 10.24412/2221-2574-2023-3-44-52.
13. Cichonski P., Millar T., Grance T., Scarfone K. Computer Security Incident Handling Guide: NIST Special Publication 800-61 Rev. 2. — Gaithersburg: NIST, 2012. — 79 p.
14. Tukey J.W. Exploratory Data Analysis. — Reading: Addison-Wesley, 1977. — 688 p. — ISBN 0-201-07616-0.

© Павловский Владимир Владимирович (pavlovskiy.v@gubkin.ru); Трубачева-Гудович Анна Евгеньевна (anagudovitch@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ МЕТОДА СИНТЕЗА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ CO₂-ЛАЗЕРОВ

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE APPLICATION FOR AUTOMATION OF THE METHOD FOR THE SYNTHESIS OF TECHNICAL SOLUTIONS OF TECHNOLOGICAL CO₂-LASERS

V. Plotnikov
N. Fedorova

A. Yakovlev

Summary. This paper presents the objectives, methods, and results of the development of a software application with a graphical user interface (GUI) designed to automate the early stages of designing technological CO₂ lasers. The main goal of the research is to improve efficiency and reduce development time by implementing the engineering-physical method for synthesizing technical solutions (TS) as a software tool. The study focuses on automating the process of selecting a physical principle of operation (PPO) and synthesizing TS through the formation of sets of structurally compatible components. The research methodology includes an analysis of existing software tools, the design of the application architecture, the implementation of synthesis algorithms, and the development of the user interface. As a result, a cross-platform software application was developed, consisting of a sequence of interactive screens and an integrated graphical editor that provides functionality for PPO model construction, input data handling, synthesis, and evaluation of TS. The paper justifies the choice of development technologies, describes the software structure, and includes diagrams of user scenarios. The practical significance lies in creating an environment that supports decision-making during the conceptual stages of design. The application enables engineers to automatically generate and analyze many TS options, integrate custom libraries of components, and apply the tool within existing CAD systems. The solution is intended for use in professional design offices and research organizations.

Keywords: design automation, early design stages, physical principle of operation, synthesis of technical solutions, CO₂ laser, engineering-physical method, graphical user interface, software application, structural components, CAD system.

Плотников Владислав Павлович

Аспирант, Волгоградский государственный
технический университет
vladplotnikov34@gmail.com

Федорова Наталья Валерьевна

Старший преподаватель, Волгоградский
государственный технический университет
missis.yana-1995@yandex.ru

Яковлев Алексей Андреевич

доктор технических наук, профессор, Волгоградский
государственный технический университет

Аннотация. В работе представлены цели, методы и результаты разработки программного приложения с графическим пользовательским интерфейсом (ГПИ), предназначенного для автоматизации начальных стадий проектирования технологических CO₂-лазеров. Целью исследования является повышение эффективности и сокращение сроков проектирования за счёт реализации инженерно-физического метода синтеза технических решений (ТР) в виде программного инструмента. В работе рассмотрены основные этапы автоматизации процесса выбора физического принципа действия (ФПД) и синтеза ТР путём формирования наборов конструктивно-совместимых элементов. Методология исследования включает анализ существующих программных решений, проектирование архитектуры приложения, реализацию алгоритмов синтеза и разработку графического интерфейса пользователя. В результате создано кроссплатформенное программное приложение, состоящее из последовательности экранных форм и интегрированного графического редактора, реализующего функциональность построения модели ФПД, ввода и обработки исходных данных, синтеза и оценки ТР. Проведено обоснование выбора используемых технологий, описана структура программной системы и приведены диаграммы пользовательских сценариев. Практическая значимость заключается в создании среды, обеспечивающей поддержку принятия проектных решений на концептуальных стадиях. Приложение позволяет конструкторам автоматически генерировать и анализировать большое количество вариантов ТР, интегрировать собственные библиотеки элементов и применять инструмент в рамках существующих САПР. Разработка предназначена для применения в профессиональных инженерных бюро и научных организациях.

Ключевые слова: автоматизация проектирования, начальные стадии проектирования, физический принцип действия, синтез технических решений, CO₂-лазер, инженерно-физический метод, графический интерфейс, программное приложение, конструктивные элементы, САПР.

Введение

Проектирование новых конструкций CO₂-лазеров — сложный и трудоёмкий процесс, требующий инженерной квалификации и изобретательского подхода. Особое значение имеют начальные стадии проектирования — выбор физического принципа действия (ФПД), формирование структуры устройства и синтез технических решений (ТР). Повышение качества и сокращение сроков возможно за счёт формализации этих стадий и их последующей автоматизации в рамках САПР с использованием программных решений с удобным графическим интерфейсом.

Обзор литературных источников

Проблематика автоматизации ранних этапов проектирования активно изучается. В работах [1, 5, 6] описаны цифровые и интеллектуальные инструменты. В [2–4, 8] обоснована необходимость системного подхода и концептуального проектирования. Исследование [1] акцентирует внимание на экологических критериях и многопараметрической оценке. В [2] подчёркивается роль эвристических методов. В [3] рассмотрено онтологическое моделирование, близкое к задачам синтеза ТР. В [4] описан Lean-подход, применимый и к проектированию CO₂-лазеров. В [5] предложен алгоритм оптимизации для архитектурного проектирования, в [6] — цифровые методы оцифровки прототипов. Программа «Новатор» [7] иллюстрирует отечественный опыт автоматизации, однако её функциональность ограничена. Основой текущей работы стала методика из монографии А.А. Яковлева [8].

Метод синтеза технических решений (ТР)

На кафедре «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования» ВолгГТУ был разработан инженерно-физический метод синтеза ТР [8], который может быть использован для поддержки принятия решений на начальных стадиях проектирования для широкого класса технических систем (преобразователей энергии, систем охлаждения, двигателей внутреннего и внешнего сгорания, технологических лазеров и т.п.).

Для разработки новой конструкции технологического CO₂-лазера, конструктор приступает к построению модели ФПД, подробно описанной в работах [9, 10, 11] и отражающей основные физические процессы. Данная модель определяет совокупность функций конструктивных элементов проектируемого изделия. Множество подходящих конструктивных элементов подбирают в различных патентных фондах, научно-технической литературе и других информационных источниках. В результате формируется матрица ТР, содержащая множество (до нескольких сотен тысяч и более) самых

различных вариантов совместимых сочетаний конструктивных элементов. Каждое сочетание может быть использовано для разработки новой конструкции будущего изделия. На заключительном этапе проводится экспертная оценка по заданным (в техническом задании) показателям качества всех возможных сочетаний и выбирается один или несколько вариантов для последующей конструктивной реализации изделия. Все эти процессы ранее проводились «вручную», интуитивно и не были формализованы. Кроме того, они требовали много времени и труда конструктора, а также ограничивались несколькими (на практике — от двух-трех до пяти-семи) вариантами. Данные интуитивные процессы были изучены и формализованы авторами инженерно-физического метода, что позволило его автоматизировать и реализовывать с помощью программного приложения.

К настоящему времени инженерно-физический метод получил дополнительное развитие, что позволило сделать его более универсальным, появилась возможность применять его для различных уровней иерархии, расширить области применения. Это требует разработки новых программных приложений, позволяющих реализовать дополнительные возможности метода. Ранее разработанные приложения [12] имели ряд ограничений, среди которых можно выделить:

- отсутствие встроенного графического редактора, позволяющего в интерактивном режиме разрабатывать структурные и иерархические схемы разрабатываемых устройств на уровне отдельных подсистем и/или функциональных модулей, входящих в состав лазера, и дальнейшей их декомпозиции до графов моделей ФПД с последующим объединением в единую модель ФПД;
- отсутствие автоматического переноса информации о реализуемых процессах из модели ФПД в реляционную БД для информационной поддержки работы подсистемы принятия проектных решений, необходимой для формирования множества возможных ТР;
- отсутствие функции экспорта графов ФПД в рамках ранее разработанных проектов;
- отсутствие возможности одновременной разработки нескольких различных проектов.

Разработка программного приложения с ГПИ помогла решить эту проблему и устранить перечисленные выше ограничения. Настоящее исследование направлено на автоматизацию начальных стадий синтеза ТР CO₂-лазеров на основе модели ФПД, обоснованной в рамках инженерно-физического метода. Один из шагов к частичной автоматизации рассматриваемого процесса — разработка программного приложения с ГПИ для интеграции с API, реализующим разработанный метод. Под ГПИ, в данной работе, подразумеваются экранные формы, меню, панели инструментов и графический редак-

тор. Разрабатываемое приложение должно обеспечить инженеру-конструктору возможность поэтапного ввода полного набора входных данных, администрирование проекта, разработку граф-схем, экспорт и импорт граф-схем. Программное приложение разработано в виде нескольких модулей, взаимодействующих между собой. Данный подход, как известно, позволяет при необходимости беспрепятственно интегрировать новые функциональные модули в систему при ее возможной модернизации.

На первом этапе основное внимание было уделено разработке графического модуля для построения модели ФПД. Разработанный графический редактор [13], был интегрирован в графический интерфейс программного приложения на вкладку «Файл» → «Редактор». Модуль используется для создания графических схем: структурной схемы, иерархической схемы, графов моделей ФПД.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования выступают технологические CO₂-лазеры как класс технических систем, разрабатываемых на основе инженерно-физического подхода. Предмет исследования — методы и программные средства автоматизации начальных стадий проектирования технологических CO₂-лазеров, включая выбор физического принципа действия и синтез технических решений.

Цель и задачи исследования

Целью данного исследования является сокращение сроков разработки и повышение эффективности и качества труда инженера-конструктора на начальных этапах проектирования за счет автоматизации ранее разработанного инженерно-физического метода синтеза ТР CO₂-лазеров и возможности его реализации с помощью программного приложения. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- разработать макеты экранных форм программного приложения с ГПИ для ввода данных, поиска конструктивных элементов и контроля процесса синтеза ТР в целом;
- разработать и перенести на программный код макеты экранных форм, объединить все формы в единую смысловую последовательность, отображающую порядок действий согласно инженерно-физическому методу синтеза ТР;
- интегрировать разработанный ранее графический редактор блок-схем в разработанное программное приложение с ГПИ с добавлением возможности администрирования более чем одного графа модели ФПД;
- разработать и произвести программную реализацию алгоритмов контроля корректности входных данных, поступающих от пользователя через экранные формы.

Актуальность

Основное назначение разработанного программного приложения заключается в том, чтобы повысить производительность труда конструктора при выполнении творческой работы на которую тратятся значительные силы и время: разработка моделей ФПД; определение на их основе совокупности элементарных функций; поиск альтернативных конструктивных элементов, реализующих эти функции; построение матрицы технических решений; экспертная оценка возможных вариантов сочетаний совместимых между собой элементов. Все это позволит сократить сроки проектирования CO₂-лазеров и, по мнению авторов, скажется в лучшую сторону на технических характеристиках будущих изделий.

Технология разработки и дизайн программного приложения

Технический инструментарий. Разработанное приложение представляет собой кроссплатформенное графическое решение на базе платформы Electron. Это обеспечивает поддержку Windows, Linux и MacOS. Для реализации использованы современные веб-технологии:

- *ReactJS* — библиотека для создания SPA-приложений, интегрированная с *Redux*;
- *AntV G6* — инструмент для визуализации и редактирования графов;
- *MaterialUI* — библиотека компонентов интерфейса.

Благодаря использованию этих средств обеспечивается высокая адаптивность, модульность и расширяемость ГПИ.

Модули приложения. В соответствии с современными тенденциями разработки одностраничного программного обеспечения (SPA), ГПИ разработан с применением компонентного подхода, что обусловлено выбором библиотеки *ReactJS* в качестве архитектурного каркаса разработки. Для наглядного отображения структуры компонент SPA приводится UML диаграмма компонент (рис. 1).

Приложение состоит из четырех основных вкладок (разной вложенности), каждая из которых является одним из этапов процесса поискового конструирования: файл, ввод данных, поиск решений и вывод результатов. Каждая вкладка отражает этапы процесса синтеза ТР:

1. *File*: начальная страница, описание устройства, графический редактор, отображение схем, работа с БД конструктивных элементов.
2. *InputData*: ввод показателей качества, элементарных функций и связей.
3. *SolutionSearch*: запуск синтеза ТР.
4. *Results*: отображение и экспорт полученных решений.

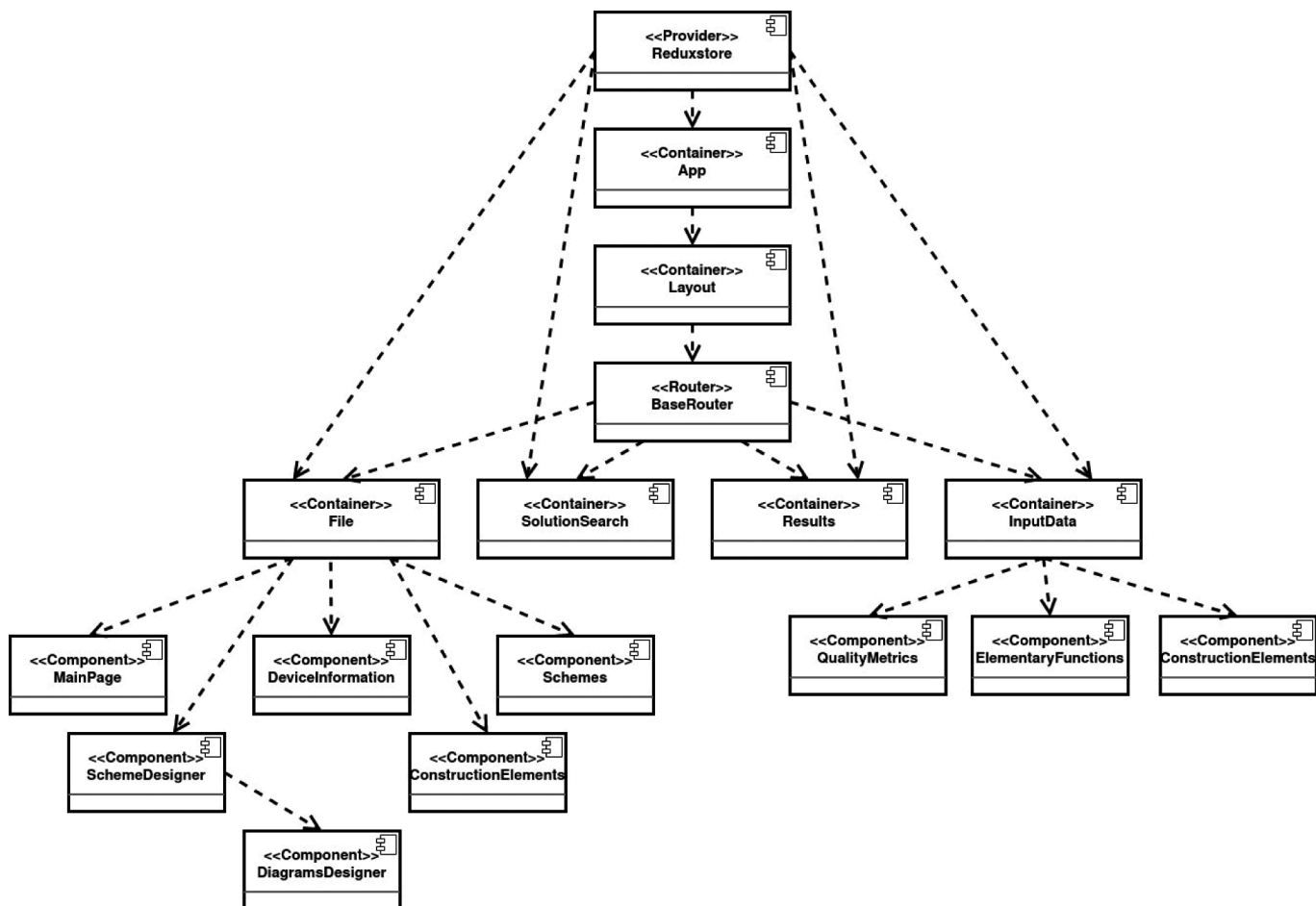


Рис. 1. Диаграмма компонент графического пользовательского интерфейса

Пользовательские сценарии. Приложение реализует полную цепочку взаимодействия с инженерно-физическим методом (диаграмма прецедентов на рисунке 2):

- создание и управление проектами (импорт/экспорт, удаление, редактирование);
- построение модели ФПД с помощью графического редактора;
- ввод проектных данных (качество, функции, элементы);
- поиск и расширение базы конструктивных элементов;
- автоматический синтез и фильтрация ТР;
- просмотр, редактирование и экспорт результатов.

Функция «Создание графа модели ФПД» реализована при помощи интеграции графического редактора блочсхем [13] и рассмотрена в отдельной диаграмме пользовательских сценариев. Так как, графический редактор разработан с учетом специфики универсального инженерно-физического метода для построения графов моделей ФПД, он обладает набором примитивов необходимых для их построения и отличается от классических аналогов.

Последовательность исполнения. Навигация по вкладкам реализует поэтапную логику проектирова-

ния. Диаграмма последовательностей (рис. 3) отражает взаимодействие основных компонентов.

Пример использования программного приложения в реальном пользовательском сценарии

Работа приложения проиллюстрирована на примере синтеза ТР газоразрядного CO_2 -лазера. На вкладке «Файл. Редактор» отображён процесс создания графа модели ФПД. Информация автоматически сохраняется в базе данных, включая характеристики точек, потоков, взаимодействий и объектов окружения, что затем используется при поиске подходящих конструктивных элементов. Модуль графического редактора — ключевой элемент интерфейса: он ускоряет создание схем и преобразование информации о проектируемом устройстве в структурированный вид, необходимый для синтеза ТР. Все созданные графы и их табличные представления доступны на вкладке «Файл. Схемы»

На вкладке «Ввод данных. Конструктивные элементы» (рис. 4) реализована связь между найденными элементами и показателями качества. Интерфейс позволяет задать числовые значения критериям, влияющим на от-



Рис. 2. Диаграмма пользовательских прецедентов приложения

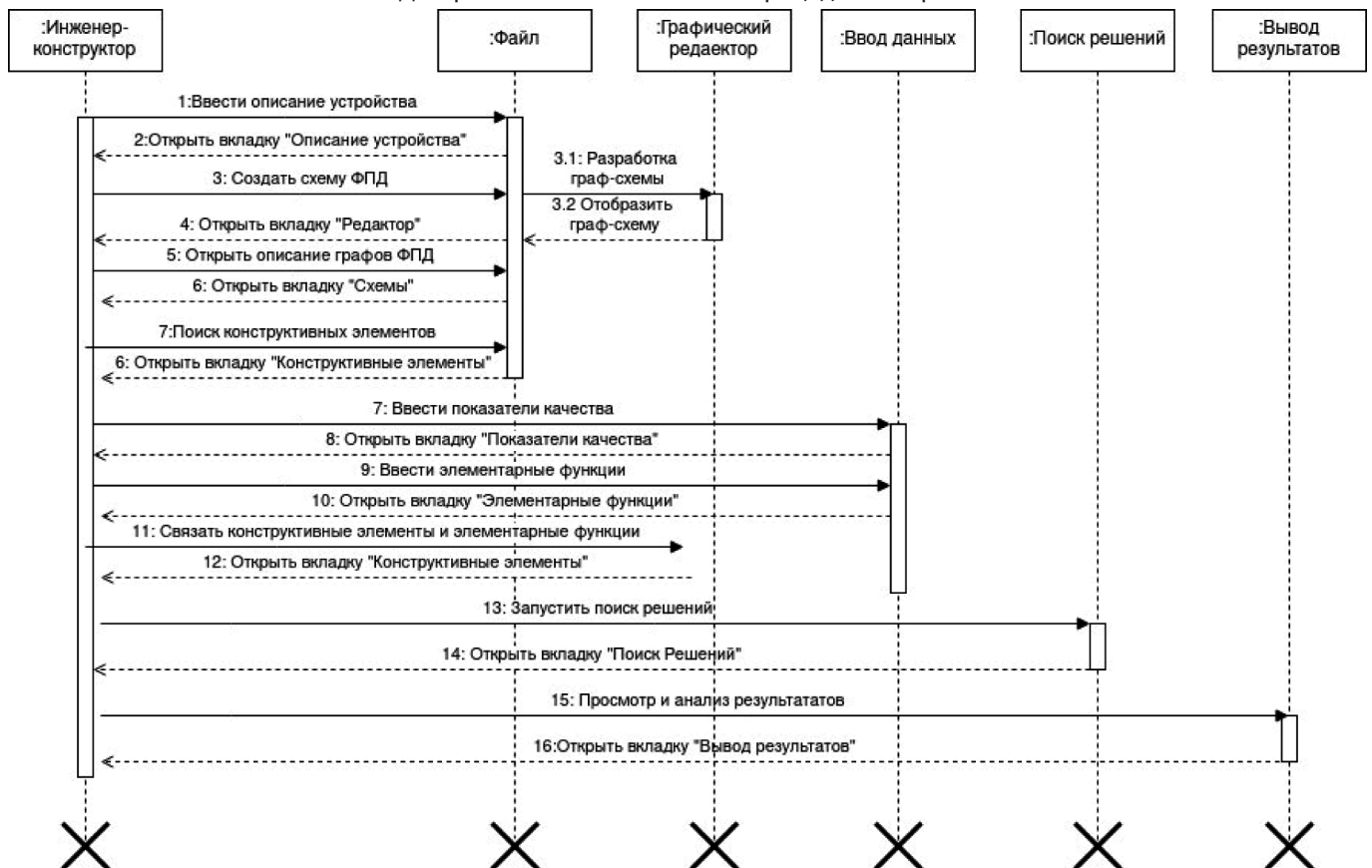


Рис. 3. Диаграмма последовательностей работы с ГПИ

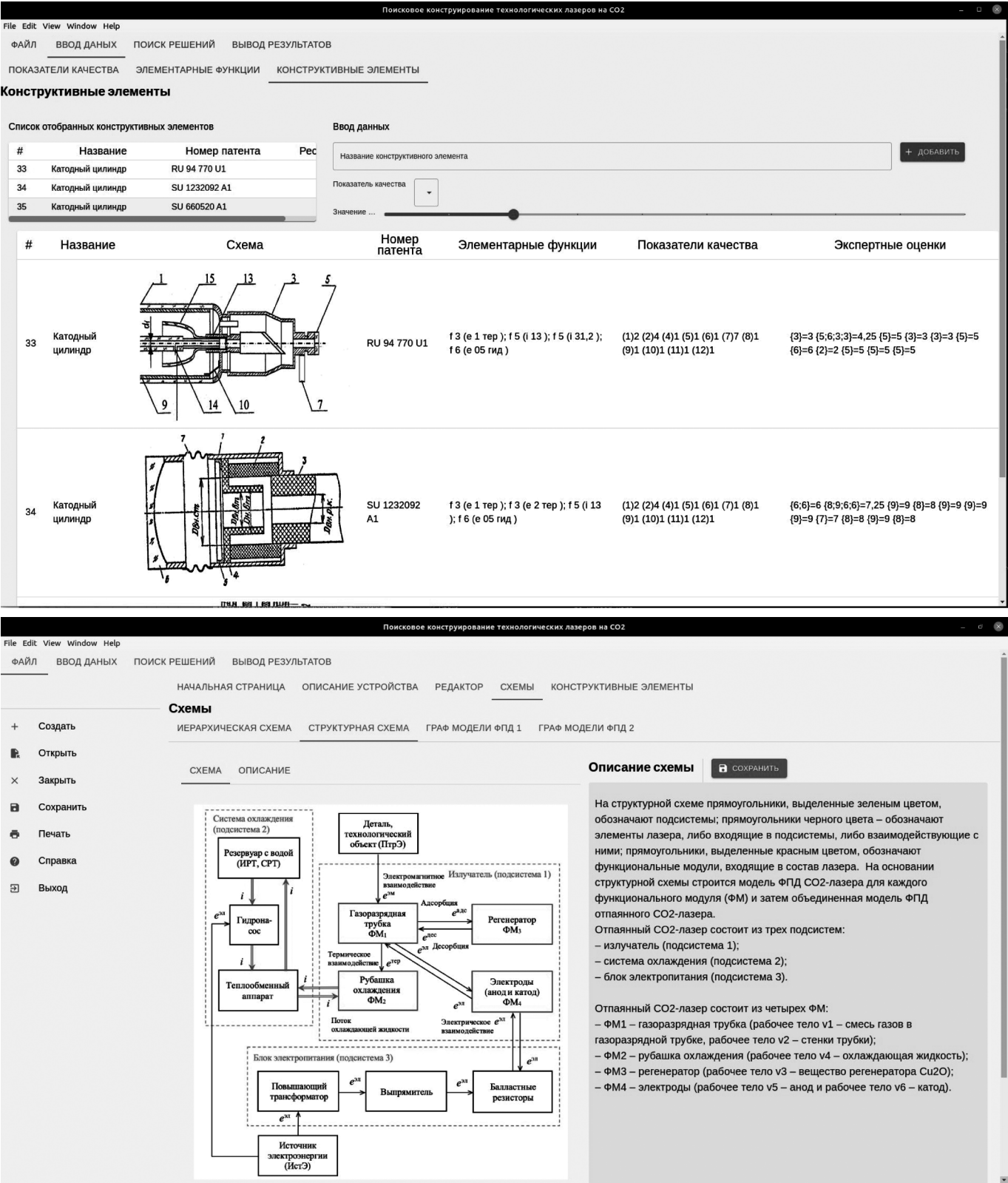


Рис. 4. Графический пользовательский интерфейс, вкладка «Ввод Данных. Конструктивные Элементы» и «Схемы. Структурная Схема»

бор подходящих ТР. На этом этапе из набора вариантов исключаются несоответствующие, а оставшиеся представляют собой перспективные технические решения. Их можно в дальнейшем экспортировать и использовать в профессиональных САПР, таких как T-Flex CAD, Компас-3D, AutoCAD и др.

Результаты и Выводы

Результатом работы является спроектированное и разработанное программное приложение с ГПИ, интегрированным с интерфейсом программного приложения серверной части, реализующее механизмы работы с конструктивными элементами, базой данных и администрирование проекта [14]. Программное приложение предоставляет пользователю возможность автоматического синтеза ТР технологических CO₂-лазеров.

В рамках достижения намеченной цели работы и решая поставленные для этого задачи, авторами получены следующие результаты:

1. Автоматизация начальных стадий проектирования технических систем является одним из магистральных направлений повышения производительности труда проектировщика и повышения качества разрабатываемых изделий.
2. Для автоматизации начальных стадий проектирования требуется исследование процессов принятия решений конструктором и их формализация, а затем их фиксация в виде методик проектирования, которые целесообразно в дальнейшем автоматизировать в виде программных приложений с интуитивно-понятным интерфейсом.
3. Описанное в данной статье программное приложение реализует инженерно-физический подход для автоматизации начальных стадий проектирования CO₂-лазеров. Оно позволяет конструктору провести разбиение проектируемого устройства на отдельные функциональные части и разработать модели ФПД для каждой из них. Модель ФПД позволяет выявить все необходимые элементарные функции конструктивных элементов и в соответствии с ними подобрать альтернативные конструктивные элементы из различных информационных источников.
4. На заключительном этапе проводится автоматическое объединение таких элементов в комбинации, каждая из которых представляет собой отдельное ТР. Количество таких ТР даже при подборе нескольких десятков конструктивных элементов может достигать порядка сотен тысяч,

которые невозможно составить и затем оценить без использования данного программного приложения. Выбор наиболее подходящих комбинаций для дальнейшей конструктивной реализации осуществляется на основе экспертных оценок по заранее заданным в техническом задании критериям.

5. Разработанное приложение имеет дружелюбный и интуитивно-понятный интерфейс, позволяющий конструктору быстро его освоить и в интерактивном режиме осуществить начальные этапы проектирования, впервые формализованные в рамках инженерно-физического метода и тем самым существенно повысить производительность труда при проектировании новых конструкций CO₂-лазеров.

Научная новизна

Возможность разработки и структурирования в интерактивном режиме моделей ФПД методом «сверху вниз» исходя из общего вербального технического описания устройства с помощью встроенного графического редактора. Автоматический перенос информации о реализуемых физических процессах в подсистему поддержки принятия проектных решений. Автоматическое формирование множеств ТР на основе разработанной модели ФПД и вербальных описаний совместимых конструктивных элементов с учетом заданных в техническом задании критериев.

Практическая значимость

Программное приложение концептуального проектирования технологических CO₂-лазеров позволяет работать в рамках проекта, администрировать его, импортировать и экспортировать файлы с каждого этапа разработки. Его базовыми функциями являются: администрирование проекта, ввод данных, создание графа модели ФПД, поиск конструктивных элементов в базе, синтез ТР и вывод результатов. Разработанное программное приложение позволяет в интерактивном режиме получать и выбирать наборы совместимых функциональных элементов, каждый из которых может быть использован для разработки конструкции нового CO₂-лазера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Acharya S., Chakrabarti A. A conceptual tool for environmentally benign design: development and evaluation of a “proof of concept” // AI EDAM. — 2020. — Vol. 34, no. 1. — P. 30–44. — DOI: 10.1017/S0890060419000313.
2. Глазунов В.Н. Концептуальное проектирование: теория изобретательства. — М.: URSS, 2018. — 508 с.
3. Сорокин А.Б. Концептуальное проектирование интеллектуальных систем поддержки принятия решений // Онтология проектирования. — 2017. — Т. 7, № 3 (25). — С. 247–269.
4. Ключников В.Ю., Романов А.А. Концептуальное проектирование космических систем на основе Lean-принципов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. — 2019. — Т. 6, № 3. — С. 42–56.
5. Wang L., Janssen P., Ji G. SSIEA: a hybrid evolutionary algorithm for supporting conceptual architectural design // AI EDAM. — 2020. — No. 1. — P. 458–476. — DOI: 10.1017/S0890060420000281.

6. Erichsen J.F., Sjöman H., Steinert M., Welo T. Protoboost: gathering and analyzing data on prototyping in early-stage engineering design projects by digitally capturing physical prototypes // AI EDAM. — 2021. — No. 1. — P. 65–80. — DOI: 10.1017/S0890060420000414.
7. Проект «Изобретающая программа Новатор, версия 4.0» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.gp.method.ru/production/novator/novator/> (дата обращения: 17.02.2024).
8. Яковлев А.А. Разработка множества технических решений установок для преобразования энергии: монография. — М.: Машиностроение-1, 2007. — 128 с.
9. Яковлев А.А. О системном подходе к формированию множеств технических решений преобразователей энергии // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2005. — № 7. — С. 44–50.
10. Яковлев А.А., Поступаева С.Г., Федорова Н.В., Сутолов Е.И. Increasing labor productivity in the development of technical systems at the initial stages of design through the formalisation of design procedures // 9th Int. Conf. on System Modeling and Advancement in Research Trends (SMART–2020): Proc. — New Delhi (India), 2020. — P. 262–267.
11. Яковлев А.А., Яковлева Е.В. Автоматизация синтеза и выбора технических решений преобразователей энергии // Информационные технологии. — 2010. — № 11. — С. 71–78.
12. Сорокин В.С. Автоматизация начальных стадий проектирования систем охлаждения с жидким и газообразным рабочим телом [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/avtomatizatsiya-nachalnykh-stadii-proektirovaniya-sistem-okhlazhdeniya-s-zhidkim-i-gazoobr-az?ysclid=lsprh263cw474462538> (дата обращения: 17.02.2024).
13. Яковлев А.А., Федорова Н.В., Плотников В.П., Поступаева С.Г., Барабанов В.Г. Графическая информационная система компьютерного моделирования физических принципов действия технологических лазеров для синтеза новых проектных решений: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023660933. — РФ, 2023.
14. Яковлев А.А., Федорова Н.В., Плотников В.П., Поступаева С.Г., Барабанов В.Г. Автоматизированная информационная система синтеза проектных решений технологических лазеров на основе моделей физического принципа действия: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023685059. — РФ, 2023.

© Плотников Владислав Павлович (vladplotnikov34@gmail.com); Федорова Наталья Валерьевна (missis.yana-1995@yandex.ru);

Яковлев Алексей Андреевич

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРАНСПАРЕНТНОСТИ РЕШЕНИЙ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ МОДУЛЯ ОБЪЯСНИМОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА (ХАИ)

Пчелинцев Игорь Викторович

аспирант, Московский государственный

лингвистический университет

pchel-iv@yandex.ru

ENSURING THE TRANSPARENCY OF INFORMATION SECURITY SYSTEM DECISIONS USING AN EXPLAINABLE ARTIFICIAL INTELLIGENCE (XAI) MODULE

I. Pchelintsev

Summary. The landscape of information security threats is undergoing a fundamental transformation. The focus of attacks is irreversibly shifting from hardware and software vulnerabilities to the exploitation of human operators' cognitive processes through social engineering techniques, enhanced by generative artificial intelligence, voice cloning, and deepfake technologies (deepfakes). In response to these challenges, modern intrusion detection systems and behavioral anti-fraud frameworks are widely adopting deep machine learning architectures. However, the use of complex neural network models gives rise to the critical «black box» problem: the lack of interpretability of algorithmic outputs reduces the level of trust on the part of security monitoring center analysts and directly contradicts current regulatory requirements for the transparency of artificial intelligence systems. This article is devoted to the development and theoretical-empirical justification of the integration of explainable artificial intelligence methods into socio-technical information security systems. The paper formalizes a modified feature localization algorithm, Spatio-Temporal Grad-CAM (L-STG-GradCAM), adapted for spatio-temporal graph convolutional networks (ST-GCN) and temporal transformers in continuous behavioral authentication tasks. Empirical validation of the system was performed using the latest multimodal datasets, VENUS and SEAR (2025), under simulated conditions of extreme class imbalance (1:1000). The research results mathematically prove that the implementation of transparent models not only minimizes the time to early attack detection but also radically reduces operational costs, providing ethically sound decision-making support within the «human-in-the-loop» for the protection of critical information infrastructure and zero-trust architectures.

Keywords: information security, social engineering, zero-trust architecture, socio-technical systems, behavioral biometrics.

Аннотация. Ландшафт угроз информационной безопасности претерпевает фундаментальную трансформацию. Вектор атак необратимо смещается с программно-аппаратных уязвимостей на эксплуатацию когнитивных процессов человека-оператора методами социальной инженерии, усиленной генеративным искусственным интеллектом, клонированием голоса и технологиями глубоких подделок (deepfakes). В ответ на данные вызовы современные системы обнаружения вторжений и контуры поведенческого антифрода массово внедряют архитектуры глубокого машинного обучения. Однако использование сложных нейросетевых моделей порождает критическую проблему «черного ящика»: отсутствие интерпретируемости алгоритмического вывода снижает уровень доверия со стороны аналитиков центров мониторинга безопасности и вступает в прямое противоречие с актуальными регуляторными требованиями к прозрачности систем искусственного интеллекта. Настоящая статья посвящена разработке и теоретико-эмпирическому обоснованию интеграции методов объяснимого искусственного интеллекта в социотехнические системы информационной безопасности. В работе формализован модифицированный алгоритм локализации признаков Spatio-Temporal Grad-CAM (L-STG-GradCAM), адаптированный для пространственно-временных графовых сверточных сетей (ST-GCN) и темпоральных трансформеров в задачах непрерывной поведенческой аутентификации. Эмпирическая верификация комплекса выполнена на базе новейших мультимодальных корпусов данных VENUS и SEAR (2025 г.) в условиях симуляции экстремального дисбаланса классов (1:1000). Результаты исследования математически доказывают, что внедрение прозрачных моделей не только минимизирует время раннего обнаружения атак, но и радикально снижает операционные издержки, обеспечивая этически корректную поддержку принятия решений в парадигме «человек в контуре управления» (Human-in-the-Loop) для защиты критической информационной инфраструктуры и архитектур нулевого доверия.

Ключевые слова: информационная безопасность, социальная инженерия, архитектура нулевого доверия, социотехнические системы, поведенческая биометрия.

Введение

Современная теория и практика обеспечения информационной безопасности переживают глубокий эпистемологический кризис, обусловленный исчерпанием эффективности традиционных техноцентричных парадигм защиты. Исторически сложившиеся архитектуры защиты корпоративного периметра, ба-

зирующиеся на системах управления событиями безопасности (SIEM), поведенческой аналитике сущностей (UEBA) и транзакционном антифроде, оперируют преимущественно статичными индикаторами компрометации (Indicators of Compromise, IoC) [1]. К числу таких индикаторов относятся сигнатуры вредоносного кода, IP-адреса, хеши файлов и аномальные паттерны сетевой

маршрутизации. Однако к 2025–2026 годам злоумышленники в глобальном масштабе перешли к тактикам, при которых технический периметр системы остается нетронутым, а взлому подвергается непосредственно когнитивный аппарат авторизованного пользователя [2].

Статистические данные международных и национальных регуляторов свидетельствуют об экспоненциальном росте социоинженерных атак, многократно усиленных технологиями генеративного искусственного интеллекта. Индустриализация мошенничества привела к тому, что до 79 % фишинговых коммуникаций генерируются большими языковыми моделями (LLM), количество инцидентов с использованием клонирования голоса (Voice Cloning) в реальном времени возросло на 14 %, а применение интерактивных дипфейков (Deepfakes) в бизнес-коммуникациях — на 16 % [3]. В подобных сценариях легитимный пользователь, находясь под глубоким психологическим давлением, самостоятельно инициирует транзакцию или выполняет деструктивную команду [4]. В результате традиционные системы класса SIEM оказываются методологически «слепыми», классифицируя действия субъекта как легитимные [5].

Данный системный сдвиг диктует необходимость перехода от концепции защиты ИТ-периметра к концепции непрерывной поведенческой аутентификации в рамках архитектуры нулевого доверия [6]. В качестве фундаментальной метрики безопасности начинают выступать индикаторы поведения (Indicators of Behavior, IoB), извлекаемые методами поведенческой биометрии и компьютерного зрения из видеопотока пользователя в режиме реального времени. Глубокие нейронные сети, в частности пространственно-временные графовые сверточные сети (ST-GCN) и темпоральные трансформеры, демонстрируют выдающуюся точность в детекции состояний когнитивной перегрузки и потери субъектом волевой автономности.

Тем не менее, повсеместное внедрение глубокого машинного обучения в критически важные контуры принятия решений — такие как блокировка финансовых операций или управление доступом на объектах критической информационной инфраструктуры (КИИ) — сталкивается с фундаментальным барьером в виде проблемы «черного ящика» (Black-Box Problem). Нейросетевые модели, обладая миллионами синаптических весов, генерируют вероятностные оценки, логика которых абсолютно непрозрачна для конечного пользователя — офицера безопасности или оператора SOC [7]. Отсутствие прозрачности приводит к критическому снижению доверия к системе: аналитики не могут отличить истинное срабатывание, вызванное реальной атакой, от ложноположительного алерта (False Positive), спровоцированного стохастическим оптическим шумом или естественным моторным тиком пользователя.

Более того, прозрачность алгоритмов искусственного интеллекта перестала быть сугубо академической проблемой и перешла в разряд строгих нормативно-правовых императивов. Глобальные регуляторные акты, такие как Общий регламент по защите данных Европейского Союза (GDPR, статьи 13–15 и 22), Акт об искусственном интеллекте (EU AI Act), а также новые законодательные инициативы в области прозрачности обучающих данных и архитектур (например, California AB 2013, вступивший в силу в 2026 году), прямо требуют обеспечения «права на объяснение» логики автоматизированного принятия решений [8]. В связи с этим, проектирование модулей объяснимого искусственного интеллекта (Explainable AI, XAI) становится неотъемлемым этапом разработки любой социотехнической системы безопасности [9].

Целью данной работы является разработка и комплексная верификация архитектуры прозрачной системы защиты информации на основе гибридной модели поведенческой видеоаналитики и модифицированного алгоритма локализации признаков Spatio-Temporal Grad-CAM (L-STG-GradCAM). Для достижения поставленной цели в работе решается комплекс задач, включающий формализацию психологических механизмов когнитивного подавления в измеримые биомеханические предикаты, построение математического аппарата XAI для пространственно-временных графов, а также строгую количественную оценку качества генерируемых объяснений в условиях экстремального дисбаланса классов на базе новейших мультимодальных наборов данных 2025 года (SEAR и VENUS).

Теоретико-методологический базис социотехнических систем информационной безопасности

Информационная безопасность в современной парадигме не может рассматриваться как изолированный набор криптографических алгоритмов и межсетевых экранов. В соответствии с принципами системного анализа, кибербезопасность предприятия или финансового учреждения представляет собой сложную социотехническую систему (СТС), в которой гетерогенные технические элементы (аппаратные сенсоры, алгоритмы, сети) находятся в непрерывном и нелинейном взаимодействии с социальными компонентами (корпоративной культурой, регламентами, когнитивными и психологическими паттернами персонала). Любое деструктивное воздействие на СТС следует рассматривать как возмущающий оператор, стремящийся вывести систему из состояния гомеостаза путем атаки на ее наиболее слабое, «нулевое» звено — человека-оператора [10].

В основе методологии лежит детекция когнитивной перегрузки, при которой аналитическое мышление по-

давляется, что, согласно гипотезе торможения П. Экмана, неизбежно провоцирует микроутечки невербальной информации (окулесика, кинесика, микроэкспрессии) [11] [12].

Формализация биомаркеров когнитивного дистресса

Для перехода от психологических абстракций к тензорным вычислениям требуется строгая математическая операционализация невербальных предикатов. Архитектура разрабатываемой системы, функционирующей на границе сети (Edge Computing), осуществляет извлечение трех независимых модальностей, формирующих интегральный вектор состояния субъекта.

1. Окулесика и глазодвигательная активность. Ритмика саккад и паттерны морганий контролируются автономной нервной системой и напрямую связаны с загруженностью рабочей памяти. Алгоритм непрерывно вычисляет геометрическую метрику соотношения сторон глаза (Eye Aspect Ratio, EAR) по реперным точкам периорбитальной зоны:

$$EAR = \frac{\|p_2 - p_6\| + \|p_3 - p_5\|}{2\|p_1 - p_4\|}$$

В состоянии острой паники дисперсия EAR аномально возрастает (учащенное моргание), а при глубоком поведенческом «зависании» (freezing) — критически падает. Дополнительно вычисляется стационарная энтропия взгляда (Stationary Gaze Entropy, SGE), формализующая феномен «туннельного зрения» (когда жертва неотрывно смотрит в одну точку, получая инструкции):

$$SGE = - \sum_{i \in AOI} p(i) \log_2 p(i)$$

где $p(i)$ — вероятность фиксации взгляда в пространственной зоне i . Резкое падение SGE выступает высокоточным предиктором потери контекстуального контроля.

2. Микроэкспрессии лица (Facial Action Units). В отличие от устаревших подходов детерминированного распознавания 6 базовых макро-эмоций, алгоритм оперирует интенсивностями сокращения специфических лицевых мышц по системе FACS. Паттерн мобилизации и скрытой тревоги характеризуется коактивацией двигательных единиц AU1, AU2 и AU4 (сведение и поднятие бровей). Паттерн подавления эмоций и когнитивного диссонанса манифестируется через спазмы периоральной мускулатуры: AU14, AU20 и AU24 [13]. Данные метрики извлекаются на базе трехмерной топологии лица (например, модели FLAME) [14].
3. Кинесика и пространственно-временные графы. Человеческое тело моделируется как неориенти-

рованный граф $g = (v, \varepsilon)$, где узлы v — координаты 33 скелетных суставов (на основе SMPL-X или MediaPipe Holistic), а ребра ε отражают анатомические связи. Вычисление косинусных расстояний и вторых производных позволяет детектировать жесткую асимметрию позы (например, удержание мобильного телефона у уха плечом при работе с банкоматом) и темпоральную асинхронию (микрораздержки реакций) [15].

Эти деперсонализированные графы, не содержащие фотореалистичных изображений, мгновенно передаются в централизованное облако банка, обеспечивая соблюдение принципов Privacy-by-Design и жестких требований законодательства в сфере биометрических данных (например, 152-ФЗ и 572-ФЗ).

Популяционный контур: Темпоральные Трансформеры

Первый эшелон защиты направлен на выявление универсальных, эволюционно детерминированных паттернов стресса. Он реализован на базе архитектуры Темпорального Трансформера (Temporal Transformer) с использованием механизма многоголового самовнимания (Multi-Head Self-Attention, MHSA) [16]. Механизм самовнимания вычисляет матрицу релевантности каждого кадра по отношению ко всем остальным фреймам в скользящем окне T :

$$Attention(Q, K, V) = \text{Softmax}\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V$$

где запросы (Q), ключи (K) и значения (V) формируются из линейных проекций поведенческих графов. Данная топологическая особенность позволяет алгоритму устанавливать нелинейную каузальную связь между микроэкспрессией страха на первой секунде и длительным замиранием (freezing) на седьмой секунде, игнорируя неинформативный оптический шум [17]. Выходом контура является скалярный популяционный скор R_{pop} , отражающий общую вероятность компрометации.

Персонализированный контур: Пространственно-временные Автоэнкодеры (STAE)

Для исключения алгоритмической дискриминации нейроотличных лиц внедрен персонализированный контур, функционирующий в парадигме обнаружения аномалий посредством одноклассовой классификации (One-Class Classification, OCC) [18]. Вычислительным ядром выступает пространственно-временной автоэнкодер (STAE) на базе сверточных LSTM (ConvLSTM). Модель обучается исключительно на выборках нормально-штатного взаимодействия конкретного пользователя с системой. Энкодер нелинейно проецирует многомер-

ный тензор поведения в компактное латентное пространство Z , инкапсулируя индивидуальные биомеханические сигнатуры (вплоть до частоты дыхания и осанки). Декодер минимизирует целевую функцию среднеквадратичной ошибки реконструкции (MSE):

$$L_{MSE} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \|X_t - D_{\psi}(\varepsilon_{\phi}(X_t))\|_2^2$$

При деструктивном манипулятивном воздействии кинесика жертвы искажается. Автоэнкодер, откалиброванный под индивидуальную «расслабленную норму», оказывается неспособен реконструировать аномальный сигнал, что вызывает резкий экспоненциальный скачок ошибки L_{MSE} . Значение ошибки сопоставляется с динамическим адаптивным порогом, вычисляемым по методу экспоненциально взвешенного скользящего среднего (EWMA), формируя индивидуальный риск R_{ind} .

Компенсация концептуального дрейфа: Упругая консолидация весов (EWC)

Моторика и эргономические привычки человека неизбежно эволюционируют с течением времени. Статичная модель STAE со временем начнет генерировать ложные срабатывания. Для решения проблемы «старения профиля» без нарушения требований конфиденциальности (запрет на длительное хранение исторических биометрических данных) применяется инкрементальное обучение с алгоритмом упругой консолидации весов [19]. Модифицированная целевая функция включает регуляризационный штраф на основе диагонали матрицы информации Фишера (F_i):

$$L_{EWC} = L_{new} + \sum_i \frac{\lambda}{2} F_i (\theta_i - \theta_{old,i})^2$$

Это позволяет автоэнкодеру усваивать новые легитимные моторные паттерны «на лету», блокируя изменения тех синаптических весов, которые критически важны для сохранения фундаментального исторического профиля субъекта (предотвращая «катастрофическое забывание») [20].

Модуль объяснимого ИИ (XAI) на базе Spatio-Temporal Grad-CAM

Как было отмечено выше, достижение высокой точности классификации само по себе недостаточно для внедрения системы в реальную архитектуру нулевого доверия [6]. Если P_{total} превышает критический порог, алгоритм генерирует алерт, блокирующий доступ диспетчера АЭС или останавливающий транзакцию. В парадигме «Человек в контуре управления» офицер безопасности не имеет права принимать решение, опираясь на вывод непрозрачного «черного ящика» [21]. Для формирования доверенной и аудируемой среды

в архитектуру интегрирован модуль объяснимого искусственного интеллекта на базе модифицированного алгоритма Gradient-weighted Class Activation Mapping (Grad-CAM) [7].

Классический Grad-CAM, изначально разработанный для двумерных сверточных сетей (CNN) в задачах распознавания статических изображений, использует градиенты целевого класса, протекающие в последний сверточный слой, для создания грубой карты локализации, выделяющей важные регионы [22]. В контексте поведенческой видеоаналитики мы оперируем многомерными пространственно-временными графами, где важно не только где произошла аномалия (какая часть тела), но и когда (в какой фрейм темпорального окна) [17].

Для адаптации метода к архитектурам ST-GCN и темпоральным трансформерам разработан алгоритм Layer-specific Spatio-Temporal Graph Grad-CAM (L-STG-GradCAM) [23]. Алгоритм вычисляет матрицу градиентов логита вероятности аномалии y^c по отношению к картам активаций $H^{(l)} \in \mathbb{R}^{T \times |V| \times C}$ (где T — временное окно, v — множество вершин графа лица и скелета, C — количество каналов) последнего агрегирующего слоя.

Сначала вычисляется вектор нормализованных весов $\alpha_c^{(l)}$, отражающий глобальную значимость каждого канала признаков для предсказания деструктивного воздействия:

$$\alpha_c^{(l)} = \frac{1}{T * |V|} \sum_{t=1}^T \sum_{u \in V} \frac{\partial y^c}{\partial H_{t,u}^{(l)}}$$

Затем формируется итоговая интерпретируемая пространственно-временная тепловая карта (Spatio-Temporal Heatmap) $M_c^{(l)}(t, u)$ путем линейной комбинации карт активаций с весами $\alpha_c^{(l)}$, пропущенной через функцию активации ReLU [23]:

$$M_c^{(l)} = \text{ReLU} \left(\sum_{k=1}^C \left(\alpha_c^{(l)} \right)_k H_{t,v,k}^{(l)} \right)$$

Математическое применение нелинейной функции ReLU имеет фундаментальный физический и семантический смысл. Оно отсекает отрицательные значения градиентов, оставляя на тепловой карте исключительно те паттерны моторики и окулесики, которые оказали строго положительное влияние на рост вероятности атаки (то есть именно те маркеры, которые сигнализируют о стрессе, игнорируя фоновые движения) [24].

На практике, когда интегральный риск превышает порог, модуль L-STG-GradCAM проецирует тепловую карту поверх обезличенной скелетной и лицевой репрезентации клиента на дашборде аналитика SOC [25]. Система

визуально подсвечивает красным спектром конкретные аномалии: например, яркая засветка периорбитальной мускулатуры (коактивация AU4) в сочетании с аномально низким морганием (EAR), и тепловое пятно на левом плечевом узле (асимметрия удержания смартфона). Это переводит процесс принятия решения из области субъективных допущений искусственного интеллекта в плоскость доказуемой поведенческой фактуры, предоставляя офицеру безопасности веские основания для инициации протокола «когнитивного прерывания» транзакции [12].

Строгая квантификация качества объяснений: метрики XAI

Визуальная оценка тепловых карт Grad-CAM человеком субъективна и склонна к эффекту подтверждения. Для математически строгого доказательства того, что генерируемые объяснения действительно отражают внутреннюю логику глубокой нейросети, а не являются случайными оптическими артефактами, в современной теории XAI применяется комплекс количественных метрик: достоверность, робастность и сложность [26].

Оценка данных метрик критически важна для защиты самой системы машинного обучения от состязательных атак (Adversarial Attacks in Cybersecurity). Злоумышленники могут применять оптические патчи или программные инъекции (Adversarial Machine Learning), чтобы заставить нейросеть классифицировать скомпрометированную сессию как «норму» [7]. Модуль XAI позволяет вскрыть такой обман: если тепловая карта Grad-CAM начинает фокусироваться на бессмысленном фоновом пиксельном шуме в углу кадра, игнорируя реальное лицо оператора, это является однозначным математическим доказательством того, что алгоритм подвергся атаке уклонения (Evasion Attack) [12].

Экспериментальная апробация на мультимодальных корпусах SEAR и VENUS

Для обучения и верификации гибридного комплекса в условиях, максимально приближенных к реальному противодействию киберугрозам, был использован синтез новейших мультимодальных корпусов 2025 года: VENUS и SEAR.

В качестве массива легитимных, нормальных действий (мажоритарный класс, $S = 0$), на котором инкрементально обучались индивидуальные пространственно-временные автоэнкодеры (STAE), использовался беспрецедентный по объему набор данных VENUS (VidEo with Nonverbal-cues and Utterance Set). Корпус VENUS содержит 89 459 аннотированных диалогов (1,1 млн реплик), собранных в неконтролируемых условиях (in-the-wild). Уникальность VENUS заключается в наличии

детализированных псевдо-3D кинематических аннотаций, извлеченных с использованием морфных моделей FLAME (лицо) и SMPL-X (скелет). Это позволило алгоритмам STAE усвоить колоссальное многообразие естественных человеческих реакций в состоянии когнитивного покоя: естественную вариативность морганий (EAR), микромоторику речи и свободную кинеснику [14].

Миноритарный класс истинных аномалий ($S = 1$), моделирующий состояние когнитивного подавления и перехвата воли, формировался из тензоров революционного датасета SEAR (Social Engineering Attacks via Augmented Reality and Large Language Models), представленного на конференции AAAI 2025.3 Набор SEAR включает 180 глубоко аннотированных сессий, в которых 60 участников подвергались реалистичным, многоступенчатым атакам социальной инженерии, оркестрируемым мультимодальными агентами на базе LLM (Gemma 3-12B). В ходе эксперимента злоумышленники добивались показателя успешности (trust hijacking) в 93,3 % случаев [27].

Результаты оценки эффективности в условиях дисбаланса классов

Фундаментальной проблемой кибербезопасности является экстремальный дисбаланс классов. В реальных транзакционных системах легитимные операции доминируют над атаками социальной инженерии в пропорциях, превышающих 10 000:1. В таких условиях классическая метрика ROC-AUC (Area Under the Receiver Operating Characteristic Curve) математически дискредитирована. Колоссальное количество истинно отрицательных сессий (TN) в знаменателе формулы FPR искусственно прижимает метрику ложных тревог к нулю, маскируя так называемый «эффект потолка» и формируя ложный оптимизм у инженеров [28].

Для объективной валидации данные VENUS и SEAR смешивались в пропорции 1:1000. В качестве главной целевой метрики использовалась площадь под кривой точности и полноты (AUC-PR — Area Under the Precision-Recall Curve), которая инвариантна к истинно отрицательным результатам и фокусируется исключительно на качестве предсказаний миноритарного класса аномалий. Оптимальная рабочая точка определялась через метрику равной ошибки (EER) — точку, где вероятность ложного пропуска атаки (FRR) равна вероятности ложноположительной блокировки (FAR). Дополнительно измерялось среднее время обнаружения угрозы (Time-to-Detect, TTD) — критический параметр для блокировки операций в системах быстрых платежей. Сводные результаты представлены в Таблице 1.

Результаты эмпирически доказывают архитектурное превосходство гибридной модели. Изолированный

Таблица 1.

Сравнительная эффективность алгоритмических архитектур в условиях экстремального дисбаланса классов (1:1000)

Архитектура нейросетевой модели	Математический базис и особенности	AUC-ROC	AUC-PR	EER (%)	TTD (сек)	FPR при 95 % TPR
Random Forest (Baseline)	Статическая эвристика усредненных признаков	0.814	0.342	14.5	N/A	22.4 %
3D-CNN + LSTM	Анализ сырых пикселей видео (Black Box)	0.887	0.518	9.2	12.4	15.1 %
Temporal Transformer	Изолированная популяционная модель (MHSA)	0.932	0.745	5.8	6.8	8.3 %
STAE	Изолированная модель персонализированной нормы (OCC)	0.941	0.792	4.3	7.5	6.1 %
Гибридная модель (Предлагаемая)	Трансформер + STAE + Bayesian Fusion + XAI	0.985	0.924	1.8	5.2	2.1 %

трансформер (AUC-PR 0.745, FPR 8.3 %), обучаясь на общих паттернах стресса, неизбежно пенализирует нейроотличных субъектов с естественной суетливостью, генерируя ложные срабатывания. Внедрение контура персонализированной нормы STAE с адаптивным порогом EWMA позволяет отфильтровать этот индивидуальный шум. Синтез двух моделей посредством байесовского слияния (Score-Level Fusion) доводит метрику AUC-PR до выдающихся 0.924, снижая EER до 1.8 %. Важнейшим операционным достижением является минимизация TTD до 5.2 секунды. Механизм самовнимания трансформера способен выхватить критическую корреляцию между микроэкспрессией страха и задержкой ответа (latency) в рамках ультракороткого скользящего окна, что позволяет инициировать прерывание до фактического акцептования транзакции.

Абляционное исследование мультимодальности

Для строгого доказательства необходимости сбора кинесических, окулесических и мимических данных был проведен протокол пространственно-временного абляционного тестирования. Гибридная модель последовательно подвергалась искусственному «ослеплению» (отключению подпространств признаков в тензоре X).

Результаты абляции опровергают постулаты классических систем распознавания макро-эмоций, доказывая, что изолированный анализ лица математически недостаточен для выявления ДИВ. Наиболее сокрушительное падение качества (–18.0%) наблюдается при исключении параметров глазодвигательной активности (окулесики). Именно флуктуации EAR и энтропии взгляда (SGE, GTE), жестко контролируемые вегетативной нервной системой, первыми сигнализируют об отключении аналитического мышления жертвы. Мультимодальный синтез также повышает робастность системы: при частичной окклюзии лица (например, медицинской маской) механизм самовнимания динамически перераспределяет весовые коэффициенты на видимые узлы скелета и периферическую зону, сохраняя общую стабильность защиты.

Таблица 2.

Результаты абляционного исследования модальностей на корпусе SEAR/VENUS

Исключаемая модальность из тензора признаков	Итоговое значение AUC-PR	Деградация метрики (Δ)	Семантическая интерпретация потери данных в контексте социальной инженерии
Полная гибридная модель	0.924	—	Синергетический захват индикаторов когнитивного диссонанса и моторного замирания.
Без Facial Action Units (лицевая мимика)	0.841	–8.9 %	Утрата маркеров подавленной тревоги (коактивация AU1, AU4, AU14). Жертвы под жестким диктатом часто демонстрируют «эмоциональное уплощение», поэтому спад метрики умеренный.
Без Kinesics (графы 33 узлов макромоторики)	0.812	–12.1 %	Невозможность фиксации биомеханической асимметрии (удержание смартфона у уха) и паттернов моторного замирания (postural freezing) при перегрузке рабочей памяти.
Без Oculistics (векторы взгляда, EAR, SGE)	0.758	–18.0 %	Критическая утрата способности выявлять феномен «туннельного зрения» и сужение пространственной энтропии взгляда — главных предикторов истощения аналитического ресурса.

Заключение

Индустриализация кибермошенничества и смещение фокуса атак с программно-аппаратных уязвимостей на эксплуатацию когнитивного периметра человека ме-

тодами социальной инженерии, дипфейков и генеративного ИИ требуют фундаментального пересмотра парадигмы обеспечения информационной безопасности. В настоящем исследовании разработана и всесторонне верифицирована транспарентная гибридная нейросетевая архитектура непрерывной поведенческой аутентификации, интегрирующая модули объяснимого искусственного интеллекта (XAI).

Синергетическое объединение популяционного контура (темпоральные трансформеры с механизмом многоголового самовнимания) и персонализированного контура (пространственно-временные автоэнкодеры с алгоритмом инкрементального обучения EWC) позволило эффективно решить проблему «старения профиля» и исключить скрытую алгоритмическую дискриминацию лиц с нейроотличиями. Экспериментальная оценка на базе передовых мультимодальных датасетов VENUS и SEAR (2025 г.) в условиях экстремального дисбаланса классов (1:1000) эмпирически подтвердила выдающуюся дискриминационную способность предложенного комплекса: достижение метрики AUC-PR 0.924, снижение уровня равной ошибки (EER) до 1.8 % и минимизация времени обнаружения (Time-to-Detect) до 5.2 секунды. Абляционное тестирование неопровержимо доказало критическую значимость мультимодального анализа — совместного мониторинга окуlesiки (энтропии взгляда), кинесики и микромимики — для детекции латентных со-

стояний когнитивной перегрузки и поведенческого замедления.

Ключевым научным результатом является внедрение модифицированного алгоритма Spatio-Temporal Grad-CAM (L-STG-GradCAM), позволяющего генерировать интерпретируемые пространственно-временные тепловые карты на основе абстрактных графовых структур. Количественная метрика достоверности (faithfulness), измеряемая методами Deletion/Insertion AUC, доказала высокую корреляцию между выделяемыми XAI визуальными паттернами и внутренней логикой принятия решений нейронной сетью. Генерация прозрачных каузальных объяснений переводит процесс из плоскости допущений «черного ящика» в плоскость объективной поведенческой фактуры.

Предложенный комплекс формирует этически корректный и аудируемый контур поддержки принятия решений для операторов центров мониторинга (SOC) в парадигме «Человек в контуре управления» (Human-in-the-Loop). Технологическая реализация на принципах периферийных вычислений (Edge Computing) обеспечивает непрерывную защиту архитектур нулевого доверия (Zero Trust) на объектах КИИ и в финансовом секторе при абсолютном соблюдении императивных требований конфиденциальности (Privacy-by-Design) законодательства о биометрических персональных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Indicators of Behavior // DeepWatch: сайт. — URL: <https://www.deepwatch.com/glossary/indicators-of-behavior/> (дата обращения: 12.02.2026).
2. Callaghan C.W. Surviving a technological future: Technological proliferation and modes of discovery // Futures. — 2018. — Т. 104. — С. 100–116.
3. AI-driven social engineering attacks: 2025 trends // sosafe: сайт. — URL: <https://sosafe-awareness.com/blog/ai-social-engineering-attacks-2025-trends/> (дата обращения: 15.02.2026).
4. 2025 Unit 42 Global Incident Response Report: Social Engineering Edition // Palo Alto Networks: сайт. — URL: <https://unit42.paloaltonetworks.com/2025-unit-42-global-incident-response-report-social-engineering-edition/> (дата обращения: 15.02.2026).
5. The State of AI in Cybersecurity 2026 // Sagnetap: сайт. — URL: <https://www.sagnetap.io/resource/h2-2025-cybersecurity-report> (дата обращения: 15.04.2026).
6. Ogunmolu A.M. Leveraging generative AI and behavioral biometrics to strengthen zero trust cybersecurity architectures in healthcare systems // Journal of Engineering Research and Reports. — 2025. — Т. 27. — №. 5. — С. 194–213.
7. Zhang Z. et al. Explainable artificial intelligence applications in cyber security: State-of-the-art in research // IEEE Access. — 2022. — Т. 10. — С. 93104–93139.
8. xAI fails to block California AI transparency law requiring training data disclosure // mexc: сайт. — URL: <https://www.mexc.com/news/863444> (дата обращения: 16.02.2026).
9. Tsarouhas P., Grigoriadis K. A socio-technical framework for AI trust in public administration // Transforming Government: People, Process and Policy. — 2025. — С. 1–22.
10. Tiwari S. Social Engineering Attacks: Trends, Psychological Triggers, and AI-driven Prevention. — 2025.
11. Behavioral Biometrics: The Future of Continuous, Passwordless Authentication // OLOID: сайт. — URL: <https://www.oloid.com/blog/behavioral-biometrics> (дата обращения: 16.02.2026).
12. Kate A. Explainable AI (XAI) for Transparent Decision-Making in Zero Trust-Based Critical Infrastructure Security Systems. — 2026.
13. Zhao H. et al. Temporal-spatial correlation and graph attention-guided network for micro-expression recognition in English learning livestreams // Discover Computing. — 2024. — Т. 27. — №. 1. — С. 47.
14. Kim Y. et al. Speaking Beyond Language: A Large-Scale Multimodal Dataset for Learning Nonverbal Cues from Video-Grounded Dialogues // Proceedings of the 63rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers). — 2025. — С. 2247–2265.
15. Bittner M. et al. Towards single camera human 3D-kinematics // Sensors. — 2022. — Т. 23. — №. 1. — С. 341.
16. Transformers for time-series forecasting: A comprehensive survey through 2024.
17. Ren Z., Xiao X., Nie H. Empowering efficient spatio-temporal learning with a 3D CNN for pose-based action recognition // Sensors. — 2024. — Т. 24. — №. 23. — С. 7682.

18. Xie J. et al. BeSTAD: Behavior-Aware Spatio-Temporal Anomaly Detection for Human Mobility Data //Proceedings of the 2nd ACM SIGSPATIAL International Workshop on Geospatial Anomaly Detection. — 2025. — С. 56–59.
19. Liu X., Chang X. Elastic Weight Consolidation Done Right for Continual Learning //arXiv preprint arXiv:2603.18596. — 2026.
20. Kutlu Z., Emiroğlu B.G. Image-Based Threat Detection and Explainability Investigation Using Incremental Learning and Grad-CAM with YOLOv8 //Computers. — 2025. — Т. 14. — №. 12. — С. 511.
21. Hoenig A. et al. Explainable AI for cyber-physical systems: Issues and challenges //IEEE access. — 2024. — Т. 12. — С. 73113–73140.
22. Selvaraju R.R. et al. Grad-cam: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization //Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. — 2017. — С. 618–626.
23. Das P., Shekkizhar S., Ortega A. Towards a geometric understanding of spatiotemporal graph convolution networks //IEEE Open Journal of Signal Processing. — 2024. — Т. 5. — С. 1023–1030.
24. A Comprehensive Review of Explainable Artificial Intelligence (XAI) in Computer Vision, accessed April 26, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12252469/>.
25. Rastogi N. et al. Too Much to Trust? Measuring the Security and Cognitive Impacts of Explainability in AI-Driven SOC's //arXiv preprint arXiv:2503.02065. — 2025.
26. Dash S. et al. Explainable multi-modal deep learning for transparent cancer diagnosis: integrating radiology, clinical features, and decision visualization //Frontiers in Artificial Intelligence. — 2026. — Т. 9. — С. 1767612.
27. Bi T. et al. On the feasibility of using multimodal LLMs to execute social engineering attacks //Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. — 2026. — Т. 40. — №. 45. — С. 38252–38260.
28. Parlanti T.S., Catania C.A. Temporal Analysis Framework for Intrusion Detection Systems: A Novel Taxonomy for Time-Aware Cybersecurity //arXiv preprint arXiv:2511.03799. — 2025.

© Пчелинцев Игорь Викторович (pchel-iv@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОММИВОЯЖЁРА С ПОМОЩЬЮ RESIDUAL GATED GRAPH CONVNET

SOLVING THE TRAVELING SALESMAN PROBLEM USING RESIDUAL GATED GRAPH CONVNET

V. Reshetov

Summary. This article investigates the application of graph neural networks to solving the Traveling Salesman Problem (TSP), including for large-scale graphs where classical methods become computationally inefficient. The primary architecture considered is the Residual Gated Graph ConvNets (RGGCN) model, which demonstrates promising properties in graph-based tasks. The main objective of the study is to analyze the applicability of this architecture to solving the TSP in terms of accuracy, scalability, and efficiency compared with existing approaches—both exact algorithms (e.g., the branch-and-bound method) and approximate ones, including neural-network-based and heuristic methods.

The research methodology includes implementing the neural network model, automatically generating training data with various graph characteristics, and conducting experiments for training and testing the network. The model's results are compared with reference tours obtained using exact algorithms across a range of metrics, including tour length and computation time. The paper presents comparative plots and tables reflecting the effectiveness of the proposed approach.

The study concludes that the Residual Gated Graph ConvNets architecture is competitive in the context of the Traveling Salesman Problem and outlines directions for further development of the model and training on more complex graph structures.

Keywords: graph neural networks, Residual Gated Graph ConvNets, Traveling Salesman Problem, neural-network-based approximation algorithms, graph optimization, synthetic data generation, machine learning, artificial neural networks.

Решетов Виктор Олегович

Аспирант, Воронежский

Государственный Университет, г. Воронеж

vityareshetov@yandex.ru

Аннотация. Данная статья посвящена исследованию применения графовых нейронных сетей к решению задачи коммивояжёра, в том числе на графах большой размерности, где классические методы становятся вычислительно неэффективными. В качестве основной архитектуры рассмотрена модель Residual Gated Graph ConvNets (RGGCN), демонстрирующая перспективные свойства в задачах на графах. Основной целью исследования является анализ применимости данной архитектуры к решению TSP с точки зрения точности, масштабируемости и эффективности по сравнению с существующими подходами — как точными алгоритмами (например, метод ветвей и границ), так и приближёнными, включая нейросетевые и эвристические методы.

Методология исследования включает реализацию нейросетевой модели, автоматическую генерацию обучающих данных с различными характеристиками графов, а также проведение экспериментов по обучению и тестированию сети. Результаты модели сравниваются с эталонными маршрутами, полученными точными алгоритмами, по ряду метрик, включая длину маршрута и время расчёта. В работе представлены сравнительные графики и таблицы, отражающие эффективность предложенного подхода.

Сделан вывод о конкурентоспособности архитектуры Residual Gated Graph ConvNets в контексте задачи коммивояжёра и обозначены направления дальнейшего развития модели и обучения на более сложных структурах графов.

Ключевые слова: графовые нейронные сети, Residual Gated Graph ConvNets, задача коммивояжера, нейросетевые приближенные алгоритмы, оптимизация на графах, генерация синтетических данных, машинное обучение, искусственные нейронные сети.

Задача коммивояжёра является одной из классических задач комбинаторной оптимизации. В ней требуется найти кратчайший возможный маршрут, проходящий через заданное множество точек ровно один раз и возвращающийся в исходную точку. Несмотря на простоту постановки это NP-трудная задача, что означает невозможность ее точного решения за полиномиальное время для произвольно больших входных данных [1].

Задача коммивояжёра имеет важное теоретическое и практическое значение, широко используется в качестве мерила в вычислительной математике и информатике. Для решения задачи коммивояжёра разрабатывались различные алгоритмы, которые можно разделить

на две большие группы: точные методы (например, метод ветвей и границ) и эвристики (такие как алгоритмы 2-opt, симулированного отжига, генетические алгоритмы и др.) [2]. Точные алгоритмы характеризуются высокой вычислительной сложностью, что делает их неподходящим для больших графов, их реализацию предоставляет различное программное обеспечение, например, Concorde [3]. Эвристики же разработаны, чтобы обеспечить оптимальную вычислительную сложность. Однако по мере роста размера графа даже приближенные алгоритмы начинают сталкиваться с ограничениями по скорости и качеству решений, что особенно заметно в системах реального времени, работающих с большими объемами данных.

Одной из первых искусственных нейронных сетей, разработанных для решения задачи коммивояжёра, была модель, известная как сеть Хопфилда [4], но были и некоторые другие начальные попытки [5], которые с точки зрения скорости и оптимальности демонстрировали неудовлетворительные результаты относительно эвристических алгоритмов.

В настоящем графовые нейронные сети привлекают повышенное внимание как инструмент для решения различных задач [6], а исследования показывают эффективность таких сетей для решения многих проблем, где данные естественным образом выражаются в виде графов [7], что делает их интересным инструментом для решения задачи коммивояжёра.

В этой статье анализируется архитектура Residual Gated Graph ConvNets для приближительного решения задачи коммивояжёра. Так как с помощью искусственной нейронной сети можно получить только приближенное решение, то предсказание будет выглядеть как тепловая карта для всех ребер в анализируемом графе.

Формально задачу коммивояжера можно сформулировать следующим образом: пусть дан граф $G = (V, E, \omega)$,

где V — множество вершин (городов), причем $|V| = n$,
 E — множество ребер,
 ω — функция весов ребер (расстояний между точками).

Требуется найти перестановку вершин

$$\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n),$$

$$\pi_i \in V, \pi_i \neq \pi_j \text{ при } i \neq j,$$

которая будет минимизировать следующую целевую функцию:

$$C(\pi) = \sum_{i=1}^{n-1} \omega(\pi_i, \pi_{i+1}) + \omega(\pi_n, \pi_1).$$

В итоге задача выглядит следующим образом:

$$\min_{\pi \in P_n} C(\pi),$$

где P_n — множество всех перестановок n элементов.

Residual Gated Graph ConvNets представляют собой обобщение рекуррентных нейронных сетей на графовые структуры [8]. Архитектура опирается на итеративное распространение информации между вершинами с использованием механизма обновления состояния на основе Gated Recurrent Unit (GRU) [9].

Такой подход позволяет моделировать сложные зависимости в графах, включая задачу коммивояжера [10].

GGCNN представляет граф $G = (V, E)$ в виде множества вершин с начальными признаками $h_v^{(0)} \in \mathbb{R}^d$. На каждой итерации t , каждая вершина v получает агрегированное сообщение от своих соседей:

$$m_v^{(t)} = \sum_{u \in N(v)} f_m(h_u^{(t-1)}, h_v^{(t-1)}, e_{uv}),$$

где f_m — функция формирования сообщения, зависящая от состояния соседних узлов и признаков рёбер e_{uv} .

Далее состояние вершины обновляется с использованием GRU-модуля:

$$h_v^{(t)} = \text{GRU}(m_v^{(t)}, h_v^{(t-1)}).$$

Таким образом, сеть моделирует процесс итеративного распространения информации по графу, позволяя каждой вершине накапливать контекст о структуре всего графа, что позволяет оценить вероятность вхождения ребра в предсказанный оптимальный путь.

Выбор архитектуры Residual Gated Graph ConvNet для решения задачи коммивояжёра обусловлен совокупностью её структурных преимуществ, которые делают данный класс моделей особенно подходящим для обработки графов со сложной топологией и выраженными зависимостями между вершинами. В отличие от классических GCN, использующих усреднение соседей как основной механизм агрегации, RGGCN опирается на рекуррентный механизм обновления состояния узлов на основе GRU и тем самым обеспечивает более выразительную передачу информации в глубину графа.

Одним из ключевых факторов выбора RGGCN является наличие остаточных связей (residual connections), позволяющих эффективно обучать более глубокие графовые модели. Для задач, подобных TSP, где качество предсказания существенно зависит от способности модели учитывать контекст удалённых вершин, глубина сети играет решающую роль. Однако стандартные GNN часто сталкиваются с эффектом «размывания» представлений (over-smoothing), при котором по мере увеличения числа слоёв признаки вершин становятся практически неразличимы. Residual-связи в RGGCN позволяют избежать этой проблемы и стабилизируют процесс обучения.

Используемый в RGGCN механизм gated message passing, основанный на Gated Recurrent Unit, обеспечивает модель возможностью адаптивно контролировать, какая информация должна быть передана или подавлена при каждом шаге распространения сообщений. Это особенно важно в задаче коммивояжёра, где значение каждого ребра определяется не локальным, а глобальным контекстом всего графа. GRU-модуль даёт возможность моделировать долгосрочные зависимости и аккумулировать сведения о структуре графа на множестве итераций, что повышает точность выделения значимых рёбер.

Кроме того, архитектура RGGCN обеспечивает высокую устойчивость к вариативности входных графов, включая графы, которые не встречались модели в процессе обучения. Такая способность к обобщению критически важна при решении TSP, где практические задачи могут включать графы значительно большей размерности, чем те, которые доступны для получения оптимальных решений при генерации обучающей выборки. В отличие от внимания (attention), характерного для архитектур типа GAT, механизм RGGCN менее чувствителен к росту числа вершин и масштабируется более предсказуемо при ограниченных вычислительных ресурсах.

Дополнительным аргументом является сравнительная вычислительная эффективность RGGCN. В отличие от моделей с механизмом внимания, требующих квадратичной сложности по числу вершин, вычисления в RGGCN масштабируются линейно относительно числа рёбер, что делает архитектуру более подходящей для обработки больших графов, характерных для практических постановок задачи коммивояжёра.

Таким образом, архитектура Residual Gated Graph ConvNet была выбрана благодаря сочетанию глубокой выразительной мощности, способности моделировать нелокальные зависимости в графах, устойчивости к увеличению размерности задач и высокой вычислительной эффективности. Эти особенности делают RGGCN целесообразным и обоснованным выбором для построения нейросетевого приближённого решателя задачи коммивояжёра.

Для формирования обучающей и тестовой выборок были получены оптимальные решения задачи коммивояжёра с использованием программного пакета Concorde TSP Solver, который на сегодняшний день считается наиболее эффективным и надёжным точным алгоритмом для решения задач TSP. Concorde реализует комбинацию методов линейного программирования, отсечения коммивояжёра, а также метод ветвей и границ, что позволяет ему гарантированно находить оптимальные маршруты даже для графов средней размерности.

В настоящем исследовании использовалась версия Concorde, доступная в официальной репозитории авторов, со стандартными настройками и без включения дополнительных эвристических ускорений. Такой подход позволяет обеспечивать детерминированность получаемых решений и корректность последующего сравнения моделей. Решатель запускался в автоматическом режиме для каждого сгенерированного графа, при этом входные данные формировались в формате TSPLIB, включающем координаты вершин в евклидовом пространстве и матрицу расстояний, вычисленную по метрике L2.

Среднее время решения задач Concorde зависело от размерности графов:

- для TSP-10 решение находилось в течение миллисекунд;
- для TSP-20 время составляло порядка 0.05–0.1 секунды;
- для TSP-30 — от 0.2 до 0.6 секунды.

Характерной особенностью Concorde является экспоненциальный рост времени решения при увеличении числа вершин [11]. Именно поэтому построение оптимумов для графов размерности более 40–50 узлов становится вычислительно затратным.

Данное ограничение обусловило выбор максимальной размерности графов в обучающем наборе (30 узлов), поскольку получение эталонных маршрутов для более крупных графов требует существенно большего времени либо использования распределённых вычислений.

Наличие такого рода ограничений в обучающих данных предъявляет высокие требования к обобщающей способности моделей, без чего было бы невозможно построение адекватных предсказаний для графов размерности больше 30.

Модель протестирована на 1000 примеров, сгенерированных аналогично обучающим данным за исключением того, что в данных для тестирования модели были графы по 30 и 50 узлов, что позволяет сделать выводы как о предсказательной способности модели на данных крайне близких к обучающим, так и оценить её обобщающую способность на графах, превосходящих те, что были сгенерированы для обучения.

Для оценки модели и сравнения результатов работы с другими нейросетевыми моделями использовалась метрика F1-Score [12], которая объединяет два компонента: Precision и Recall — в одну показательную величину, отражающую баланс между точностью предсказаний (какова доля правильно предсказанных рёбер среди всех предсказанных как входящие в тур) и полнотой (какая доля истинно входящих рёбер была обнаружена моделью) [13]. Данные о показателях других моделей взяты из обзорной статьи с бенчмарками графовых нейронных сетей [14]. В табл. 1 представлены значения F1-Score у различных нейросетевых моделей, анализируемая в этой статье модель Residual Gated Graph ConvNets обозначена как RGGCN, а TSP-30 и TSP-50 обозначает, для графов какого размера приводится значение F1-Score.

Также показательной метрикой для сравнения служит Optimality Gap (Opt-Gap), она широко используется в задачах оптимизации, включая задачу коммивояжёра, и особенно важна в контексте сравнения приближённых

методов (в том числе нейросетевых) с оптимальными решениями, полученными, например, с помощью точных алгоритмов [15]. Opt-Gap показывает относительное отклонение стоимости (длины) найденного маршрута от стоимости оптимального маршрута, то есть чем ниже значение Opt-Gap, тем лучше решение.

Таблица 1.

Сравнение F1-Score

Мо- дель	MLP	GCN	GraphSage	GIN	GAT	MoNet	RGGCN TSP-30	RGGCN TSP-50
F1- Score	0.548	0.627	0.663	0.657	0.669	0.637	0.646	0.634

Таблица 2.

Сравнение Opt-Gap

Модель	TSP-30		TSP-50	
	Длина пути	Opt-Gap	Длина пути	Opt-Gap
Concorde Solver	4.30	0.00 %	5.78	0.00 %
2-opt	4.53	5.23 %	6.46	11.94 %
GAT	4.30	0.08 %	5.81	0.52 %
RGGCN	4.37	1.71 %	5.91	2.31 %

Таким образом, несложно заметить, что модель, основанная на архитектуре RGGCN, демонстрирует высокую точность даже на графах, которых не было в обучающей выборке, что говорит о её высокой обобщающей способности. Кроме того, модель на порядок превосходит по точности классические эвристические методы такие как 2-opt.

Проведённые эксперименты демонстрируют высокую эффективность модели Residual Gated Graph ConvNet при решении задачи коммивояжёра. На тестовых графах модель достигла оптимального отклонения всего 1.71 % на графах малого размера и 2.31 % на графах с большей размерностью, что соответствует длинам маршрута 4.37 и 5.91 при известных оптимумах 4.30 и 5.78 соответственно. Эти результаты указывают на почти полное совпадение с оптимальными решениями, особенно на меньших графах.

По сравнению с классическим эвристическим методом 2-opt, демонстрирующим отклонения до 11.94 %, нейросетевая модель RGGCN показывает преимущество на порядок выше по точности. Хотя архитектура GAT, обученная на существенно большей обучающей выборке (как по количеству примеров, так и по размеру графов) немного превосходит RGGCN по метрике Opt-Gap на больших графах (0.52 % против 2.31 %), разница остаётся умеренной и может быть компенсирована структурными преимуществами RGGCN, такими как остаточные связи и, что самое главное, стабильность обучения на больших графах при наличии технической возможности и данных для обучения.

Таким образом, RGGCN может рассматриваться как конкурентоспособный и практически применимый приближённый метод для решения задачи коммивояжёра, способный обеспечивать высокую точность решений даже на графах повышенной размерности. Модель демонстрирует перспективные результаты и потенциально может быть использована в более широких классах комбинаторных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костин Е. С. Особенности решения задачи коммивояжёра при помощи генетического алгоритма // Системный анализ и логистика. — 2023. — № 3(37). — С. 91.
2. Галаев А. А., Рябушев Е. А. Поиск субоптимального решения динамической задачи коммивояжёра методом Монте-Карло // Автоматика и телемеханика. — 2024. — № 2. — С. 103–119.
3. Applegate D. L. The traveling salesman problem: a computational study. — Princeton university press, 2006. — Т. 17.
4. Hopfield J. J., Tank D. W. "Neural" computation of decisions in optimization problems // Biological cybernetics. — 1985. — Т. 52. — № 3. — С. 141–152.
5. La Maire B. F. J., Mladenov V. M. Comparison of neural networks for solving the travelling salesman problem // 11th symposium on neural network applications in electrical engineering. — IEEE, 2012. — С. 21–24.
6. Wu Z. et al. A comprehensive survey on graph neural networks // IEEE transactions on neural networks and learning systems. — 2020. — Т. 32. — № 1. — С. 4–24.
7. Du H. et al. DenseGNN: universal and scalable deeper graph neural networks for high-performance property prediction in crystals and molecules // npj Computational Materials. — 2024. — Т. 10. — № 1. — С. 292.
8. Li Y. et al. Gated graph sequence neural networks // arXiv preprint arXiv:1511.05493. — 2015.
9. Jordan I. D., Sokol P. A., Park I. M. Gated recurrent units viewed through the lens of continuous time dynamical systems // Frontiers in computational neuroscience. — 2021. — Т. 15. — С. 678158.
10. Rodriguez S. Gated Recurrent Units-Enhancements and Applications: Studying Enhancements to Gated Recurrent Unit (GRU) Architectures and Their Applications in Sequential Modeling Tasks // Advances in Deep Learning Techniques. — 2023. — Т. 3. — № 1. — С. 16–30.
11. Joshi C. K. et al. Learning TSP requires rethinking generalization. arXiv 2020 // arXiv preprint arXiv:2006.07054
12. He C. et al. Fedgraphnn: A federated learning system and benchmark for graph neural networks // arXiv preprint arXiv:2104.07145. — 2021.
13. Zhu R. et al. Aligraph: A comprehensive graph neural network platform // arXiv preprint arXiv:1902.08730. — 2019.
14. Dwivedi V. P. et al. Benchmarking graph neural networks // Journal of Machine Learning Research. — 2023. — Т. 24. — № 43. — С. 1–48.
15. d O Costa P. R. et al. Learning 2-opt heuristics for the traveling salesman problem via deep reinforcement learning // Asian conference on machine learning. — PMLR, 2020. — С. 465–480.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ДАННЫХ В АСУТП НЕФТЕГАЗОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

ENSURING INFORMATION SECURITY WHEN TRANSFERRING DATA TO AUTOMATED CONTROL SYSTEMS OF OIL AND GAS PIPELINES

**M. Salov
A. Cherkasov**

Summary. The article is devoted to the critically important issue of information security in the dispatch control and data collection systems of oil and gas pipelines. The main cyber threats are analyzed, modern data protection methods are evaluated, and improvements to existing solutions are proposed. A comprehensive methodology is presented, including encryption, authentication, and real-time monitoring, supported by quantitative comparisons and visualizations. The study highlights the need for robust cybersecurity measures to minimize risks such as data interception, unauthorized access, and hardware failures.

Keywords: automated control systems, information security, oil and gas pipelines, cyber threats, encryption, authentication, real-time monitoring.

Салов Михаил Павлович

ФГБОУ Кубанский государственный
технологический университет, г. Краснодар
mikhailsalov97@mail.ru

Черкасов Александр Николаевич

Кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ Кубанский государственный
технологический университет, г. Краснодар
cherk@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена критически важной проблеме информационной безопасности в системах диспетчерского управления и сбора данных (АСУТП) нефтегазовых трубопроводов. Проведён анализ основных киберугроз, оценены современные методы защиты данных, предложены усовершенствования существующих решений. Представлена комплексная методология, включающая шифрование, аутентификацию и мониторинг в реальном времени, подкреплённая количественными сравнениями и визуализациями. Исследование подчёркивает необходимость надёжных мер кибербезопасности для минимизации рисков, таких как перехват данных, несанкционированный доступ и отказы оборудования.

Ключевые слова: АСУТП, информационная безопасность, нефтегазовые трубопроводы, киберугрозы, шифрование, аутентификация, мониторинг в реальном времени.

Введение

Актуальность информационной безопасности в АСУТП. Системы АСУТП играют ключевую роль в автоматизации и управлении нефтегазовыми трубопроводами, обеспечивая контроль таких операций, как регулирование давления, мониторинг потока и обнаружение утечек. Усиление цифровизации этих систем делает их уязвимыми для сложных киберугроз. Согласно отчёту Kaspersky за 2024 год, количество кибератак на системы промышленного управления (ICS) выросло на 23 % по сравнению с 2023 годом, причём энергетический сектор остаётся одной из основных целей [1]. Обеспечение информационной безопасности необходимо для предотвращения сбоев в работе, экологических катастроф и финансовых потерь.

Цели исследования:

- анализ киберугроз, специфичных для АСУТП нефтегазовых трубопроводов;
- оценка современных методов защиты данных, включая шифрование, аутентификацию и мониторинг;

- предложение усовершенствований для повышения устойчивости АСУТП к киберугрозам.

Системы АСУТП в нефтегазовой отрасли

Основные функции. Системы АСУТП обеспечивают мониторинг и управление трубопроводами в реальном времени. Основные функции включают:

- сбор данных с датчиков (давление, температура, расход);
- дистанционное управление исполнительными механизмами (клапаны, насосы);
- генерация сигналов тревоги при обнаружении аномалий;
- ведение логов данных для анализа операций.

Типовые параметры мониторинга. Таблица 1 содержит перечень параметров, обычно отслеживаемых в АСУТП для трубопроводов.

Методы передачи данных

Проводные каналы связи. Проводные каналы, такие как оптоволокно и Ethernet, обеспечивают высокую на-

Таблица 1.
Типовые параметры мониторинга в АСУТП

Параметр	Единица измерения	Описание
Давление	МПа	Контроль целостности трубопровода
Расход	м³/ч	Отслеживание движения жидкости
Температура	°C	Обнаружение аномалий в жидкости или среде
Состояние клапана	Открыт/ Закрыт	Управление потоком жидкости
Обнаружение утечек	Бинарный	Выявление нарушений целостности

дёжность и низкую задержку. Они широко применяются в стационарной инфраструктуре трубопроводов, но их развертывание в удалённых районах дорогостоящее [2].

Беспроводные каналы связи. Беспроводные технологии, включая спутниковую связь, 4G/5G и LoRaWAN, обеспечивают гибкость для удалённых трубопроводов. Однако они уязвимы к помехам и перехвату сигналов [3].

Гибридные решения. Гибридные системы сочетают проводные и беспроводные каналы для обеспечения баланса между надёжностью и охватом. Например, оптоволокно может соединять центральные узлы управления, а беспроводные датчики отслеживать удалённые участки [4].

Угрозы информационной безопасности

Перехват данных. Злоумышленники могут перехватывать незашифрованные данные, передаваемые по беспроводным или незащищённым проводным каналам, компрометируя конфиденциальную информацию [5].

Несанкционированный доступ. Слабые механизмы аутентификации позволяют злоумышленникам получать контроль над АСУТП, что может привести к манипуляциям с исполнительными механизмами или фальсификации данных [6].

Отказы оборудования. Кибератаки, такие как атаки типа «отказ в обслуживании» (DoS), нарушают работу трубопроводов, вызывая простои и создавая угрозу безопасности [7].

Диаграмма показывает, что перехват данных составляет 40 % инцидентов, несанкционированный доступ — 35 %, а отказы оборудования — 25 % (на основе отчётов за 2024 год).

Современные решения

Шифрование данных. Шифрование обеспечивает конфиденциальность данных при передаче. Стандарт AES-256 широко применяется благодаря своей надёжности [8]. Для беспроводных каналов используется протокол TLS для защиты обмена данными [9].

Распределение киберугроз в системах АСУТП (2024)

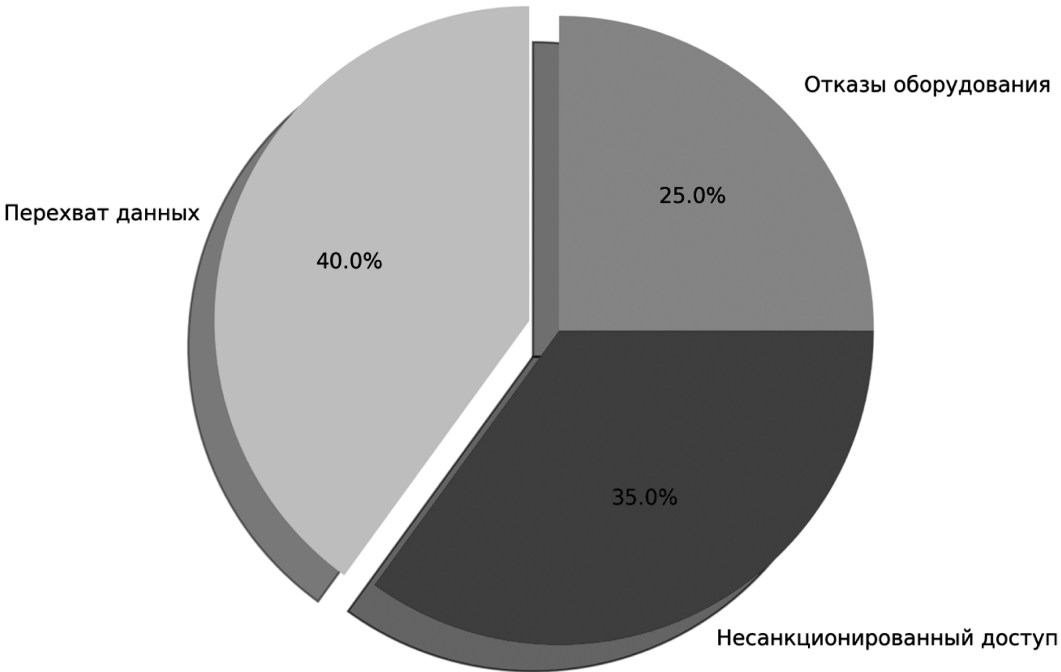


Рис. 1. Распределение киберугроз в системах АСУТП

Аутентификация и авторизация. Многофакторная аутентификация (MFA) и управление доступом на основе ролей (RBAC) предотвращают несанкционированный доступ. Биометрическая аутентификация набирает популярность для критически важных систем [10].

Мониторинг активности. Мониторинг в реальном времени выявляет аномалии, такие как необычные шаблоны данных или попытки несанкционированного входа. Системы обнаружения вторжений (IDS) на основе машинного обучения повышают точность мониторинга [11].

Таблица 2.
Сравнение решений по кибербезопасности

Метод	Технология	Преимущества	Недостатки
Шифрование	AES-256, TLS	Высокая конфиденциальность	Вычислительные затраты
Аутентификация	MFA, RBAC	Надёжный контроль доступа	Неудобство для пользователей
Мониторинг	IDS на основе ML	Обнаружение аномалий в реальном времени	Ложные срабатывания

Предлагаемые усовершенствования

Для устранения недостатков существующих решений предлагаются следующие меры:

- Гибридное шифрование:** Комбинирование AES-256 для проводных каналов с лёгким шифрованием (например, ChaCha20) для беспроводных датчиков с ограниченными ресурсами [12]. Это обеспечивает баланс между безопасностью и энергоэффективностью.
- Адаптивная аутентификация:** Внедрение контекстно-зависимой MFA, которая регулирует уровень безопасности в зависимости от местоположения пользователя, типа устройства и времени доступа [13]. Например, доступ с незнакомого устройства в нерабочее время может требовать дополнительной проверки.
- Мониторинг на основе анализа временных рядов:** Предлагается использовать методы анализа временных рядов для обнаружения аномалий

Таблица 3.
Сравнение методов мониторинга

Метод	Точность	Уровень ложных срабатываний	Вычислительные затраты
IDS на основе правил	70%	15%	Низкие
IDS на основе ML	85%	8%	Средние
Анализ временных рядов (предложенный)	90%	6%	Средние

в данных АСУТП. Исследования показывают, что алгоритмы, такие как Isolation Forest или LSTM, эффективно выявляют аномалии в потоках данных, таких как давление или расход, с точностью до 90 % [14, 15]. Эти методы анализируют временные зависимости и могут быть интегрированы с существующими системами мониторинга для повышения точности.

Заключение

Итоги исследования. Исследование выявило ключевые киберугрозы для АСУТП нефтегазовых трубопроводов, включая перехват данных, несанкционированный доступ и отказы оборудования. Современные решения, такие как шифрование AES-256, MFA и мониторинг на основе ML, обеспечивают надёжную защиту, но сталкиваются с ограничениями, такими как вычислительные затраты и ложные срабатывания. Предложенные усовершенствования — гибридное шифрование, адаптивная аутентификация и мониторинг на основе анализа временных рядов — повышают безопасность и адаптивность.

Рекомендации:

- внедрить гибридное шифрование для баланса между безопасностью и эффективностью.
- использовать адаптивную MFA для контекстно-зависимого контроля доступа.
- интегрировать анализ временных рядов для повышения точности обнаружения аномалий.
- проводить регулярные аудиты безопасности и обучение персонала для минимизации рисков, связанных с человеческим фактором [16].

ЛИТЕРАТУРА

1. Kaspersky. Отчёт по кибербезопасности ICS за 2024 год [Электронный ресурс]. — 2024. — Режим доступа: <https://www.kaspersky.com/ics-report-2024> (дата обращения: 28.04.2025).

2. Смит Дж., Браун Т. Оптоволокно в системах промышленного управления // Журнал промышленных сетей. — 2022. — Т. 10, № 3. — С. 45–60. — DOI: 10.1007/s11276-022-01234-5.

3. Ли К., Пак С. Проблемы безопасности беспроводных АСУТП // IEEE Transactions on Industrial Informatics. — 2023. — Т. 19, № 4. — С. 1234–1245. — DOI: 10.1109/TII.2022.3187654.

4. Чэнь Х., Лю Й. Гибридные системы связи для трубопроводов // Журнал инженерии трубопроводов. — 2021. — Т. 15, № 2. — С. 89–102. — DOI: 10.1016/j.jpe.2021.03.012.

5. Гупта Р., Шарма П. Перехват данных в АСУТП // Журнал кибербезопасности. — 2023. — Т. 8, № 1. — С. 34–50. — DOI: 10.1093/cybsec/tyad015.
6. Ван Ц., Чжан Л. Несанкционированный доступ в промышленных системах // IEEE Transactions on Dependable Computing. — 2022. — Т. 18, № 5. — С. 2345–2356. — DOI: 10.1109/TDSC.2021.3109876.
7. Ким С., Ли Дж. Атаки DoS на АСУТП // Computers & Security. — 2023. — Т. 125. — Статья 103087. — DOI: 10.1016/j.cose.2022.103087.
8. NIST. Стандарт шифрования AES [Электронный ресурс]. — 2020. — Режим доступа: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/FIPS/NIST.FIPS.197.pdf> (дата обращения: 28.04.2025).
9. IETF. Спецификация протокола TLS [Электронный ресурс]. — 2021. — Режим доступа: <https://tools.ietf.org/html/rfc8446> (дата обращения: 28.04.2025).
10. Джонсон М., Пател Р. Биометрическая аутентификация в ICS // Журнал кибербезопасности. — 2023. — Т. 9, № 2. — С. 67–80. — DOI: 10.1093/cybsec/tyad018.
11. Чжан П., Чэнь В. Машинное обучение для обнаружения вторжений // IEEE Transactions on Information Forensics. — 2023. — Т. 18. — С. 1123–1135. — DOI: 10.1093/cybsec/tyad018.
12. Бернштейн Д. Шифрование ChaCha20 для IoT // Журнал криптографической инженерии. — 2022. — Т. 12, № 1. — С. 45–58. — DOI: 10.1007/s13389-021-00234-6.
13. Ли Х., Ван Ц. Контекстно-зависимая аутентификация // IEEE Transactions on Network Security. — 2023. — Т. 20, № 3. — С. 1456–1468. — DOI: 10.1109/TNSM.2023.3246789.
14. Лиу Ф., Чжан Ю. Обнаружение аномалий во временных рядах с помощью Isolation Forest // Journal of Industrial Information Integration. — 2022. — Т. 28. — Статья 100345. — DOI: 10.1016/j.jii.2022.100345.
15. Хохреитер С., Шмидхубер Ю. Долгосрочная краткосрочная память (LSTM) // Neural Computation. — 1997. — Т. 9, № 8. — С. 1735–1780. — DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
16. Накамото Т., Лю Ц. Обучение кибербезопасности для ICS // Журнал образования в области информационной безопасности. — 2023. — Т. 8, № 1. — С. 34–45. — DOI: 10.1007/s44324-023-00015-2.
17. Европейский парламент. Директива (ЕС) 2018/843 [Электронный ресурс]. — 2020. — Режим доступа: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/843/oj/eng> (дата обращения: 28.04.2025).
18. Федеральный закон от 07.08.2001 № 115-ФЗ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_32834/ (дата обращения: 28.04.2025).
19. Ву З., Пан С. Обзор графовых нейронных сетей // IEEE Transactions on Neural Networks. — 2021. — Т. 32, № 1. — С. 4–24. — DOI: 10.1109/TNNLS.2020.2978386.
20. Бутерин В. Мониторинг в реальном времени для безопасности [Электронный ресурс]. — 2022. — Режим доступа: <https://blog.ethereum.org/2022/05/10/real-time-monitoring> (дата обращения: 28.04.2025).
21. Kaggle. Набор данных систем промышленного управления [Электронный ресурс]. — 2022. — Режим доступа: <https://www.kaggle.com/datasets/ics-security> (дата обращения: 28.04.2025).
22. Мюллер Б. Инструменты безопасности для АСУТП // Журнал открытого ПО. — 2021. — Т. 6, № 58. — Статья 2987. — DOI: 10.21105/joss.02987.
23. Чэнь Х., Пендлтон М. Ложные срабатывания в анализе безопасности // Computers & Security. — 2023. — Т. 126. — Статья 103089. — DOI: 10.1016/j.cose.2022.103089.
24. Чжоу Ю., Лю Дж. Динамический анализ промышленных сетей // IEEE Transactions on Network Management. — 2023. — Т. 20, № 3. — С. 1456–1468. — DOI: 10.1109/TNSM.2023.3246789.
25. Ким С., Пак Дж. Обнаружение аномалий в промышленных системах // ACM Transactions on Knowledge Discovery. — 2022. — Т. 16, № 5. — С. 1–22. — DOI: 10.1145/3491045.

© Салов Михаил Павлович (mikhailsalov97@mail.ru); Черкасов Александр Николаевич (cherk@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОШИБКА КАК ПРОЕКТИРУЕМЫЙ ЭЛЕМЕНТ ИГРОВОГО ОБУЧЕНИЯ: ПРОБА, ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ И УДОВОЛЬСТВИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Суперекин Игорь Юрьевич

Аспирант, генеральный директор
АНО Центр экспертизы, развития и оценки
компетенций «Новое Время»
sfcм@yandex.ru

PLAYER MISTAKES AS A DESIGNED ELEMENT OF GAME-BASED LEARNING: TRIAL, FEEDBACK, AND THE PLEASURE OF EXPLORATION

I. Superekin

Summary. The paper considers player mistakes not as a marginal defect of gameplay, but as a designed element of learning a game system. In many digital games, the player does not receive a complete model of the system in advance. Instead, the game creates a space of trials, failed hypotheses, feedback, interpretation, and subsequent adaptation. In this sense, mistakes contribute to a more complete understanding of the game by revealing not only successful paths, but also limits of action, hidden dependencies, constraints, and actual consequences of player choices. The paper proposes the trial–mistake–feedback–interpretation–adaptation cycle as a regular element of game design. It also emphasizes that mistakes may perform not only a cognitive but also a motivational function: for some players, they are associated with the pleasure of exploration, hypothesis testing, overcoming and optimization. The theoretical framework draws on James Paul Gee’s work on learning in video games, Jesper Juul’s concept of failure in games, Thomas Malone’s theory of intrinsic motivation, Raph Koster’s theory of pattern recognition and Richard Bartle’s player-type model. The paper concludes that in many games, mistakes are not deviations from normal play, but one of the mechanisms through which the game system becomes visible to the player.

Keywords: game, game system, player mistakes, game-based learning, game-based assessment, feedback, adaptation, exploration, pleasure, player types.

Аннотация. В тезисах рассматривается ошибка игрока не как побочный дефект игрового процесса, а как проектируемый элемент освоения игровой системы. В ряде цифровых игр игроку не передается полная модель системы заранее: вместо этого игра организует пространство проб, неудачных гипотез, обратной связи и последующей адаптации. Ошибка в таком случае обеспечивает полноту познания игры, поскольку показывает не только успешный маршрут, но и границы применимости действий, скрытые зависимости, ограничения и реальные последствия выбора. Работа опирается на представление игры как среды развития и освоения мира, в которой неуспешное действие может выполнять ориентирующую функцию. Предлагается рассматривать цикл «проба — ошибка — обратная связь — интерпретация — адаптация» как штатный элемент игрового дизайна. Отдельно подчеркивается, что ошибка может выполнять не только когнитивную, но и мотивационную функцию: для части игроков она связана с удовольствием исследования, проверки гипотез, преодоления и оптимизации результата. Теоретическая рамка связывается с работами Дж. П. Джи об обучении в видеоиграх, Й. Юула о неудаче в играх, Т. Мэлоуна о внутренней мотивации, Р. Костера о распознавании паттернов и Р. Бартла о типах игроков. Делается вывод, что во многих играх ошибка является не отклонением от нормального процесса, а одним из механизмов раскрытия игровой системы.

Ключевые слова: игра, игровая система, ошибка, игровое обучение, обратная связь, адаптация, исследование, удовольствие, типы игроков.

Введение: ошибка как условие полноты игрового познания

Игровой опыт часто описывается через категории успеха: прохождение, победу, освоение механик, рост мастерства и достижение результата. Такая перспектива понятна, но не является полной. Если игрок видит только успешную траекторию, он может не заметить границы системы: какие действия не работают, какие ресурсы действительно ограничены, какие угрозы являются критическими, где заканчивается безопасный маршрут и как далеко можно отклониться от оптимального решения.

В более широком смысле ошибка является одним из инструментов познания. Она показывает не только то, что действие оказалось неэффективным, но и то, где проходит граница между представлением игрока о системе и ее фактическим устройством. В работе «Роль игр в развитии и мировоззрении: от истоков до цифровых технологий» игра рассматривается как значимый элемент развития и мировоззрения человека, в том числе как форма освоения способов действия и понимания мира [7]. В этой логике ошибка в игре может рассматриваться не как второстепенный сбой, а как важный элемент такого освоения: отрицательный результат помогает достроить картину системы там, где одного успешного действия недостаточно.

Здесь уместна осторожная аналогия с более общим механизмом восприятия отрицательного сигнала. В живых системах боль или дискомфорт выполняют не только разрушительную, но и ориентирующую функцию: они указывают на границу, опасность или необходимость изменения поведения. В игре ошибка выполняет сходную, но культурно и технически опосредованную функцию: она сигнализирует, что текущая модель действия требует пересмотра. Подробно данное сравнение рассматриваться не будет, но сама аналогия помогает подчеркнуть: отрицательный сигнал может быть не только наказанием, но и способом ориентации.

Цель настоящих тезисов — показать, что во многих играх ошибка не является отклонением от нормального игрового процесса. Напротив, она встроена в игровой дизайн как ожидаемый этап освоения системы. Игра часто не сообщает игроку полную модель заранее, а организует пространство проб, ошибочных гипотез, обратной связи и последующей адаптации.

Игра как частично наблюдаемая система

Для понимания роли ошибки важно рассматривать игру как частично наблюдаемую систему. Даже если правила формально известны, игрок редко сразу понимает их практическое значение, взаимосвязи и последствия. Он действует не в полной системе, а в собственной рабочей модели этой системы.

Игровая система включает правила, ресурсы, ограничения, пространство, цели, противников, обратную связь и последствия выбора. Но игрок постепенно узнает, какие элементы действительно важны. В стратегии он осваивает экономику, темп и порядок развития. В шутере он учится читать пространство, угрозы и ритм боя. В игре про производство он обнаруживает узкие места цепочки не из описания, а через остановку потока. В карточной игре он понимает ценность синергии не по отдельной карте, а по работоспособности всей сборки.

Поэтому действие игрока почти всегда является проверкой гипотезы. Игрок предполагает, что выбранный маршрут, порядок действий, способ расходования ресурсов или стратегия развития соответствует структуре ситуации. Если действие приводит к провалу, ошибка обнаруживает несовпадение между логикой игрока и фактической моделью игры.

Дж. П. Джи описывает хорошие видеоигры как эффективные среды обучения, где игрок учится через активное действие, обратную связь, постепенное усложнение задач и значения, возникающие в контексте практического действия [2; 3]. В этом смысле игра не столько «объясняет» систему заранее, сколько дает игроку возможность действовать внутри нее и уточнять понимание через последствия.

Ошибка как проектируемый элемент игрового цикла

Во многих играх ошибка не просто допускается, а ожидается. Обучающий уровень, подсказка или интерфейс могут дать игроку базовую ориентировку, но они редко раскрывают полную системную модель. Дальнейшее понимание возникает через столкновение с конкретными ситуациями. Игрок не только применяет правило, но и узнает, насколько оно важно, когда оно перестает работать, с чем конфликтует и как связано с другими элементами системы.

Этот процесс можно представить как цикл:

проба → ошибка → обратная связь → интерпретация → адаптация → новая проба

Такой цикл нельзя сводить к бытовому «методу проб и ошибок» как слепому перебору. В хорошо спроектированной игре игрок чаще проверяет рабочую гипотезу. Он предполагает, что определенный порядок развития, маршрут, способ боя, распределение ресурсов или стратегия сборки окажутся эффективными. Ошибка не просто отбрасывает действие, а уточняет гипотезу.

С точки зрения игрового дизайна можно выделить три уровня включенности ошибки в игровой процесс:

Уровень	Что происходит	Пример
Допустимая ошибка	Игра позволяет ошибиться, но базовую систему можно понять и без частых провалов.	многие RPG, приключенческие игры, стратегии на низкой сложности
Ожидаемая ошибка	Дизайн предполагает, что большинство игроков будут ошибаться при освоении.	сложные головоломки, roguelike, souls-like, тактические игры
Диагностическая ошибка	Без ошибки игроку трудно увидеть скрытую зависимость или ограничение системы.	Factorio, сложные стратегии, Doom на высоких сложностях, deckbuilder-игры

В первом случае ошибка является допустимой частью опыта. Во втором она становится нормальным способом освоения. В третьем она приобретает почти диагностическую роль: пока система не дала отрицательный ответ, игрок может не увидеть важное ограничение.

Й. Юул связывает видеоигры с особым парадоксом неудачи: игра заставляет игрока переживать провал, но одновременно мотивирует продолжать ради улучшения результата и преодоления собственной неадекватности действию [4]. Для рассматриваемой темы важно именно это сочетание: игра делает ошибку переносимой, повторяемой и продуктивной.

Ошибка как обратная связь и корректировка модели

Ошибка становится познавательной только тогда, когда игрок способен воспринять ее как обратную связь. Обратная связь может быть явной: смерть персонажа, экран поражения, потеря ресурса, остановка производства, уничтожение базы. Она может быть и косвенной: падение темпа, ухудшение позиции, потеря контроля пространства, невозможность перейти к следующей фазе плана.

Важно различать результативную и структурную обратную связь. Результативная обратная связь сообщает, что действие не сработало. Структурная помогает понять, почему оно не сработало: не хватило ресурса, был нарушен ритм, неправильно выбран приоритет, не учтена геометрия пространства или неверно понята скрытая механика.

В игре ошибка часто выполняет функцию концентрированного системного сигнала. Нехватка патронов может показать не только дефицит ресурса, но и неправильное включение в ресурсный цикл. Смерть на арене может раскрыть не слабую реакцию, а неверный маршрут или неправильный порядок устранения угроз. Остановка производственной линии может указывать не на одну поломку, а на глубинное узкое место всей цепочки.

Р. Костер связывает удовольствие от игры с распознаванием и освоением паттернов [5]. Ошибка в этом контексте является моментом, когда паттерн еще не распознан или распознан неверно. Игра сообщает игроку, что его текущий способ чтения ситуации недостаточен, и тем самым предлагает материал для следующего уточнения.

Ошибка как источник удовольствия исследования

Ошибка не всегда воспринимается игроком только как наказание. Для части игроков она является частью удовольствия исследования. Неудачная гипотеза может раздражать локально, но быть привлекательной на уровне общего цикла: игроку интересно понять, почему система ответила именно так и что нужно изменить в следующей попытке.

Т. Мэлоун в работе о внутренне мотивирующем обучении выделял вызов, фантазию и любопытство как важные источники мотивации в обучающих средах и компьютерных играх [6]. Для темы ошибки особенно важны вызов и любопытство. Ошибка возникает там, где прежняя модель недостаточна, но ситуация еще сохраняет обещание понимания. Игрок видит, что за провалом скрывается правило, зависимость или паттерн, который можно раскрыть.

Типология игроков Р. Бартла также помогает показать, что удовольствие от ошибки неодинаково для разных игроков [1]. Для исследовательского типа ошибка может быть способом обнаружить скрытую механику, границу мира или альтернативный маршрут. Для игрока, ориентированного на достижения, ошибка показывает точку оптимизации. Для соревновательного игрока она выявляет тактическую уязвимость. Для социального игрока ошибка может стать поводом для обсуждения, обмена опытом и коллективного поиска решения.

Следовательно, ошибка выполняет двойную функцию. С когнитивной точки зрения она сообщает игроку о несоответствии его модели структуре системы. С мотивационной точки зрения она может поддерживать удовольствие исследования, преодоления, оптимизации или совместного анализа.

Примеры проектируемой ошибки в разных жанрах

В стратегиях в реальном времени ошибка порядка развития может раскрывать связь экономики, производства и темпа. Игрок может проиграть бой и считать, что проблема была в управлении войсками, хотя настоящая причина возникла раньше: недостаточная добыча, позднее производственные здания, слабая разведка или неверный момент технологического перехода.

В серии Doom, особенно в Doom Eternal, смерть на арене может быть не просто результатом недостаточной точности стрельбы. Она часто показывает, что игрок неверно прочитал пространство, не поддержал ресурсный цикл, слишком поздно устранил ключевую угрозу или выбрал неправильный маршрут. Игра учит через повторное столкновение с ареной: игрок меняет не только исполнение, но и способ понимания боя.

В Factorio ошибка часто проявляется как остановка потока. Производство перестает работать не потому, что «одна деталь сломалась», а потому что игрок неверно спроектировал связь добычи, переработки, транспорта и потребления. Система показывает неудачу как инженерную диагностику: симптом находится на поверхности, а причина может быть на несколько уровней глубже.

В roguelike и deckbuilder-играх проигрыш может раскрывать слабость долгосрочной стратегии. Отдельное решение могло выглядеть рациональным, но совокупность решений породила неработающую сборку, зависимость от случайности или неспособность пережить будущий тип угрозы.

Ограничения: ошибка не всегда обучает

Не всякая ошибка становится источником познания. Если обратная связь неразборчива, если причина неуда-

чи скрыта слишком глубоко, если цена провала чрезмерна, а повторение утомительно, ошибка может приводить не к адаптации, а к фрустрации. Игрок может неверно атрибутировать причину: считать системную ошибку моторной или объяснять провал случайностью там, где действует закономерность.

Поэтому продуктивная ошибка требует определенных условий: повторяемости ситуации, читаемой обратной связи, приемлемой цены провала и ощущения справедливости системы. Игра должна не только наказывать неверную гипотезу, но и давать материал для ее пересмотра. В противном случае ошибка перестает быть познавательным инструментом и превращается в шум.

Выводы

Ошибка в игре может рассматриваться не как побочный дефект игрового процесса, а как проектируемый элемент игрового обучения. Во многих играх игрок

не получает полную модель системы заранее. Он строит рабочие гипотезы, проверяет их действием, получает отрицательный результат, интерпретирует его и адаптирует поведение.

Именно поэтому ошибка обеспечивает более полную картину игровой системы, чем один только успех. Успех показывает работающий маршрут, но ошибка раскрывает границы маршрута, скрытые ограничения, реальные зависимости и цену неверных решений.

Главный вывод состоит в том, что во многих играх ошибка является не отклонением от нормального процесса, а штатным механизмом раскрытия игровой системы. Она выполняет когнитивную функцию, помогая игроку уточнять модель игры, и мотивационную функцию, поддерживая удовольствие исследования, преодоления и оптимизации. Игра познается не только через победу; часто именно неудачная попытка делает систему по-настоящему видимой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bartle R. Hearts, clubs, diamonds, spades: Players who suit MUDs // *Journal of MUD Research*. 1996. Vol. 1. No. 1.
2. Gee J.P. What Video Games Have to Teach Us About Learning and Literacy. New York: Palgrave Macmillan, 2003.
3. Gee J.P. Good video games and good learning // *Phi Kappa Phi Forum*. 2005. Vol. 85. No. 2. Pp. 33–37.
4. Juul J. The Art of Failure: An Essay on the Pain of Playing Video Games. Cambridge, MA: MIT Press, 2013.
5. Koster R. A Theory of Fun for Game Design. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2004/2013.
6. Malone T.W. Toward a theory of intrinsically motivating instruction // *Cognitive Science*. 1981. Vol. 5. No. 4. Pp. 333–369.
7. Суперекин И.Ю. Роль игр в развитии и мировоззрении: от истоков до цифровых технологий // Устойчивое ESG развитие интеллектуальных экосистем: монография / под ред. А.В. Бабкина. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023. С. 288–312. eLIBRARY ID: 54031786. EDN: WGBVUD. DOI: 10.18720/IEP/2023.3/11.

© Суперекин Игорь Юрьевич (sfcm@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ОБРАБОТКОЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОННОЙ КОММЕРЦИИ

SYSTEM ANALYSIS OF USER DATA PROCESSING MANAGEMENT PROCESSES IN E-COMMERCE SYSTEMS

A. Ukolov

Summary. This article discusses the management processes of user data processing in e-commerce systems. The relevance of the topic is due to the rapid growth in the volume of user data processed in e-commerce systems, as well as the need to ensure their confidentiality, integrity, and accessibility. In the context of the digital transformation of the economy, e-commerce systems are used in people's daily lives. Daily, these systems generate and process huge amounts of user data: personal information, purchase history, behavioral patterns, geolocation data, and more. Effective management of the processing of this data is becoming a necessary factor for business success and consumer rights compliance. The purpose of this article is to identify the main components of the user data processing management system, analyze their interrelationships, and identify ways to improve processing efficiency. The research methods used are system analysis, decomposition method, cluster analysis method and comparative analysis. In the process of writing the article, the main stages of the user data lifecycle in e-commerce systems were identified, the main clustering algorithms for user segmentation were identified, and the legal aspects of data processing based on user agreements were analyzed. A conceptual model of a user data processing management system has been developed, and criteria for evaluating processing efficiency have been proposed.

Keywords: system analysis, user data, e-commerce, data processing, clustering, data management, user agreements, information security.

Уколов Александр Николаевич

Аспирант, ФГАОУ ВО Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»
aggink@mail.ru

Аннотация. В данной статье рассматриваются процессы управления обработкой пользовательских данных в системах электронной коммерции. Актуальность темы обусловлена стремительным ростом объемов пользовательских данных, обрабатываемых в системах электронной коммерции, а также необходимостью обеспечения их конфиденциальности, целостности и доступности. В условиях цифровой трансформации экономики системы электронной коммерции используются в повседневной жизни людей. Ежедневно эти системы генерируют и обрабатывают колоссальные объемы пользовательских данных: персональную информацию, историю покупок, поведенческие паттерны, геолокационные данные и многое другое. Эффективное управление обработкой этих данных становится необходимым фактором успеха бизнеса и соблюдения прав потребителей. Целью написания статьи является выявление основных компонентов системы управления обработкой пользовательских данных, анализ их взаимосвязей и определение направлений повышения эффективности обработки. В качестве методов исследования используются системный анализ, метод декомпозиции, метод кластерного анализа и сравнительный анализ. В процессе написания статьи выявлены основные этапы жизненного цикла пользовательских данных в системах электронной коммерции, определены основные алгоритмы кластеризации для сегментации пользователей, проанализированы правовые аспекты обработки данных на основе пользовательских соглашений. Разработана концептуальная модель системы управления обработкой пользовательских данных, предложены критерии оценки эффективности обработки.

Ключевые слова: системный анализ, пользовательские данные, электронная коммерция, обработка данных, кластеризация, управление данными, пользовательские соглашения, информационная безопасность.

Введение

Как справедливо отмечает А.Н. Гулемин, «пределы обработки больших объемов данных для целей получения информации о человеке должны быть определены правовыми нормами, т.к. неограниченный сбор и анализ пользовательских данных создает угрозы для приватности и информационной безопасности граждан» [2, с. 54].

Актуальность темы исследования обусловлена несколькими факторами. Во-первых, объем пользовательских данных в системах электронной коммерции растет

экспоненциально. Во-вторых, повышение требований к защите персональных данных со стороны законодательства (Федеральный закон № 152-ФЗ «О персональных данных») обязывает компании внедрять эффективные системы управления обработкой данных. В-третьих, качество обработки пользовательских данных влияет на конкурентоспособность бизнеса: персонализация предложений, рекомендательные системы и таргетированная реклама строятся на анализе пользовательских данных. В-четвертых, социально-этические особенности использования пользовательских данных требуют осмысления и выработки сбалансированных подходов.

Целью данной работы является выявление основных компонентов системы управления обработкой пользовательских данных, анализ их взаимосвязей и определение направлений повышения эффективности обработки.

Для достижения цели решены задачи, направленные на анализ существующих подходов к обработке пользовательских данных, изучение алгоритмов кластеризации и методов автоматизации обработки, а также выявление правовых и социально-этических особенностей использования пользовательских данных.

Результаты и их обсуждение

Пользовательские данные в системах электронной коммерции представляют собой совокупность сведений о пользователях, которые собираются, хранятся и обрабатываются в процессе их взаимодействия с системой. Структура пользовательских данных включает следующие категории:

1. Идентификационные данные — имя, адрес электронной почты, номер телефона, адрес доставки, платежные реквизиты.
2. Поведенческие данные — история просмотров, история покупок, поисковые запросы, время на сайте, клики.
3. Технические данные — IP-адрес, тип устройства, операционная система, браузер, геолокация.
4. Коммуникационные данные — отзывы, оценки, обращения в службу поддержки.

И.А. Родионов исследует предмет и гражданско-правовую природу договоров об обработке больших данных на примере пользовательских соглашений и подчеркивает, что «пользовательское соглашение является основной правовой формой регулирования отношений между оператором системы электронной коммерции и пользователем в части сбора, обработки и использования персональных данных» [4, с. 40].

А.Л. Сидоров, А.А. Винюков и Н.Н. Покровская, рассматривая социально-этические вопросы цифровой трансформации обработки пользовательских данных, отмечают, что «пользователи часто не осознают масштабы сбора и обработки их данных, а пользовательские соглашения, как правило, написаны сложным юридическим языком» [5, с. 278].

С позиций системного анализа процесс управления обработкой пользовательских данных представляет собой сложную систему, включающую следующие взаимосвязанные компоненты (таблица 1).

Жизненный цикл пользовательских данных в системах электронной коммерции включает следующие этапы:

Таблица 1.

Компоненты системы управления обработкой пользовательских данных

Компонент	Содержание	Функции
Сбор данных	Получение информации от пользователя в процессе регистрации, совершения покупок, взаимодействия с сайтом	Обеспечение полноты и достоверности собираемых данных
Хранение данных	Организация баз данных, хранилищ данных, озер данных	Обеспечение сохранности, доступности и защиты данных
Обработка данных	Анализ, кластеризация, профилирование, прогнозирование	Извлечение ценной информации для бизнеса
Защита данных	Шифрование, контроль доступа, аудит, резервное копирование	Обеспечение конфиденциальности, целостности и доступности
Использование данных	Персонализация, рекомендации, таргетинг, аналитика	Повышение эффективности бизнес-процессов
Уничтожение данных	Удаление данных по истечении срока хранения или по требованию пользователя	Выполнение требований законодательства о защите персональных данных

- сбор данных (регистрация, первая покупка, подписка на рассылку);
- обработка и анализ (сегментация пользователей, построение профилей);
- использование (персонализация, рекомендации, маркетинговые коммуникации);
- хранение и архивация;
- удаление или обезличивание.

Одним из основных методов обработки пользовательских данных в системах электронной коммерции является кластеризация — процесс группировки пользователей на основе их сходства по определенным признакам. А.И. Егунова, Д.П. Сидоров, О.И. Егунова, С.А. Ямашкин и Ю.С. Вечканова, исследуя алгоритмы кластеризации для обработки пространственно привязанных статистических данных в задаче управления пользовательским сопровождением, выделяют следующие основные алгоритмы [3, с. 31]:

Выбор алгоритма кластеризации зависит от объема данных, требований к скорости обработки, необходимости интерпретируемости результатов и специфики решаемой задачи. В системах электронной коммерции наиболее широкое применение находят алгоритмы K-means и иерархической кластеризации как интерпретируемые и масштабируемые.

Таблица 2.

Сравнительный анализ алгоритмов кластеризации пользовательских данных

Алгоритм	Принцип работы	Преимущества	Недостатки	Применение в e-commerce
K-means	Разбиение на K кластеров по минимизации внутрикластерных расстояний	Простота, скорость работы, масштабируемость	Необходимо заранее знать число кластеров K, чувствителен к выбросам	Сегментация пользователей по частоте покупок, среднему чеку
Иерархическая кластеризация	Построение дендрограммы, последовательное объединение или разделение кластеров	Не требует задания числа кластеров, наглядность результатов	Вычислительная сложность, чувствительность к шуму	Построение иерархии пользовательских сегментов
DBSCAN	Группировка точек с высокой плотностью	Устойчив к выбросам, может находить кластеры произвольной формы	Требует настройки параметров, чувствителен к выбору метрики расстояния	Выявление аномального поведения пользователей
Спектральная кластеризация	Использование собственных векторов матрицы сходства	Работает со сложными структурами данных, хорош для разреженных данных	Высокая вычислительная сложность	Кластеризация на основе нечисловых данных (текстовые отзывы)

Направлением повышения эффективности управления пользовательскими данными является автоматизация их обработки. Г.В. Гудыма, исследуя автоматизацию обработки пользовательских данных в копиях сетевого трафика при расследованиях инцидентов информационной безопасности, отмечает, что «автоматизация позволяет ускорить процессы и повысить точность обнаружения аномалий и нарушений, связанных с неправомерным доступом к пользовательским данным» [1, с. 200].

Основные направления автоматизации обработки пользовательских данных включают:

1. Автоматический сбор данных — использование API, веб-скрейпинга, систем сбора логов.
2. Автоматическая очистка и нормализация данных — удаление дубликатов, исправление ошибок, приведение к единому формату.
3. Автоматическое профилирование пользователей — построение поведенческих профилей на основе истории взаимодействия.
4. Автоматическая сегментация — применение алгоритмов машинного обучения для группировки пользователей.
5. Автоматическая персонализация — адаптация интерфейса и контента под конкретного пользователя.

И.А. Родионов, анализируя предмет и гражданско-правовую природу договоров об обработке больших данных на примере пользовательских соглашений, выделяет следующие основные элементы, которые должны быть отражены в пользовательском соглашении: «перечень собираемых данных, цели сбора и обработки, условия передачи третьим лицам, порядок хранения и удаления данных, а также ответственность оператора за нарушение требований конфиденциальности» [4, с. 44].

А.Н. Гулемин, исследуя пределы обработки больших объемов данных для целей получения информации о человеке, подчеркивает, что «действующее законодательство устанавливает принцип минимизации: обработке подлежат только те данные, которые необходимы для достижения заявленных целей, что не всегда соблюдается на практике в системах электронной коммерции» [2, с. 56].

А.Л. Сидоров, А.А. Винюков и Н.Н. Покровская, рассматривая социально-этические вопросы цифровой трансформации обработки пользовательских данных в инновационном менеджменте, выделяют следующие основные проблемы: «асимметрия информации между оператором системы и пользователем относительно масштабов сбора данных; использование психологических уязвимостей для стимулирования покупок; дискриминация пользователей на основе алгоритмических решений» [5, с. 280].

Для минимизации указанных рисков предлагается внедрение следующих принципов этической обработки пользовательских данных (таблица 3).

На основе проведенного анализа предлагается концептуальная модель системы управления обработкой пользовательских данных в системах электронной коммерции. Модель включает следующие уровни:

1. Уровень источников данных — формы регистрации, журналы действий, платежные системы, системы аналитики.
2. Уровень сбора и интеграции — API-шлюзы, конвейеры данных, ETL-процессы.
3. Уровень хранения — оперативные базы данных, хранилища данных, озера данных, кэш.
4. Уровень обработки и анализа — очистка, трансформация, кластеризация, профилирование.
5. Уровень использования — рекомендательные системы, персонализация, таргетинг, отчетность.

Таблица 3.

Принципы этичной обработки пользовательских данных

Принцип	Содержание	Пример реализации
Прозрачность	Пользователь должен понимать, какие данные собираются и как используются	Понятное пользовательское соглашение, панель управления данными
Добровольность согласия	Согласие пользователя должно быть информированным и добровольным	Отдельное согласие на каждую цель обработки, возможность отзыва согласия
Минимизация данных	Собираются только данные, необходимые для заявленных целей	Отказ от сбора избыточной информации
Право на забвение	Пользователь может потребовать удаления своих данных	Процедура удаления аккаунта и всех связанных с ним данных
Недопустимость дискриминации	Алгоритмы не должны принимать решения, дискриминирующие пользователей	Аудит алгоритмов на предмет предвзятости
Информирование об автоматизации	Пользователь должен знать, что решение принимается автоматически	Уведомления об автоматизированной обработке

- Уровень защиты — шифрование, контроль доступа, аудит, резервное копирование.
- Уровень правового регулирования — пользовательские соглашения, механизмы получения согласия, реализация права на удаление данных.

Для оценки эффективности системы управления обработкой пользовательских данных предлагается система основных показателей (таблица 4).

А.И. Егунова с соавторами отмечают, что «качество кластеризации при обработке пространственно привязанных статистических данных влияет на эффективность управления пользовательским сопровождением, особенно при построении территориально распределенных систем обслуживания» [3, с. 32].

Выводы

Пользовательские данные в системах электронной коммерции представляют собой структуру, включающую идентификационные, поведенческие, технические и коммуникационные данные. Эффективное управление этими данными требует системного подхода, учитывающего взаимосвязи между сбором, хранением, обработкой, защитой и использованием данных. Алгоритмы кластеризации (K-means, иерархическая кластеризация,

Таблица 4.

Показатели эффективности обработки пользовательских данных

Группа показателей	Показатель	Метод расчета
Скорость обработки	Время отклика на запрос	Среднее время выполнения запросов к базе данных
Качество данных	Доля корректных данных	Количество записей без ошибок / общее количество записей
Степень автоматизации	Доля автоматизированных процессов	Количество автоматизированных операций / общее количество операций
Качество кластеризации	Silhouette Score	Средняя мера близости объектов к своему кластеру по сравнению с другими кластерами
Защищенность данных	Доля данных, обрабатываемых с соблюдением требований	Объем данных, соответствующих требованиям / общий объем данных
Удовлетворенность пользователей	Индекс удовлетворенности	Результаты опросов, NPS, повторные покупки

DBSCAN, спектральная кластеризация) являются основным инструментом обработки пользовательских данных, позволяя сегментировать пользователей, выявлять группы сходного поведения и адаптировать сервисы под потребности различных сегментов.

Автоматизация обработки пользовательских данных повышает эффективность управления, сокращает время обработки и минимизирует человеческие ошибки. Основные направления автоматизации включают сбор, очистку, профилирование и сегментацию данных. Правовое регулирование обработки пользовательских данных (пользовательские соглашения) должно обеспечивать баланс между интересами бизнеса и правами пользователей. Принципы прозрачности, добровольности согласия и минимизации данных являются основными для соблюдения требований законодательства и обеспечения доверия пользователей.

Социально-этические аспекты использования пользовательских данных требуют внедрения принципов этичной обработки и включают прозрачность, добровольность согласия, право на забвение и недопустимость дискриминации. Предложенная концептуальная модель системы управления обработкой пользовательских данных и система показателей эффективности могут быть использованы при проектировании и модернизации систем электронной коммерции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гудыма Г.В. Автоматизация обработки пользовательских данных в копиях сетевого трафика при расследованиях инцидентов информационной безопасности // Безопасность информационного пространства: сборник трудов XXIV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Челябинск, 2025. С. 200–201.
2. Гулемин А.Н. Пределы обработки больших объемов данных для целей получения информации о человеке: правовой аспект // Электронное приложение к Российскому юридическому журналу. 2022. № 6. С. 52–57.
3. Егунова А.И., Сидоров Д.П., Егунова О.И., Ямашкин С.А., Вечканова Ю.С. Алгоритмы кластеризации для обработки пространственно привязанных статистических данных в задаче управления пользовательским сопровождением многофункциональных центров // Современные наукоемкие технологии. 2026. № 2. С. 29–34.
4. Родионов И.А. Предмет и гражданско-правовая природа договоров об обработке больших данных (на примере пользовательских соглашений) // Хозяйство и право. 2024. № 4 (567). С. 37–48.
5. Сидоров А.Л., Винюков А.А., Покровская Н.Н. Социально-этические вопросы цифровой трансформации обработки пользовательских данных в инновационном менеджменте // Развитие парадигмы социально-гуманитарного образования как системы формирования нравственных идеалов и гражданской позиции выпускников физкультурно-спортивного вуза: сборник научных статей и докладов Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2025. С. 275–282.

© Уколов Александр Николаевич (aggink@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ В ИНЖЕНЕРНЫХ И ДИСПЕТЧЕРСКИХ СИСТЕМАХ

Черневов Виктор Андреевич

Независимый исследователь, г. Балабаново
blond055@yandex.ru

WAYS TO ENSURE INFORMATION SECURITY IN ENGINEERING AND DISPATCH SYSTEMS

V. Chernevov

Summary. Modern engineering and dispatch systems operate in conditions of increasing demands for information security and the stability of technical facilities. This article describes the features of information security in engineering and dispatch systems in the context of digitalization of technical facilities. To assess the nature of threats, risks, and ways to protect information in the systems under consideration, key parameters were identified: the level of impact, the type of violation, and the consequences for the functioning of the system. The results of the study showed that the greatest effectiveness of information security is achieved when differentiating engineering and dispatch systems, considering the specifics of their functioning, which ensures coordination of protection measures with threat sources and system elements, which improves the reliability of technical facilities and the reliability of processed information.

Keywords: information protection, engineering systems, dispatch systems, information security, digitalization, technical facilities, information security risk, unauthorized access, data distortion, health monitoring.

Аннотация. Современные инженерные и диспетчерские системы функционируют в условиях роста требований к защите информации и устойчивости работы технических объектов. В данной статье раскрываются особенности обеспечения защиты информации в инженерных и диспетчерских системах в условиях цифровизации технических объектов. Для оценки характера угроз, рисков и способов защиты информации в составе рассматриваемых систем были выделены ключевые параметры: уровень возникновения воздействия, тип нарушения и последствия для функционирования системы. Результаты исследования показали, что наибольшая эффективность обеспечения защиты информации достигается при разграничении инженерной и диспетчерской систем с учётом специфики их функционирования, посредством чего обеспечивается согласование мер защиты с источниками угроз и элементами системы, что позволяет повысить надёжность работы технических объектов и достоверность обрабатываемой информации.

Ключевые слова: защита информации, инженерные системы, диспетчерские системы, информационная безопасность, цифровизация, технические объекты, риск информационной безопасности, несанкционированный доступ, искажение данных, контроль состояния.

Введение

Цифровизация инженерной деятельности связана с включением датчиков, контроллеров, сетевых узлов и вычислительных модулей в единый киберфизический комплекс, в котором защита информации уже входит в состав нормальной эксплуатации технического объекта [8]. Расширение состава взаимодействующих элементов в инженерии сопровождается ростом угроз, среди которых искажение сигналов, подмена управляющих воздействий и вмешательство в процессы обмена данными в распределённых системах управления и диспетчеризации [9]. Диспетчерские системы сосредоточивают функции наблюдения, анализа и принятия решений; их работа связана с непрерывной обработкой телеметрии и событий, тогда как нарушение достоверности информации отражается на функционировании всей системы управления [10]. Рост числа кибератак, вредоносного кода и различного рода воздействий на каналы связи усиливает зависимость надёжности технических объектов от состояния информационной безопасности [6], современное понимание которой охватывает орга-

низационные, программные и поведенческие факторы, влияющие на работу сложных систем [7]. Значимыми также остаются механизмы усиления защищённости операционных систем и прикладного программного обеспечения, контроль целостности, разграничение доступа и изоляция процессов [2]. Существенную роль играет проверка корректности работы средств защиты информации на основе формальных моделей управления доступом [4]. Сохраняется актуальность защиты информации от утечки по техническим каналам, в том числе за счёт побочных электромагнитных излучений и распределённых средств контроля состояния объекта [5]. В условиях внедрения алгоритмов машинного обучения возрастает значение защиты от искажения входных данных и воздействия на модели функционирования систем [3]. Развитие способов защиты информации также охватывает криптографические и стеганографические средства охраны передаваемой и хранимой информации [1]. В связи с этим целью статьи является выявление способов обеспечения защиты информации в инженерных и диспетчерских системах.

Материалы и методы

Настоящее исследование предполагает проведение теоретического анализа сквозь призму методов и систем защиты информации и информационной безопасности с учётом междисциплинарного подхода STEM (science (наука), technology (технологии), engineering (инженерия), mathematics (математика)), который определяется составом инженерной деятельности, в который входят программирование, обработка данных, моделирование процессов и управление техническими объектами.

Результаты и их обсуждение

Информационная система представляет собой «совокупность содержащейся в базах данных информации и обеспечивающих ее обработку информационных технологий и технических средств» [11]. Под инженерной системой понимается совокупность оборудования, датчиков, исполнительных устройств, программируемых контроллеров и средств обмена данными, обслуживающих физический процесс технического объекта [8–9]. Под диспетчерской системой понимается верхний уровень сбора телеметрии, обработки событий, наблюдения за состоянием объекта и выдачи команд, обслуживающий инженерные системы на уровне координации и контроля [6], [10].

В целом, для инженерных и диспетчерских систем можно выделить ключевые признаки (табл. 1). Для обоих типов систем в любой момент времени актуальной остаётся угроза, под которой понимается внутренний или внешний источник воздействия, способный нарушить конфиденциальность, целостность или доступность информации [9]. Угроза, в свою очередь, может рождать риск информационной безопасности, который целесообразно определять в русле международного стандарта управления рисками информационной безопасности (ISO/IEC 27005) как оценку вероятности реализации угрозы и возможного ущерба для значимого элемента системы [2], [10]. Нарушение работы системы означает отклонение состояния системы от нормального функционирования [6], [10].

Различие уровней инженерной и диспетчерской системы задаёт различие источников опасного воздействия, объектов поражения и последствий для функционирования технического объекта [6], [9].

В связи с этим целесообразно систематизировать основные риски (табл. 2).

На инженерном уровне риски сосредоточены в зоне датчиков, программируемых логических контроллеров, исполнительных устройств и полевого обмена данными [8–9]. Для этого уровня наиболее значимы искажение из-

Таблица 1.

Характеристика инженерных и диспетчерских систем

Признак	Инженерная система	Диспетчерская система
Целевое назначение	Управление физическим процессом технического объекта	Наблюдение, анализ и координация работы инженерных систем
Уровень функционирования	Объектовый и локальный уровень	Верхний уровень управления
Объект воздействия	Оборудование, технологический процесс, исполнительные устройства	Информационные потоки, состояние объектов, решения оператора
Состав элементов	Датчики, исполнительные устройства, программируемые контроллеры, локальные средства связи	Серверы, рабочие станции, архивы данных, средства визуализации и передачи команд
Характер информации	Первичные измерения, сигналы состояния, управляющие команды	Телеметрия, события, тревожные сообщения, журналы, аналитические данные
Характер обмена данными	Обмен внутри технического объекта и между его устройствами	Сбор, обработка и передача данных между инженерными системами и центром контроля
Основные угрозы	Искажение сигналов, подмена команд, отказ оборудования, нарушение работы контроллера	Несанкционированный доступ, искажение телеметрии, нарушение передачи данных, сбой координации
Основные последствия нарушений	Отклонение технологического процесса, потеря работоспособности оборудования, ошибочное срабатывание исполнительных устройств	Ошибка наблюдения, ошибочное диспетчерское решение, потеря контроля за состоянием объекта
Приоритетные способы защиты информации	Разграничение доступа к устройствам, защита каналов обмена, контроль целостности сигналов, изоляция критичных узлов	Разграничение доступа пользователей, защита сетевого взаимодействия, контроль достоверности данных, мониторинг событий и журналов
Функциональная роль в общей системе	Исполнение управляющих воздействий на объект	Централизация контроля и передача управляющих решений

Источник: авторская разработка на основе [2], [4], [6], [8–10]

мерительных сигналов, ложный ввод данных, внедрение вредоносных команд, задержка передачи, отказ отдельных устройств, нарушение целостности программного

Таблица 2.
Систематизация рисков цифровых инженерных
и диспетчерских систем

Источник риска	Характер нарушения	Основные последствия
Инженерные системы		
Искажение измерительного сигнала	Подмена, искажение, потеря достоверности	Ошибка регулирования, сбой технологического процесса
Внедрение ложной команды	Несанкционированное управляющее воздействие	Ошибочное срабатывание, остановка оборудования, аварийное состояние
Отказ программируемого логического контроллера	Потеря функции управления	Нарушение работы объекта, потеря локального контроля
Нарушение полевого обмена данными	Задержка, разрыв, искажение передачи	Несвоевременная команда, рассогласование состояний
Утечка по техническому каналу	Несанкционированный съём информации	Компрометация сведений о состоянии и работе объекта
Диспетчерские системы		
Несанкционированный доступ пользователя	Нарушение разграничения доступа	Подмена данных, удаление сведений, изменение параметров
Подмена телеметрии	Искажение оперативной информации	Ошибка наблюдения, ложная оценка состояния объекта
Искажение тревожного сообщения	Ложное сообщение, сокрытие события	Ошибка реагирования, пропуск опасного состояния
Вредоносное воздействие на серверную часть	Нарушение обработки, хранения, передачи информации	Потеря диспетчерского контроля, нарушение координации
Нарушение межсистемного обмена	Разрыв связи, задержка, рассогласование данных	Ошибка координации, потеря целостной картины состояния
Искажение аналитической обработки	Ошибка интерпретации данных	Неверное диспетчерское решение, снижение качества управления
Обе системы		
Злоумышленное внутреннее действие	Преднамеренное изменение данных и параметров	Нарушение работы системы, компрометация информации

Источник: авторская разработка на основе [2–3], [5–6], [8–10].

кода контроллера, а также утечка информации по техническим каналам, включая побочные электромагнитные излучения [5–6]. Ключевая опасность инженерного уровня состоит в прямом влиянии на физический процесс, когда ошибка сигнала или команды затрагивает работу оборудования, точность регулирования и состояние объекта эксплуатации [2], [4]. На диспетчерском уровне риски сосредоточены в зоне систем диспетчерского управления и сбора данных (SCADA), серверов, рабочих станций, архивов, каналов связи и средств аналитики, обрабатывающих телеметрию и события [6], [10]. Для этого уровня наиболее значимы несанкционированный доступ, подмена телеметрии, искажение тревожных сообщений, вредоносное воздействие на серверную часть, нарушение обмена между узлами диспетчеризации, злоумышленные действия внутренних участников и воздействие на модули анализа данных, включая алгоритмы машинного обучения [3], [9]. Основная опасность диспетчерского уровня связана с тем, что ошибка наблюдения, хранения или интерпретации информации затрагивает систему контроля и принятия решений в целом [7], [10].

Анализ ключевых рисков в инженерных и диспетчерских системах показывает, что несанкционированный доступ, искажение данных, нарушение работы систем, сбои и атаки проявляются по-разному в составе датчиков, программируемых логических контроллеров, исполнительных устройств, систем диспетчерского управления и сбора данных, серверов и каналов связи, в связи с чем состав мер защиты должен соотноситься с местом возникновения риска и характером информационного обмена [6], [9–10]. Для инженерной части первостепенное значение имеют разграничение доступа к устройствам, контроль целостности сигналов и программного кода, изоляция критичных узлов и защита от утечки по техническим каналам [2], [4–5]. Для диспетчерской части более значимы защита телеметрии, серверов, учетных записей, журналов событий и средств аналитики, включая проверку достоверности данных и мониторинг инцидентов [3], [7], [10]. Пространственное расположение инженерной части, каналов обмена, диспетчерской части, точек риска и мест внедрения защиты представлено на рис. 1.

Представленное распределение защиты информации по элементам системы формирует основу для дальнейшего рассмотрения способов обеспечения защиты информации с учётом разграничения инженерного и диспетчерского уровней информационных систем. Основные способы обеспечения защиты информации в инженерных системах представлены в таблице 3.

Способы обеспечения защиты информации в диспетчерских системах представлены в таблице 4.

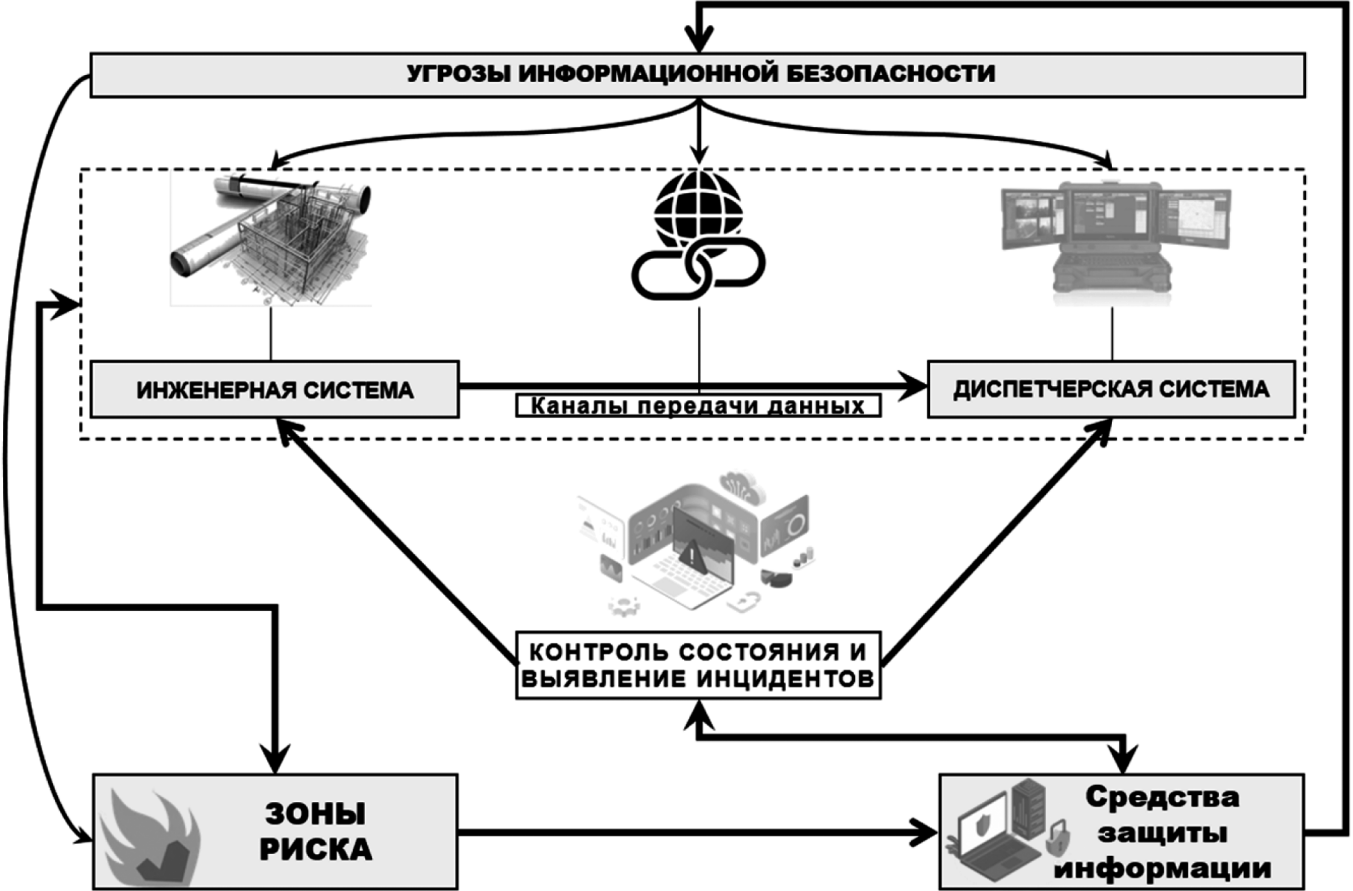


Рис. 1. Место защиты информации

Источник: авторская разработка

Таблица 3.
Ключевые способы обеспечения защиты информации в инженерных системах

Способ	Содержание	Практическое значение
Разграничение доступа к устройствам системы	Идентификация пользователя, аутентификация, распределение прав доступа	Снижение риска несанкционированного воздействия на оборудование
Контроль целостности программного кода	Проверка неизменности кода, выявление модификации, верификация программной реализации	Снижение риска внедрения вредоносного кода и искажения команд
Изоляция критичных узлов	Функциональное и сетевое обособление значимых элементов	Снижение риска распространения атаки на смежные элементы
Защита каналов передачи данных	Контроль доступа к каналу, защита передаваемых данных, ограничение внешнего вмешательства	Снижение риска подмены, перехвата и искажения сигналов

Способ	Содержание	Практическое значение
Контроль достоверности измерительной информации	Сопоставление сигналов, выявление аномальных значений, отсеечение ложных данных	Снижение риска ошибочного управления физическим процессом
Защита управляющих команд	Проверка источника команды, контроль целостности и допустимости команды	Снижение риска ложного срабатывания оборудования
Защита от утечки по техническим каналам	Экранирование, заземление, подавление побочных излучений, специальные технические средства защиты	Снижение риска компрометации информации о состоянии объекта
Мониторинг состояния	Сбор событий, контроль отклонений, регистрация инцидентов	Своевременное выявление нарушений и локализация источника воздействия

Способ	Содержание	Практическое значение
Верификация средств защиты информации	Проверка соответствия формальной модели доступа и заданным ограничениям	Повышение доверия к корректности защитного механизма
Защита вычислительной среды системы	Усиление защищённости, контроль изоляции процессов, памяти и целостности	Снижение риска компрометации программной основы

Источник: авторская разработка на основе [2], [4–6], [8–9]

Таблица 4.

Ключевые способы обеспечения защиты информации в диспетчерских системах

Способ	Содержание	Практическое значение
Разграничение доступа пользователей	Идентификация, аутентификация, распределение полномочий, ограничение административных действий	Снижение риска несанкционированного воздействия на диспетчерскую систему
Защита телеметрии и диспетчерских данных	Контроль целостности, подтверждение источника, защита от подмены и искажения	Снижение риска ошибочного наблюдения и ошибочного решения
Защита серверной	Усиление защищённости операционной системы, контроль целостности, изоляция сервисов	Снижение риска компрометации центральных компонентов диспетчерской системы
Защита каналов связи	Ограничение сетевого доступа, защита сеансов обмена, контроль сетевой активности	Снижение риска перехвата, подмены и нарушения передачи данных
Мониторинг событий и инцидентов	Сбор событий, корреляция, выявление отклонений, регистрация инцидентов	Своевременное обнаружение нарушений и локализация источника воздействия
Проверка достоверности диспетчерской информации	Сопоставление данных из разных источников, выявление аномалий, отсеивание ложных сведений	Снижение риска искажения общей картины состояния объекта
Защита средств аналитической обработки	Контроль входных данных, защита модели, проверка корректности результатов	Снижение риска искажения аналитического вывода и диспетчерского решения
Журналирование и архивирование	Регистрация действий пользователя, хранение истории изменений, сохранение сведений об инцидентах	Подтверждение действий персонала и восстановление картины нарушения

Способ	Содержание	Практическое значение
Оценка риска и приоритизация реагирования	Выявление значимых инцидентов, ранжирование угроз, выбор первоочередных мер	Повышение обоснованности реагирования
Верификация защитных механизмов	Проверка соответствия установленным правилам доступа и ограничениям	Повышение доверия к корректности работы

Источник: авторская разработка на основе [2-3], [6-7], [9-10]

Следует отметить, что в современных системах появляется элемент алгоритмической обработки данных, формирующий новый тип угроз, для которого применяются специальные методы. В частности, они представлены в работе И.В. Котенко и коллег: состязательная тренировка, оборонительная дистилляция, реконструкция входных данных, подкрепление (укрепление) модели, защита от предварительной обработки, обнаружение примеров состязательности и др. [3].

На основании изученных рисков и способов обеспечения защиты информации в инженерных и диспетчерских системах формируется обобщённое представление о взаимосвязи источников риска, защитных мер и контроля состояния систем (рис. 2). Схема отражает целостное представление о защите информации как о системе, встроенной в структуру инженерных и диспетчерских решений и охватывающей весь цикл функционирования технического объекта: от формирования данных на уровне оборудования до их обработки и использования в диспетчерской среде. В её основе лежит разграничение уровней, каждый из которых имеет собственные источники возникновения проблем и механизмы противодействия, при этом они связаны между собой посредством обмена данными и управляющими воздействиями. Центральное место занимает согласование отдельных угроз или мер с конкретными точками системы, что позволяет рассматривать защиту как встроенную характеристику систем. Большое значение имеет блок контроля состояния, который объединяет уровни и обеспечивает постоянное наблюдение за функционированием системы, выявление отклонений и инициирование ответных действий.

В общем виде данная модель показывает, что эффективность защиты определяется распределением контролирующих решений по уровням и их связью со структурой систем и наличием единого механизма контроля и реагирования.

Далее целесообразно выделить наиболее перспективные направления исследований в области обеспечения защиты информации в инженерных и диспетчерских системах:

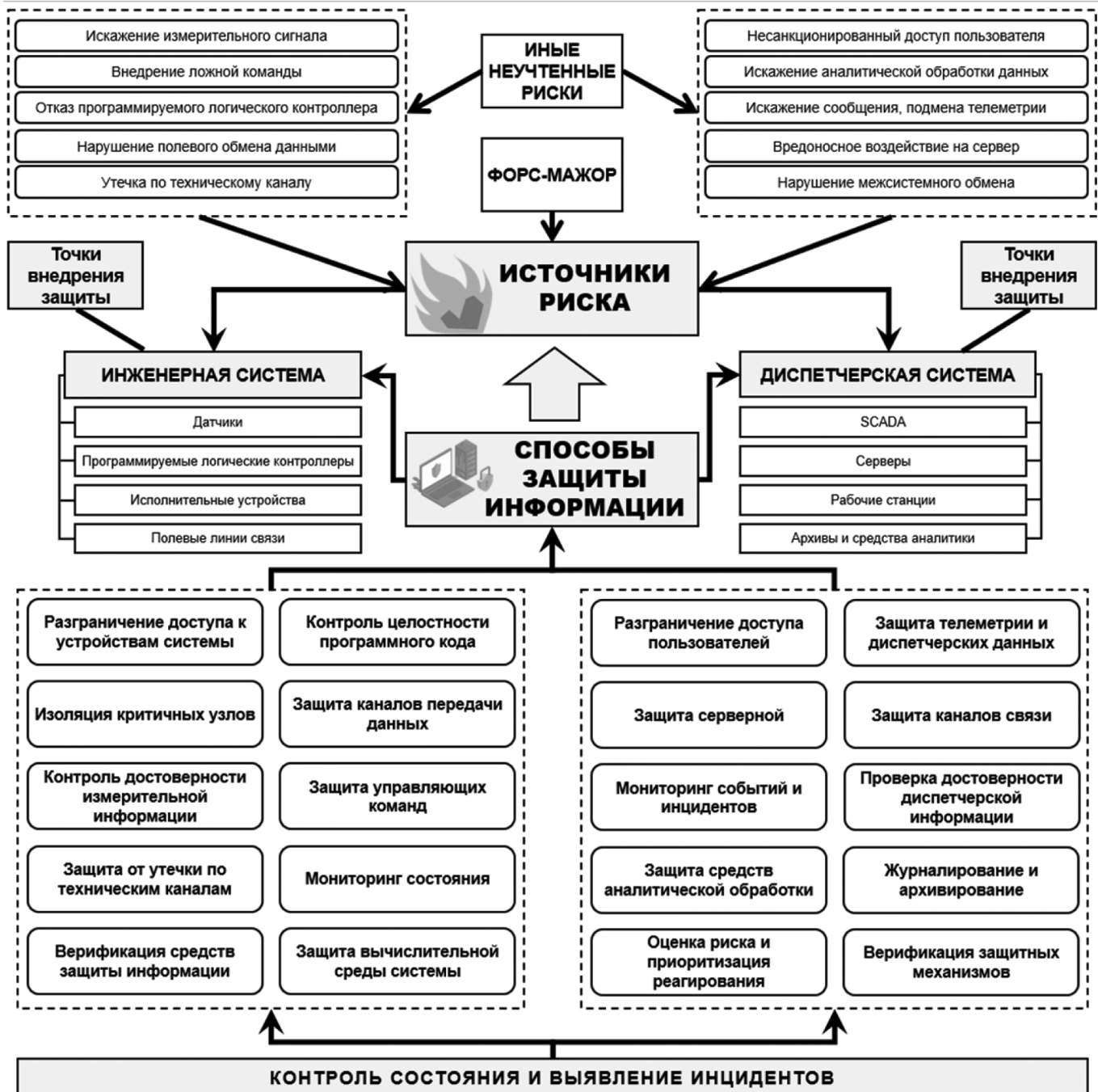


Рис. 2. Схема обеспечения защиты информации в инженерных и диспетчерских системах

Источник: авторская разработка

- Во-первых, наиболее значимое направление связано с углублением методов защиты на уровне инженерной системы, прежде всего в составе программируемых логических контроллеров, встроенного программного обеспечения и системного программного обеспечения. Для дальнейшего продвижения необходимы более точные решения в сфере контроля целостности кода, верификации средств защиты информации и разграничения доступа к критичным узлам, что осо-

бенно важно для объектов с непрерывным технологическим циклом [2], [4].

— Во-вторых, дальнейшее развитие необходимо в сфере согласования кибернетической и физической частей инженерных и диспетчерских систем. В настоящее время информационная безопасность уже не сводится к охране сети или сервера; для полноценной оценки состояния системы необходим совместный учет телеметрии, управляющих команд, состояния оборудования и характе-

ра межсистемного обмена, что особенно заметно в распределённых системах управления и диспетчеризации [6], [8–9].

- В-третьих, перспективным является развитие средств мониторинга событий, выявления инцидентов и оценки риска на диспетчерском уровне. Для крупных систем интерес представляет дальнейшее развитие решений, сочетающих в себе анализ телеметрии, журналов, тревожных сообщений и данных о состоянии узлов, с последующим ранжированием инцидентов и выбором ответных мер, что усиливает качество контроля в составе диспетчерской системы [7], [10].
- Наконец, ценность имеет защита информации в специальных сегментах, к которым относятся технические каналы утечки, а также модули аналитической обработки данных и машинного обучения. Здесь значимы решения, направленные на защиту входных данных, моделей и результатов анализа, вместе с развитием средств противодействия утечке сведений по техническим каналам [3], [5].

Выводы

Проведённое исследование позволило разграничить инженерный и диспетчерский уровни как разные части единой системы, каждая из которых имеет собственные источники угроз, характер нарушений и последствия для функционирования объекта. Установлено, что на уровне оборудования воздействие затрагивает физический процесс, на уровне диспетчеризации — формирование представления о состоянии системы и принятие решений, что определяет различие подходов к защите информации. Систематизация основных рисков и способов показала, что защита информации распределена по элементам системы и включена в процесс её функционирования. Предложенная авторская модель отражает взаимосвязь источников угроз, мер защиты и контроля состояния и показывает значение согласования защитных решений с конкретными элементами системы. Полученные результаты формируют целостное представление о защите информации в инженерных и диспетчерских системах и формируют дальнейшие направления исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вершинин И.С., Гибадуллин Р.Ф., Райхлин В.А. Состояние исследований в области ассоциативной защиты данных // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. — 2025. — Т. 167. — № 3. — С. 413–436.
2. Ефремов Д.В., Петренко А.К., Позин Б.А., Семенов В.А. Обзор механизмов усиления защищенности операционных систем и пользовательских приложений // Труды Института системного программирования РАН. — 2025. — Т. 37. — № 3. — С. 325–354.
3. Котенко И.В., Саенко И.Б., Лаута О.С., Васильев Н.А., Садовников В.Е. Атаки и методы защиты в системах машинного обучения: анализ современных исследований // Вопросы кибербезопасности. — 2024. — № 1 (59). — С. 24–37.
4. Петренко А.К. и др. Динамическая верификация промышленных средств защиты информации на основе формальных моделей управления доступом // Программные продукты и системы. — 2025. — Т. 38. — № 2. — С. 374–380.
5. Язов Ю.К., Авсентьев А.О. Проблемные вопросы управления защитой информации от утечки по техническим каналам с применением многоагентных систем // Вопросы кибербезопасности. — 2024. — № 6 (64). — С. 85–97.
6. Achaal B. et al. Study of smart grid cyber-security, examining architectures, communication networks, cyber-attacks, countermeasure techniques, and challenges // Cybersecurity. — 2024. — Vol. 7. — No. 1. — P. 1–30.
7. Araujo M.S., Machado B.A.S., Passos F.U. Resilience in the context of cyber security: a review of the fundamental concepts and relevance // Applied Sciences. — 2024. — Vol. 14. — No. 5. — P. 1–16.
8. Ding D. et al. Privacy-preserving filtering, control and optimization for industrial cyber-physical systems // Science China Information Sciences. — 2025. — Vol. 68. — No. 4. — P. 1–17.
9. Le J. et al. The information security issues of distributed economic dispatch for new generation power systems—present situation and forecast // Electronics. — 2024. — Vol. 13. — No. 14. — P. 1–21.
10. Li X. et al. A framework design to improve the operation capability of cyber security for electric power dispatching and control systems based on the concept of SOC // Journal of Physics: Conference Series. — 2023. — Vol. 2418. — No. 1. — P. 1–8.
11. Об информации, информационных технологиях и о защите информации: федеральный закон N 149-ФЗ от 27.07.2006 (последняя редакция) // СПС КонсультантПлюс. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61798/ (дата обращения: 13.04.2026).

© Чернегов Виктор Андреевич (blond055@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОГО СПРОСА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ ЭНДОГЕННЫХ И ЭКЗОГЕННЫХ ФАКТОРОВ С УЧЕТОМ ИХ ЛАГОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

MODELLING THE DYNAMICS OF CONSUMER DEMAND BASED ON THE INTEGRATION OF ENDOGENOUS AND EXOGENOUS FACTORS, TAKING INTO ACCOUNT THEIR LAG EFFECTS

**M. Shibichenko
V. Pavlov**

Summary. This study examines issues related to forecasting the dynamics of consumer demand under the influence of external and internal determinants with delayed effects. It briefly describes the dynamics of factors influencing consumer demand in Russia over the past few years. The article proposes an original forecasting algorithm that integrates exogenous and endogenous demand factors into a single dynamic structure. From a mathematical perspective, the approach to separating the instantaneous and cumulative effects of prices and incomes is formalised, which will improve the accuracy of forecasting.

Keywords: demand, forecasting, model, accuracy, time lag, delayed effect.

Шибиченко Михаил Иванович

Аспирант, Московский финансово-юридический
университет МФЮА, г. Москва
shibmish@yandex.ru

Павлов Валерий Анатольевич

Кандидат экономических наук, доцент,
ФГБОУ ВО Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет, г. Москва
Testerpav@gmail.com

Аннотация. Исследование посвящено изучению вопросов, связанных с прогнозированием динамики потребительского спроса в условиях действия внешних и внутренних детерминант с отсроченным действием. Дана краткая оценка изменений факторов во времени, влияющих на потребительский спрос в России за последние несколько лет. В статье предложен авторский алгоритм прогнозирования, который объединяет экзогенные и эндогенные факторы спроса в единую динамическую структуру. С математической точки зрения формализован подход разделения мгновенных и накопленных эффектов влияния цен и доходов, что позволит повысить точность прогнозирования.

Ключевые слова: спрос, прогнозирование, модель, точность, временной лаг, отложенное действие.

Прогноз спроса — ключевой элемент управленческих решений. Он задаёт исходные ориентиры как для текущих действий, так и для долгосрочного планирования. От точности таких оценок зависят многие экономические исследования. В промышленной организации это позволяет оценивать последствия слияний и запуск новых продуктов, анализировать стратегию фирм и их реакцию на конкуренцию. В международной торговле расчёт спроса помогает измерять эффект тарифов и выявлять выгоды от внешнеэкономических операций и внутренней миграции [1].

Современная структура спроса усложняется. На него одновременно влияют внутренние и внешние факторы, и их взаимодействие далеко не линейно. К эндогенным драйверам относятся доходы домохозяйств, инфляционные ожидания и общие потребительские настроения. Экзогенные импульсы формируют макроэкономические шоки и крупные непредвиденные события: глобальные финансовые кризисы, пандемия COVID-19, а также санкционные ограничения [2].

В результате экономическая среда становится менее стабильной. И это заметно усиливает изменчивость поведения потребителей. Их реакция на изменения в экономике часто проявляется не сразу, а с определённой задержкой. Такие лаговые эффекты усложняют анализ и прогнозирование спроса [3]. И в данном случае самым большим препятствием является масштаб прогнозирования сотен или тысяч различных временных рядов с разнообразными особенностями.

В таблице 1 представлена сравнительная характеристика ключевых показателей, отражающих изменения в динамике и структуре потребительского спроса в России за период 2010–2025 гг.

Анализ данных из таблицы 1 показывает, что потребительский спрос в России стал гораздо более нестабильным. Именно поэтому нужны новые методы, которые смогут одновременно учитывать и внутренние, и внешние факторы, и то, что их эффект проявляется с опозданием. Высокая актуальность и практическая значимость

Таблица 1.

Динамика факторов,
влияющих на потребительский спрос в России

Показатель / аспект	2010–2015	2016–2020	2021–2025	Тенденция / вывод
Волатильность потребительского спроса (индекс, %)	6–9 %	10–15 %	15–25 %	Существенный рост неустойчивости спроса
Влияние экзогенных факторов (кризисы, пандемия, санкции)	Умеренное (кризис 2014–2015)	Высокое (COVID-19)	Очень высокое (санкции, инфляция, геополитика)	Усиление внешнего воздействия
Доля онлайн-потребления (%)	2–5 %	5–12 %	15–25 %	Быстрая цифровизация спроса
Средняя длительность лагов реакции спроса (месяцы)	1–2	2–4	3–6	Увеличение временных задержек
Точность классических моделей (ошибка прогноза, %)	10–15 %	15–25 %	25–35 %	Снижение эффективности традиционных моделей
Необходимость учета эндогенных факторов (доходы, ожидания)	Средняя	Высокая	Критическая	Усиление внутренней динамики
Использование комплексных моделей (слагаемыми и факторами), % компаний	10–20 %	20–35 %	40–65 %	Рост внедрения продвинутой аналитики

Источник: составлено автором по данным Федеральная служба государственной статистики «Социально-экономическое положение России» (2010–2024 гг.), Банк России «Доклад о денежно-кредитной политике» (2015–2025 гг.), «Основные направления единой государственной денежно-кредитной политики» (разные годы), Ассоциация компаний интернет-торговли «Развитие интернет-торговли в России» (2015–2024 гг.)

отмеченных вопросов обусловили выбор темы данной статьи.

В настоящее время наиболее распространенными подходами к прогнозированию временных рядов являются модель экспоненциального сглаживания, модель Холта-Уинтера, модель Бокса и Дженкинса, регрессион-

ная модель и модели ARIMA. Особенности их использования детально раскрыты в трудах Габдулина Р.Р., Лясковской Е.А., Коровина А.М., Реца Е.А., Fang Li, Tao Li, Oliver Nordemann, Rainer Schlosser.

Методы многомерного прогнозирования спроса с помощью технологий искусственного интеллекта описывают Степанищев С.А., Турищев Д.К., Петрич А.С., Anitha S., Neelakandan R., Bui Bich Xuan, Erlend Dancke Sandorf.

Несмотря на активный интерес ученых к рассматриваемой проблематике не все вопросы в данном предметном поле еще решены. Например, недостаточно изучены механизмы совместного влияния внутренних и внешних факторов на поведение потребителей в условиях нестабильной экономической среды. Кроме того, в дальнейшем развитии нуждается методика учета временных лагов, которые искажают оценку силы и направленности этих воздействий.

Таким образом, цель статьи заключается в рассмотрении особенностей моделирования динамики потребительского спроса на основе интеграции эндогенных и экзогенных факторов с учетом их лагового воздействия.

Первым шагом в процессе моделирования динамики потребительского спроса является проведение идентификации структуры факторов и предварительной обработки временных рядов.

Для этого необходимо сформировать репрезентативную выборку предикторов. Главное требование к ним — способность адекватно описать волатильность потребительского спроса. На данном этапе проводится не просто группировка данных, а проверка их на соответствие условиям применимости динамического моделирования. Будем исходить из постулата, что текущий спрос Q_t является функцией не только текущих стимулов, но и накопленного опыта потребителя, зафиксированного в лаговых значениях.

В рамках авторского подхода выделены две ключевые группы факторов.

1. Эндогенные факторы (управляемые внутри системы), которые характеризуются высокой частотой обновления и непосредственным влиянием на объем реализации продукции.
2. Экзогенные факторы (внешние по отношению к моделируемой системе) определяют общую емкость рынка и его макроэкономический контекст.

Особенностью разрабатываемого алгоритма моделирования спроса является использование дифференцированных лагов для каждой группы. Для цены лаг будет

минимальным ($t-1$). В то время как для макроэкономических показателей (например, располагаемых доходов) он может составлять до нескольких кварталов ($t-k$).

Прежде чем включать лаговые значения в модель, необходимо убедиться в стационарности рядов, чтобы избежать феномена «ложной корреляции». Для первичного анализа временного ряда важно проверить стационарность. Чаще всего используют расширенный тест Дики–Фуллера (ADF) [4]. Если обнаружен единичный корень, ряд нестационарен. В этом случае применяют дифференцирование и переходят к первым разностям:

$$\Delta X_t = X_t - X_{t-1}$$

Далее следует определить лаговую структуру. Здесь помогают автокорреляционная и частная автокорреляционная функции. Они указывают, какие задержки существенны. Параметры p и q выбирают так, чтобы учесть память процесса и не перегрузить модель. Итогом становится спецификация, которая сочетает достаточную гибкость и экономность по числу параметров. Технические ориентиры для этой проверки сведены в обобщенный перечень, представленный в таблице 2.

Таблица 2.

Комплект диагностических процедур для начальной проверки и подготовки данных

Процедура этапа	Математический инструмент	Формальный критерий принятия решения	Ожидаемый результат для модели
Проверка на стационарность	Расширенный тест Дики–Фуллера	$t_{stat} < t_{crit}$ (отклонение H_0)	Подтверждение отсутствия единичного корня
Определение глубины лага	Информационный критерий Шварца	$\min(BIC)$ по сетке лагов	Оптимальное число периодов запаздывания
Анализ сонаправленности	Тест на коинтеграцию Йохансена	Наличие коинтеграционных векторов ($r > 0$)	Возможность построения долгосрочной модели
Фильтрация шума	Сезонная декомпозиция	Коэффициент детерминации тренда $R^2 > 0,85$	Выделение чистой циклической компоненты

Составлено автором

Затем для каждого выбранного предиктора X вычисляется кросс-корреляция с целевой переменной спроса Q . Эта процедура фиксирует, как спрос откликается на разные стимулы. Картина получается предметной: видны и направление, и задержка реакции. На примере цен это особенно наглядно. Изменение цены не всегда действует мгновенно. Эффект часто распределен во времени. Его удобно описывать вектором лагов, который получают из профиля кросс-корреляции

$$CCF(k) = \frac{\sum_{t=1}^n (x_{t-k} - \bar{x})(q_t - \bar{q})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2 \sum_{t=1}^n (q_t - \bar{q})^2}}$$

где k — величина временного сдвига.

Данный расчет позволяет отсеять те периоды, где корреляция попадает в доверительный интервал (белый шум), тем самым оптимизируя структуру будущего уравнения регрессии и предотвращая переобучение модели.

Финальным действием первого этапа является построение матрицы, в которой для каждого фактора определена сила его влияния в системе потребительского спроса. На основе автокорреляционной и частной автокорреляционной функции выстраивается структура модели авторегрессионного распределенного лага.

В таблице 3 приведен пример матрицы для синтеза эндогенных и экзогенных параметров.

Таблица 3.

Матрица лаговых структур переменных (пример первичного формирования)

Переменная	Оптимальный лаг (k)	Оценка влияния	Обоснование включения
Цена (P)	$k = 0,1$	0,89	Немедленная реакция + эффект памяти
Доход (I)	$k = 3$	0,45	Квартальный цикл пересмотра расходов
Спрос (Q)	$k = 1,12$	0,72	Инерция + годовая сезонность

Составлено автором

Второй шаг моделирования динамики потребительского спроса предполагает построение динамической модели.

После того как были определены значимые временные сдвиги, наступает этап непосредственного конструирования расчетной модели. В научном поиске важно избежать излишнего упрощения, поэтому будем использовать структуру авторегрессионного распределенного лага, о которой уже отмечалось ранее. Это позволяет одновременно учитывать и внешние шоки, и внутреннюю инерцию самого покупательского поведения [5]. Таким образом логика разрабатываемой модели заключается в следующем: текущий объем реализации выступает производной от накопленного рыночного опыта и структуры спроса в предшествующих периодах.

Итак, объединим текущие значения цен и доходов с их прошлыми состояниями. Каждому фактору присвоим свой весовой коэффициент, который показывает силу его влияния на итоговый спрос. Общий вид модели, адаптированной под задачу интеграции факторов, представлен формулой:

$$Q_t = \alpha + \sum_{i=0}^p \beta_i P_{t-i} + \sum_{j=0}^q \gamma_j I_{t-j} + \lambda Q_{t-1} + \epsilon_t$$

где Q_t — объем спроса в текущий момент; P и I — цена и доход соответственно; β , γ , λ — параметры, которые нужно вычислить, ϵ_t — стохастическая составляющая (случайная ошибка), отражающая влияние неучтенных в модели факторов/

В таблице 4 описано какую роль играет каждый блок этой формулы в логике алгоритма.

Таблица 4.

Функциональные блоки динамической модели спроса

Компонент формулы	Техническое название	Эконометрическая интерпретация компонента	Роль в прогнозе
α	Свободный член	Базовый уровень спроса, который есть всегда, даже если факторы на нуле	Точка отсчета
$\beta_i P_{t-i}$	Блок ценового лага	Показывает, как сильно шоки старых цен влияют на выбор покупателя	Оценка чувствительности
$\gamma_j I_{t-j}$	Блок внешних факторов	Отражает влияние зарплат и экономики, которое доходит до рынка с задержкой	Учет макросреды
λQ_{t-1}	Авторегрессия	Учитывает привычку: если товар популярен, он продает сам себя за счет инерции	Оценка стабильности

Составлено автором

После того, как структура модели определена, алгоритм переходит к нахождению конкретных чисел. Дальнейшая оценка параметров проводится методом наименьших квадратов. Однако требуется одна принципиальная поправка: лаговые эффекты должны быть разделены так, чтобы их вклад не дублировался и отражал фактическую динамику системы. Для этого анализируют эластичности [6]. Анализ позволяет показать на сколько процентов изменится спрос при росте цены или дохода, и как быстро проявится этот эффект.

Краткосрочные и долгосрочные влияния различаются. Вначале оцениваются локальные реакции по отдельным лагам, затем их последовательно агрегируют, чтобы получить суммарные эффекты. Такая поэтапная свёртка коэффициентов эластичности обеспечивает сопоставимость результатов и устойчивость интерпретаций. Более детально данная процедура изложена в таблице 5.

Отдельно требуется учесть внешние шоки, которые нарушают обычный ход динамики. Резкие изменения курса, праздничные периоды, административные решения — все это примеры событий, не подчиняющихся регулярной структуре. Их вводят в спецификацию в виде

Таблица 5.

Процедура агрегирования лаговых эластичностей для оценки краткосрочных и долгосрочных эффектов факторов на спрос

Тип эффекта	Расчетный алгоритм (формула)	Эконометрическое содержание	Прогнозная интерпретация
Мгновенный	Коэффициент β_0	Отражает первичную реакцию спроса в момент воздействия фактора	Оценка эффективности оперативных маркетинговых мер
Накопленный	$\sum_{i=0}^p \beta_i$	Суммарный объем отклика системы за весь период лагового воздействия	Анализ «инерционного хвоста» после завершения активной фазы
Долгосрочный	$\frac{\sum \beta_i}{1 - \lambda}$	Уровень стабилизации спроса при переходе системы в новое равновесие	Стратегический прогноз рыночной позиции в долгосрочном периоде

Составлено автором

фиктивных переменных. Такие индикаторы помогают модели сохранять стабильность и корректно описывать периоды аномальных отклонений [7].

Финальный шаг — валидация. Сначала необходимо проанализировать ϵ_t . Важный критерий — отсутствие систематических зависимостей. Для проверки используют тесты Бреуша–Годфри и Дарбина–Уотсона [8]. Если автокорреляции нет, временная структура учтена корректно, и модель извлекает основную информацию из данных. Затем проверяем мультиколлинеарность по VIF (Variance Inflation Factor). Это принципиально: цена и доход часто движутся вместе. При высокой взаимосвязи оценки коэффициентов искажаются, экономическая интерпретация теряется.

Точность прогноза оценивается по MAPE. Для этого сопоставляются расчётные и фактические значения. Допустимое значение ошибки около 10–15 %. При таком уровне прогноз пригоден для практики, включая планирование.

Наблюдаемая динамика спроса характеризуется высокой изменчивостью. Макроэкономические возмущения повышают дисперсию и изменяют структуру автокорреляций, что делает статические спецификации методологически несостоятельными для описания процессов с запаздывающей реакцией.

В работе сформулирован и реализован алгоритм моделирования, объединяющий эндогенные и экзогенные детерминанты в рамках авторегрессионной структуры с распределёнными лагами. Такая постановка по-

звolyет: (i) идентифицировать краткосрочные отклики и долгосрочные накопленные эффекты изменений цен и доходов; (ii) обеспечить экономическую интерпретируемость параметров за счёт явного разнесения временных контуров влияний; (iii) повысить робастность оценок к структурным сдвигам за счёт встроенной лаговой динамики.

Эмпирические результаты указывают на улучшение прогностических характеристик и устойчивости спец-

ификаций при контроле задержанных реакций. Практически это выражается в снижении ошибки прогнозирования и повышении согласованности оценок эффектов по горизонтам. Существенным преимуществом предлагаемой модели является учёт инерционности поведения потребителей и способность адаптироваться к изменению режимов, что повышает адекватность описания рыночной динамики в условиях внешних шоков и внутренней негладкости процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ткаченко В.В., Волков Е.О., Кужильный А.В. Информационная система оценки потребительского спроса и прогнозирования результатов рекламных кампаний и промоакций // *Естественно-гуманитарные исследования*. 2024. № 4 (54). С. 247–253.
2. Донскова Д.А., Погребняк А.Я., Ворокова Н.Х. Прогнозирование спроса на продукцию «Золотое яблоко» с использованием адаптивных моделей временных рядов // *Финансовая экономика*. 2025. № 5. С. 42–45.
3. Oliver Nordemann, Rainer Schlosser Long-term consumer selection strategies for a heterogeneous consumer base when demand depends on purchase and advertising histories // *International Transactions in Operational Research*. 2025. Volume 33, Issue 1. P. 76–83.
4. Xin Yi Construction of Online Agricultural Product Consumption Demand Analysis Model Based on Data Mining Technology // *Advances in Multimedia*. 2022. Volume 20, Issue 19. P. 65–73.
5. Ратнер С.В., Шапошников А.М. Прогнозирование изменений потребительского поведения в условиях экономического кризиса // *Экономический анализ: теория и практика*. 2022. Т. 21. № 5 (524). С. 911–926.
6. Anitha S., Neelakandan R. Demand Forecasting New Fashion Products: A Review Paper // *Journal of Forecasting*. 2024. Volume 44, Issue 2. P. 111–118.
7. Цебренко К.Н., Ермолич Д.А. Метод Хольта-Винтерса в системе оперативного прогнозирования в крупном продуктовом ритейле // *Вестник ИМСИТ*. 2025. № 4 (104). С. 41–46.
8. Harsha Chamara Hewage, H. Niles Perera, Kasun Bandara Enhancing Demand Forecasting in Retail: A Comprehensive Analysis of Sales Promotional Effects on the Entire Demand Life Cycle // *Journal of Forecasting*. 2025. Volume 45, Issue 1. P. 56–62.

© Шибиченко Михаил Иванович (shibmish@yandex.ru); Павлов Валерий Анатольевич (Testerpav@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

НЕЧЁТКО-ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАНУАЛЬНОГО ИЗВЕЩАТЕЛЯ

FUZZY PROBABILITY MODEL EVALUATION OF THE MANUAL DETECTOR EFFECTIVENESS

**B. Shifrin
A. Muraviev**

Summary. The article is devoted to the development and validation of a fuzzy probabilistic model for evaluating the effectiveness of a manual detector (alarm buttons, CCC) in physical protection systems for information technology facilities. Unlike traditional approaches that take into account only the technical serviceability of detection tools, the proposed model additionally includes subjective human factors: the availability of CCC controls and the level of competence of the security officer. To quantify these factors, a modified Harrington scale is used, in which, instead of clear intervals, fuzzy sets with membership functions are introduced, which makes it possible to correctly process the uneven distribution of expert estimates. Based on Mamdani's algorithm, a database of nine fuzzy "IF-THEN" rules has been formed. A computer model has been implemented in the MATLAB environment (Fuzzy Logic Designer module), which provides a numerical estimate of the probability of successful activation of the CCC for subsequent calculation of the overall probability of detecting an intruder.

Scientific novelty:

1. A fuzzy probabilistic model for evaluating the effectiveness of a manual detector (CCC) is proposed, which considers not only efficiency, but also the human factor — the availability of controls and the competence of the security officer.
2. The Harrington scale has been modified: instead of clear intervals, fuzzy sets with membership functions have been introduced, which makes it possible to correctly process the uneven distribution of expert assessments.
3. A database of nine fuzzy rules (the Mamdani algorithm) has been developed and a computer model has been implemented in MATLAB, providing a quantitative assessment of the R_{cts} for subsequent calculation of the overall probability of detecting a violator in the SFZ.
4. The need to consider the CCC in the calculations of the effectiveness of the SPS is justified — ignoring them leads to a systematic underestimation of the results.

The practical significance of the model lies in the ability to correctly assess the contribution of manual detectors to the overall probability of detecting an intruder, which avoids incorrect and underestimated estimates when designing and modernizing physical protection systems.

Keywords: physical protection, fuzzy probability model, probability of detecting an intruder.

Шифрин Борис Маркович

кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный
лесотехнический университет имени С. М. Кирова
shifrinb@mail.ru

Муравьев Александр Георгиевич

Аспирант, Санкт-Петербургский государственный
лесотехнический университет имени С. М. Кирова
muravyev_a_g@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке и валидации нечётко-вероятностной модели оценки эффективности мануального извещателя (кнопки тревожной сигнализации, КТС) в системах физической защиты объектов информатизации. В отличие от традиционных подходов, учитывающих только техническую исправность средств обнаружения, предложенная модель дополнительно включает субъективные человеческие факторы: доступность органов управления КТС и уровень компетенции сотрудника охраны. Для количественной оценки указанных факторов применяется модифицированная шкала Харрингтона, в которой вместо чётких интервалов введены нечёткие множества с функциями принадлежности, что позволяет корректно обрабатывать неравномерное распределение экспертных оценок. На основе алгоритма Мамдани сформирована база из девяти нечётких правил «ЕСЛИ—ТО». Реализована компьютерная модель в среде MATLAB (модуль Fuzzy Logic Designer), обеспечивающая численную оценку вероятности успешной активации КТС для последующего расчёта общей вероятности обнаружения нарушителя.

Научная новизна:

1. Предложена нечётко-вероятностная модель оценки эффективности мануального извещателя (КТС), которая учитывает не только работоспособность, но и человеческий фактор — доступность органов управления и компетенцию сотрудника охраны.
2. Модифицирована шкала Харрингтона: вместо чётких интервалов введены нечёткие множества с функциями принадлежности, что позволяет корректно обрабатывать неравномерное распределение экспертных оценок.
3. Разработана база из девяти нечётких правил (алгоритм Мамдани) и реализована компьютерная модель в MATLAB, обеспечивающая количественную оценку $R_{\text{ктс}}$ для последующего расчёта общей вероятности обнаружения нарушителя в СФЗ.
4. Обоснована необходимость учёта КТС в расчётах эффективности СФЗ — их игнорирование ведёт к систематическому занижению результатов.

Практическая значимость модели состоит в возможности корректно оценивать вклад мануальных извещателей в общую вероятность обнаружения нарушителя, что позволяет избежать некорректных и заниженных оценок при проектировании и модернизации систем физической защиты.

Ключевые слова: физическая защита, нечётко-вероятностная модель, вероятность обнаружения нарушителя.

Введение

Эффективность обнаружения нарушителя в системах физической защиты (далее — СФЗ) часто рассматривают как вероятность обнаружения в критической точке $P_{обн}$, хотя фактически это только эффективность комплекса технических средств СФЗ.

$$P_{обн} = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P_{обнi}), \quad (1)$$

где $P_{обнi}$ — вероятность обнаружения факта несанкционированного преодоления i -го технического средства; k — количество технических средств, которые размещены на пути движения нарушителя к критической точке.

Формула (1) не учитывает правильности применения какого-либо вида средства обнаружения (далее — СО) на конкретном участке рубежа обнаружения СФЗ. Например, если условия применения конкретного технического СО не соответствуют техническим условиям на изделие, то его использование либо снижает надежность СО и соответственно, вероятность обнаружения, либо сильно повышают частоту ложных срабатываний, что может существенно снизить общую эффективность всей СФЗ. В работе [1] также подчёркивается актуальность задач оценки эффективности СФЗ критически важных объектов в целях выработки управленческих решений с помощью имитационного моделирования и многомерных статистических методов.

Оценка соответствия требованиям к применению i -го СО на конкретном участке рубежа обнаружения может быть осуществлена путем умножения показателя на условный поправочный коэффициент применимости $k_{пр}^i$, находящийся в диапазоне от 0 до 1:

$$P_{обн} = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - k_{пр}^i P_{обнi}). \quad (2)$$

В СФЗ СО обычно представлены исключительно извещателями. Они предназначены для выявления попыток несанкционированных действий нарушителя.

Согласно классификации ГОСТ Р 52435—2015[2] извещатели в зависимости от способа приведения их в действие классифицируются на:

- автоматические;
- мануальные (ручные, ножные).

Мануальный (от лат. Manualis — ручной): ручной извещатель является одним из важных СО СФЗ. На практике как ручной, так и ножной принято называть извещателем охранным ручным или кнопкой тревожной сигнализации (далее — КТС).

При этом если на объекте установлена КТС, но при расчетах эффективности СФЗ её не учитывают — это су-

щественная ошибка. Дело в том, что без КТС снижается оценка эффективности, поскольку не учитывается один из самых достоверных источников получения информации. Если этот фактор не учитывать, расчеты вероятности обнаружения в СФЗ будут некорректными.

Предлагаем использовать следующую формулу:

$$P_{обн} = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - k_{пр}^i P_{обнi}) \times (1 - P_{ктс}), \quad (3)$$

где $P_{ктс}$ — вероятность успешного срабатывания КТС при обнаружении нарушителя.

Переход от вероятности к уверенности

Основным количественным показателем извещателя как СО является вероятность обнаружения, т.е. вероятность того, что извещатель обнаружит нарушение при возникновении события (например, проникновения). Такая вероятность обычно определяется стандартными методами через его статистическое тестирование и моделирование на основе экспериментальных данных и представляет собой четко определенное число в диапазоне от 0 до 1.

В ситуации с количественной оценкой активации КТС не все так просто. Успешность ее активации зависит, как минимум, от следующих факторов:

- техническое состояние самой КТС (работоспособна/неработоспособна)
- доступность органов управления КТС (насколько легко КТС активизировать или нет)
- реакция сотрудника охраны (как человеческий фактор)

Вероятность работоспособности КТС $P_{раб.ктс}$ определяется стандартными методами аналогично любым охраняемым извещателям. Для объективной оценки Доступности органов управления и Реакции сотрудника охраны необходимо использовать вербально-числовые шкалы, применяемые преимущественно в тех случаях, когда оценки по критерию носят субъективный характер ISO 10551:2019 [3]. В состав вербально-числовых шкал входят, как правило, содержательное описание градаций шкалы и числовые значения, соответствующие каждой из градаций шкалы.

Таким образом, мы закономерно приходим к целесообразности использования подхода, основанного на использовании мнений экспертов и предполагающего нормативное задание необходимых значений на основе опыта, знаний и предпочтений специалистов-экспертов в области физической защиты.

В качестве примера вербально-числовой шкалы, имеющей достаточно широкое применение, можно при-

вести шкалу Харрингтона, характеризующую степень выраженности критериального свойства, очень широко применяющуюся при принятии решений и имеющую универсальный характер [4]. Принцип построения вербально-числовых шкал на примере шкалы Харрингтона приведен в таблице ниже.

Таблица 1.
Численные значения описательных градаций
вербально-числовой шкалы Харрингтона

№	Содержательное описание градаций	Вербально-числовая шкала Харрингтона
1	очень высокая	10,8–12
2	высокая	0,64–0,83
3	средняя	0,37–0,64
4	низкая	0,2–0,375
5	очень низкая	0–0,2

Безусловно, вербально-числовая шкала Харрингтона удобна для быстрого пересчета качественных оценок в численные, однако обладает весьма существенным недостатком: она не учитывает характер распределения оценок и предполагает равномерное распределение значений по категориям, хотя на практике оценки могут быть смещены и концентрироваться в определённых диапазонах [5].

В работе предлагается расширить шкалу Харрингтона и использовать нечеткую логику для учета возможной неравномерности распределения значений по категориям.

Предлагается модифицировать шкалы Харрингтона путем введения нечеткой логики: каждая лингвистическая градация желательности описывается не четким интервалом, а нечетким множеством с функцией принадлежности (например, треугольной или гауссовой), параметры которой настраиваются на основе фактической выборки с помощью алгоритмов кластеризации, что позволяет адаптивно смещать центры категорий в зоны сгущения данных и сужать их на разреженных участках, обеспечивая плавный переход между оценками и исключая парадокс резкой смены статуса отклика при незначительном изменении его числового значения.

Анализ компетенций сотрудника охраны, проводимый в нашей модели с помощью лингвистических переменных, согласуется с современными концепциями человеко-центрированной безопасности [6], где предлагается использовать генеративный ИИ для анализа поведенческих паттернов пользователей. В отличие от подхода Sharma et al., наша модель не требует боль-

ших данных для обучения, а базируется на экспертных оценках и нечеткой логике, что делает её применимой в условиях ограниченной статистики.

Для нашей модели Мамдани имеем три входных переменных:

- Работоспособность КТС;
- Доступность органов управления КТС (Access) = {малая(low); средняя (middle); высокая (high)};
- Реакция охраны (Security);

и одну выходную переменную:

Успешность активации Success= {малая(low); средняя (middle); высокая (high)}.

Все переменные, кроме Работоспособности КТС, являются нечеткими лингвистическими переменными и задаются функциями принадлежности. Переменную Исправность кнопки будем оценивать как объективную вероятность $P_{\text{раб.тр.кн.}}$ и трактовать как вес соответствующего правила.

Компетентность сотрудника охраны, применяющего КТС, можно классифицировать по нескольким основным критериям. Вот основные категории компетенций и их расшифровка:

1. Профессиональные знания и умения
 - Знание инструкции по применению КТС (условия, порядок действий).
 - Навыки обращения с техническими средствами охраны.
 - Знание алгоритма взаимодействия с силами реагирования.
2. Юридическая грамотность
 - Знания оснований для вызова групп реагирования.
 - Понимание границ своих полномочий при работе с тревожной кнопкой.
 - Ориентация в правилах оформления инцидентов и событий.
3. Личностные качества
 - Знания оснований для вызова групп реагирования.
 - Понимание границ своих полномочий при работе с тревожной кнопкой.
 - Ориентация в правилах оформления инцидентов и событий.
4. Навыки взаимодействия
 - Эффективная коммуникация с коллегами, сотрудниками объекта, экстренными службами.
 - Умение передавать четкую и корректную информацию.
 - Способность корректно вести себя с посетителями и персоналом во время тревоги.
5. Практический опыт
 - Участие в регулярных учениях и тренировках по тревожной кнопке.

- Наличие подтвержденных случаев успешного реагирования на тревожные сигналы.

В соответствии с данными категориями можно выделить следующие уровни компетенции:

Уровень	Описание
Низкий (low)	Не знает алгоритмов, допускает серьезные ошибки, не действует при тревоге.
Базовый, средний (middle)	Знает теорию, имеет некоторый опыт, допускает незначительные ошибки.
Высокий (high)	Обладает уверенными навыками, быстро реагирует, обладает необходимым опытом.

Основой для проведения операции нечеткого логического вывода является база правил, содержащая нечеткие высказывания в форме «ЕСЛИ — ТО»:

ЕСЛИ Access= low И Security= low ТО Success= low
($P_{\text{раб.кТС}}$)

ЕСЛИ Access= low И Security= middle ТО Success= low
($P_{\text{раб.тр.кТС}}$)

ЕСЛИ Access= low И Security= high ТО Success= low
($P_{\text{раб.кТС}}$)

ЕСЛИ Access= middle И Security= low ТО Success= low
($P_{\text{раб.кТС}}$)

ЕСЛИ Access= middle И Security= middle ТО Success= middle
($P_{\text{раб.кТС}}$)

ЕСЛИ Access= middle И Security= high ТО Success= middle
($P_{\text{раб.кТС}}$)

ЕСЛИ Access= high И Security= low ТО Success= low
($P_{\text{раб.тр.кн.}}$)

ЕСЛИ Access= high И Security= middle ТО Success= middle
($P_{\text{раб.кТС}}$)

ЕСЛИ Access= high И Security= high ТО Success= high
($P_{\text{раб.кТС}}$)

Разработка компьютерной модели оценки уверенности в успешном нажатии кнопки тревожной сигнализации

Для реализации компьютерной модели мы использовали широко применяемую платформу в сфере технических вычислений MATLAB, а именно входящий в ее состав модуль Fuzzy Logic Designer.

MATLAB представляет собой высокоуровневую среду численных вычислений и язык программирования, широко используемую в научных исследованиях для моделирования и анализа сложных систем, а входящий в её состав интерактивный инструмент Fuzzy Logic Designer обеспечивает наглядное проектирование нечётких систем вывода на основе алгоритмов Мамдани и Сугено: он позволяет графически задавать входные и выходные лингвистические переменные, конфигурировать функции принадлежности различных типов (треугольные, гауссовы, трапецеидальные и др.) и формировать базу правил «если-то», после чего автоматически генерирует поверхность нечёткого вывода, выполняет симуляцию и экспортирует спроектированную систему в рабочее пространство MATLAB или в Simulink для дальнейшего использования в контуре управления, обработки сигналов и поддержки принятия решений [6].

В работе [7] также использовался алгоритм Мамдани в комплексе с другими моделями нечёткого вывода (Цукамото и Сугено) для решения задачи обнаружения атак типа «глушение» в беспроводных системах видеонаблюдения. Авторы отмечают эффективность каждой из моделей в зависимости от критериев, что косвенно подтверждает корректность нашего выбора в пользу алгоритма Мамдани как наиболее наглядного и широко применяемого для задач, где важна интерпретируемость базы правил.

Общий вид модели оценки уверенности в успешном нажатии тревожной кнопки приведен на рис. 1.

Построенные функции принадлежности термов входных и выходной лингвистических переменных приведены на рис. 2.

Полная база правил для случая $P_{\text{раб.тр.кн.}} = 0.98$ приведена на рис. 3.

Средствами FIS Editor построим поверхности «вход-выход», соответствующие синтезируемой нечеткой системе (рис. 4).

Валидация построенной модели заключается в задании значений входных переменных в окне Rule Viewer (рис. 5). При этом искомым итог рассчитывается программой посредством дефадзификации.

Получается, при данных входных условиях (доступность кнопки = 0.98; реакция сотрудника охраны = 0.99; вероятность работоспособности КТС = 0.98) степень уверенности в успешном срабатывании КТС при обнаружении нарушителя $P_{\text{раб.кн.}} = 0.838$, что вполне согласуется с результатами практических испытаний.

Эта величина может использоваться как входная для формулы (3).

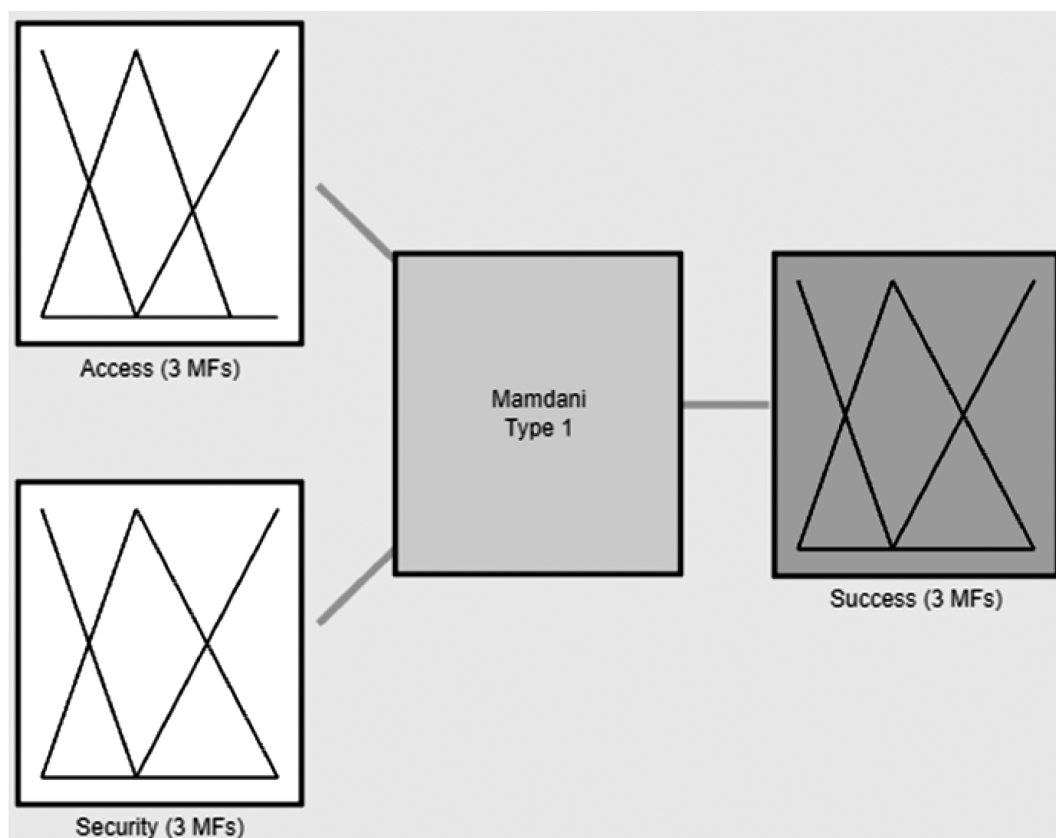


Рис. 1. Общий вид модели оценки уверенности в успешном нажатии КТС

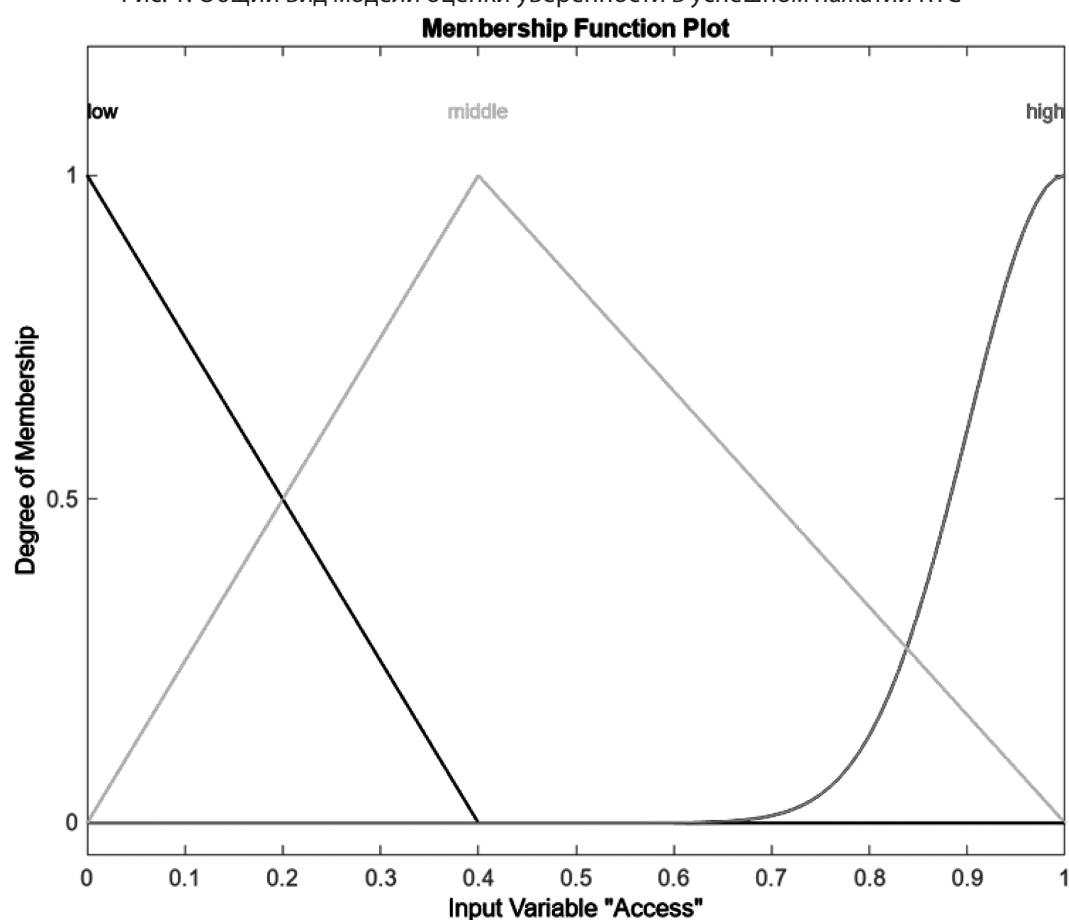


Рис. 2. Функции принадлежности всех лингвистических переменных

	Rule	Weight
1	If Access is low and Security is low then Success is low	0.98
2	If Access is middle and Security is low then Success is low	0.98
3	If Access is high and Security is low then Success is low	0.98
4	If Access is low and Security is middle then Success is low	0.98
5	If Access is middle and Security is middle then Success is middle	0.98
6	If Access is high and Security is middle then Success is middle	0.98
7	If Access is low and Security is high then Success is low	0.98
8	If Access is middle and Security is high then Success is middle	0.98
9	If Access is high and Security is high then Success is high	0.98

Рис. 3. База правил

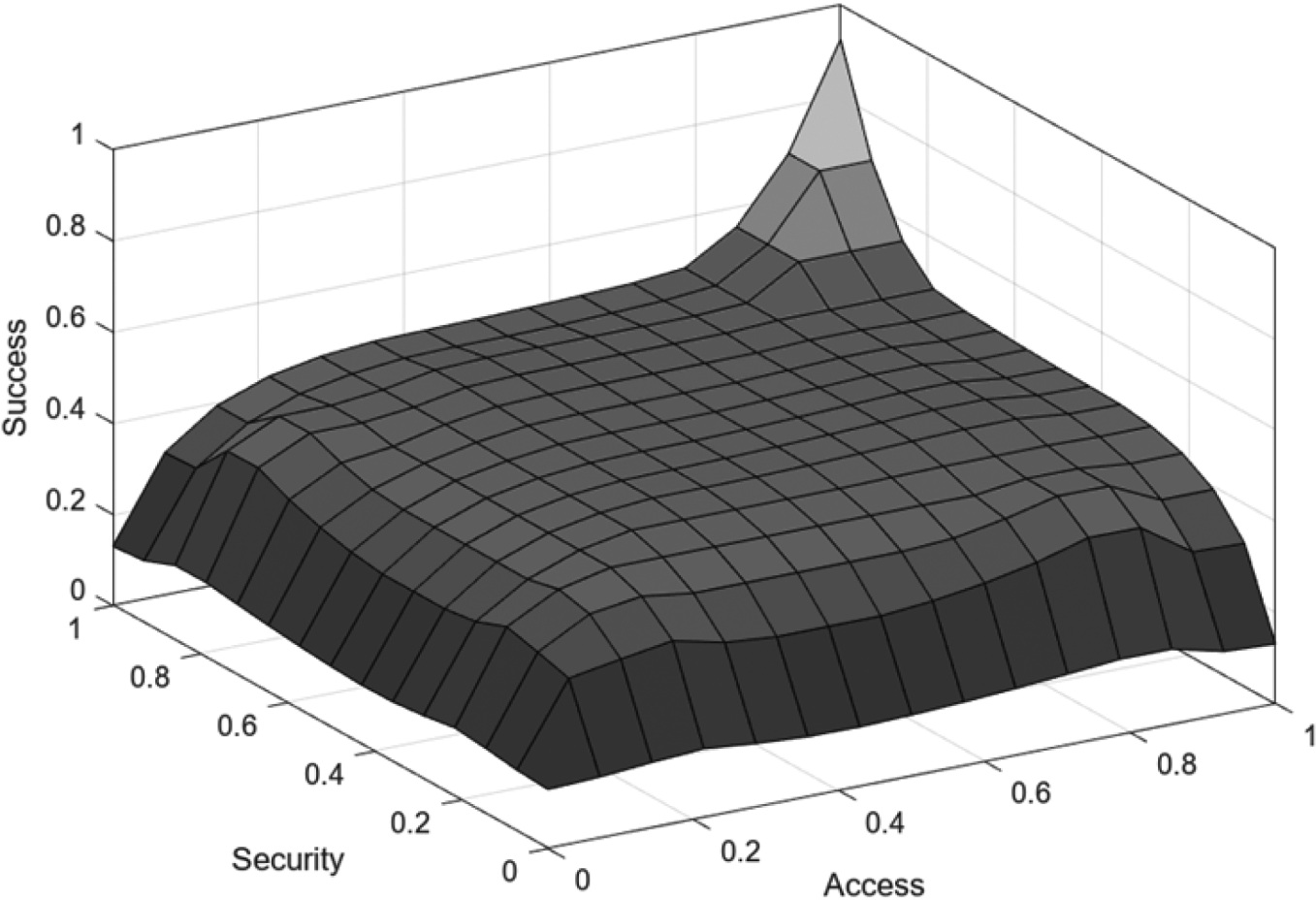


Рис. 4. Зависимость выходной переменной Success от входных переменных

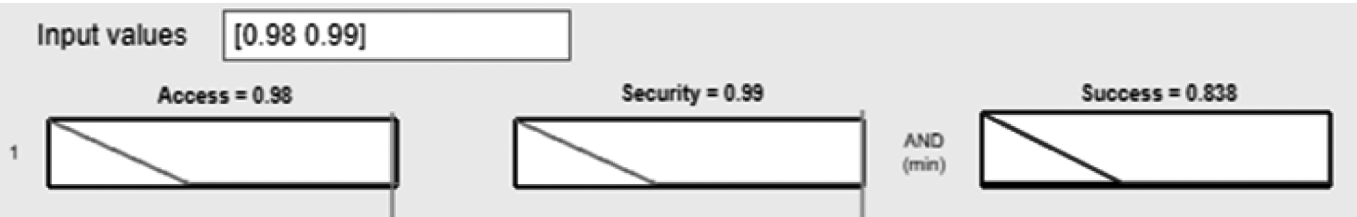


Рис. 5. Тестирование построенной модели

Заключение

Разработанная модель имеет практическую значимость для проектирования и модернизации систем физической защиты объектов информатизации: она позволяет учитывать самый достоверный источник информации о нарушении — сотрудника охраны — и тем самым избегать заниженных и некорректных оценок эффективности СФЗ. Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение базы правил для учё-

та дополнительных факторов (например, психофизиологического состояния сотрудника, типа охраняемого объекта) и на интеграцию модели с автоматическими системами сбора статистики для адаптивной настройки функций принадлежности, например с использованием многокритериальной оценки, предложенной в [8, 9]. Это позволит перейти от оценки единичного средства (КТС) к комплексному анализу эффективности всей системы физической защиты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шнякина Е.А. Методика принятия эффективных управленческих решений по обеспечению физической безопасности критически важных объектов / Е.А. Шнякина, В.Н. Костин // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2023. — Т. 20, № 10(232). — С. 46–55. — DOI 10.14489/vkit.2023.10.pp.046-055. — EDN JMLFKS.
2. ГОСТ Р 52435—2015. Технические средства охранной сигнализации. Классификация. Общие технические требования и методы испытаний: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 октября 2015 г. № 1659-ст: введен впервые: дата введения 2016-05-01. — Текст: электронный // ГАРАНТ: информационно-правовой портал. — URL: <https://base.garant.ru/71392390/> (дата обращения: 16.05.2026).
3. ISO 10551:2019. Ergonomics of the Physical Environment—Subjective Judgement Scales for Assessing Physical Environments // ISO: Geneva, Switzerland. — 2019. — 28 p.
4. Елисеева О.А. Алгоритмизация применения функции желательности для выбора оптимального решения задач / О.А. Елисеева, Л.И. Баева // Контроль качества продукции. — 2025. — № 12. — С. 31–34. — EDN RTYNNH.
5. Иванов Андрей Валерьевич, Огнев Игорь Александрович. Проблемы оценки доверия к процессам аудита информационной безопасности // Вопросы кибербезопасности. 2024. №3 (61). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-otsenki-doveriya-k-protsessam-audita-informatsionnoy-bezopasnosti> (дата обращения: 16.05.2026).
6. Разработка модели управления кондиционером на основе нечеткой логики / Б.М. Шифрин, И.В. Елисеев, А.И. Шалабот, Е.С. Пендриков // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2020 : Материалы докладов научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 10 апреля 2021 года / Отв. редактор Е.Г. Хитров. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2021. — С. 583–587.
7. Sharma S., Dash P., Soni B., Rawal Y.S. Human-centric security: the role of generative AI in user behavior analysis // Generative Artificial Intelligence for Next-Generation Security Paradigms. — Wiley, 2026. — Глава 9. — DOI: 10.1002/9781394305698.ch9.
8. Jasim M.A., Atia T.S. An IoT-fuzzy-based jamming detection and recovery system in wireless video surveillance system // International Journal of Computational Intelligence and Applications. — 2023. — Vol. 22, No. 02. — DOI: 10.1142/S1469026823500103.
9. Метод многокритериальной оценки эффективности технических средств в организационно-технических системах / Д.Ф. Кожевин, А.В. Матвеев, Г.Х. Самигуллин, А.С. Смирнов // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». — 2023. — № 4. — С. 59–70. — DOI 10.61260/2218-130X-2024-2023-4-59-70. — EDN NWHMER.

© Шифрин Борис Маркович (shifrinb@mail.ru); Муравьев Александр Георгиевич (muravyev_a_g@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРИМЕНЕНИЕ ИИ-ТЕХНОЛОГИЙ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ УЧЕНИЙ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПОЖАРНОЙ ОХРАНЫ

APPLICATION OF DUAL-USE AI TECHNOLOGIES FOR CONDUCTING EXERCISES OF FIRE PROTECTION UNITS

**M. Shkitronov
O. Voitenok**

Summary. The research relevance presented in the article is due to the complexity of fires in the urbanized environment and at critical infrastructure facilities. The current situation requires a high level of coordination and decision-making from fire departments in conditions of lack of time and information.

The main scientific problem of the study is that traditional methods of conducting exercises do not allow simulating the unpredictable dynamics of real emergency situations.

The research goal is to theoretically comprehend the possibilities of integrating dual-use intelligent technologies into the exercises of fire protection units.

The research objectives included: the study of the scientific discourse of the topic, the systematization of existing dual-use AI technologies, and the identification of their potential for the exercises of fire protection units.

The following methods were used in the study: historiographic, formal-logical analysis, generalization, and systematization.

The study allows us to formulate the following conclusion: the use of dual-use technologies has a high potential for modeling hyper-realistic, dynamic scenarios of exercises of fire protection units.

Keywords: dual-use artificial intelligence, fire protection, tactical exercises, simulation modeling, personnel training, crisis management.

Шкитронов Михаил Евгеньевич

кандидат педагогических наук, доцент,
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет
Государственной противопожарной службы
Министерства Российской Федерации
по делам гражданской обороны, чрезвычайным
ситуациям и ликвидации последствий стихийных
бедствий имени Героя Российской Федерации
генерала армии Е.Н. Зиничева
shkitronov@mail.ru

Войтенко Олег Викторович

кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет
Государственной противопожарной службы
Министерства Российской Федерации
по делам гражданской обороны, чрезвычайным
ситуациям и ликвидации последствий стихийных
бедствий имени Героя Российской Федерации
генерала армии Е.Н. Зиничева

Аннотация. Актуальность представленного в статье исследования обусловлена сложностью пожаров в урбанизированной среде и на объектах критически важной инфраструктуры. Сложившаяся ситуация требует от подразделений пожарной охраны высокого уровня координации и принятия решений в условиях нехватки времени и информации.

Основная научная проблема исследования состоит в том, что традиционные методы проведения учений не позволяют моделировать непредсказуемую динамику реальных чрезвычайных ситуаций.

Поэтому целью исследования является теоретическое осмысление возможностей интеграции интеллектуальных технологий двойного назначения в учения подразделений пожарной охраны.

Задачи исследования включали: изучение научного дискурса темы, систематизацию существующих интеллектуальных технологий двойного назначения, выявление их потенциала для учений подразделений пожарной охраны.

В исследовании были использованы следующие методы: историографический, формально-логический анализ, обобщение и систематизация.

Проведенное исследование позволяет сформулировать следующий вывод: применение технологий двойного назначения обладает высоким потенциалом для моделирования гиперреалистичных, динамичных сценариев учений подразделений пожарной охраны.

Ключевые слова: искусственный интеллект двойного назначения, пожарная охрана, тактические учения, имитационное моделирование, подготовка личного состава, управление в кризисных ситуациях.

Введение

Актуальность темы исследования определяется следующими соображениями: в настоящее время наблюдается рост разрушительных крупномасштабных пожаров при высокой плотности городской застройки, наличии сложных инфраструктур и использовании новых материалов с непредсказуемым поведением в огне. При этом основной проблемой является «нелинейность» развития таких происшествий, где традиционные, отработанные на статичных учениях алгоритмы поведения личного состава просто теряют эффективность.

Помимо этого, существуют объективные ограничения для проведения полномасштабных тактических учений с реальным развертыванием техники и имитацией дыма, тепла и обрушений. Такая ситуация обусловлена, на наш взгляд, высокими экономическими затратами, логистическими сложностями и требованиями экологической безопасности. При этом, если мы посмотрим на смежные области и, прежде всего, на ситуацию в оборонном секторе и градостроительном проектировании, то увидим, что здесь уже произошла качественная революция в области применения интеллектуальных технологий. Адаптация таких интеллектуальных систем для нужд пожарной охраны, безусловно, поможет преодолеть разрыв между ограниченными условиями учебных полигонов и хаотичностью развития реального пожара.

Таким образом, представленное в статье исследование нацелено на заполнение теоретического пробела в сфере управления учениями подразделений пожарной охраны.

Материалы и методы

Материалами исследования включают работы российских и зарубежных авторов, а также отчетов Государственной противопожарной службы Российской Федерации [4]. В частности, в рамках анализа инновационных систем обучения курсантов были изучены работы таких авторов, как С.Н. Аксенов, Д.П. Морозова [1], И.В. Баяжков, С.Н. Никишов, А.В. Кузнецов [2], В.В. Булгаков [3]. Зарубежная историография изучаемой темы представлена трудами таких авторов, как Р. Браун [5], Дж. Каспер, Р. Мерфи [6], М. Грин, П. Холл [7], А. Джонсон [8], М.А. Хан [9], Дж. Смит, Б. Уильямс [10].

Представленное в статье исследование проводилось в 2024–2025 гг. на основе анализа открытых научных публикаций, материалов конференций по безопасности, технической документации и имитационным платформам.

Методы исследования включают: историографический анализ для изучения эволюции методологии про-

ведения пожарно-тактических учений; формально-логический анализ для понимания процесса управления на пожаре на элементарные решения; обобщение и систематизация полученных в исследовании данных.

Результаты исследования

Для проведения более подробного анализа возможностей технологий двойного назначения в сфере проведения учений подразделений пожарной охраны нами систематизированы следующие технологии:

1. Компьютерное зрение, включая видеоанализ камер: распознает дым или огонь в реальном времени («DJI Thermal» + ИИ-модули). Технология может применяться для мониторинга сценариев на учениях.
2. Термографический скрининг, в рамках которого осуществляется анализ тепловых аномалий ($\pm 1,5^\circ\text{C}$) многоспектральными сенсорами.
3. Дополненная и виртуальная реальности: «Oculus Quest 2» и носимые гарнитуры AR. Данная технология может служить иммерсивным тренажером для симуляции пожаров и эвакуации виртуальных пострадавших. VR-симуляторы также могут применяться для разработки сценариев с помощью нейросети типа «Stable Diffusion».
4. Робототехника и дроны для тушения возгорания: «DJI Matrice 300», который осуществляет автономный сброс в труднодоступных зонах.
5. Роботы МЧС, типа УГВ «Витязь» и «Уран», могут осуществлять разведку и тушение пожара.
6. Технология предиктивной аналитики, при которой машинное обучение на датчиках позволяет прогнозировать распространение огня благодаря многофакторному анализу дыма, температуры и уровня газа.
7. Семантическая сегментация, которая представляет собой нейросеть для картирования зон риска, что позволяет сразу видеть точки возгорания и план цифрового двойника здания.
8. Системы C2 на базе ИИ, которые могут осуществлять координацию действий личного состава во время учений (российский аналог «Palantir» для чрезвычайных ситуаций). Данная технология позволяет проводить раннее обнаружение очага возгорания на камерах и датчиках для тренировки курсантов пожарной охраны.

В современном пожаротушении в зарубежных странах давно применяются на практике передовые алгоритмы глубокого обучения для компьютерного зрения. Например, системы видеоаналитики, модули для «DJI Thermal», распознают дым и открытое пламя в реальном времени, и тем самым обеспечивают объективный мониторинг развития учебной ситуации пожара [8, с. 89].

В то же время термографический скрининг с использованием многоспектральных сенсоров высокой чувствительности ($\pm 1,5^\circ \text{C}$) позволяет выявить скрытые тепловые аномалии, то есть личный состав может быстро и точно идентифицировать очаги тления и прогнозировать пути распространения огня даже внутри конструкций зданий.

Технологии дополненной и виртуальной реальности, в основном платформы типа «Oculus Quest 2», являются фактически ядром иммерсивных тренажерных комплексов. При этом адаптированные генеративные нейросетевые модели с архитектурами «Stable Diffusion» уже применяются в большинстве стран мира для динамической симуляции сценариев пожаров, задымлений и аварийных ситуаций [6, с. 368].

Робототехнические комплексы двойного назначения могут быть очень полезны для моделирования сложных учебных ситуаций: так, БПЛА типа «DJI Matrice 300», со специальными модулями для сброса огнетушащих веществ, можно задействовать для отработки курсантами тактики тушения в труднодоступных условиях. Наземные роботы, среди которых российские «Витязь» или «Уран», изначально созданные для задач МЧС и гражданской обороны, также можно применять в учениях для разведки, эвакуации условных пострадавших и ликвидации последствий пожара даже при имитации ситуаций радиационного или химического заражения.

Предиктивная аналитика на основе машинного обучения позволяет молниеносно изучить данные с сетей датчиков, при этом моделируется многофакторное распространение пожара с учетом параметров температуры, состава газовой среды и расположения помещений. При этом методы семантической сегментации автоматически картируют зоны повышенного риска на цифровых планах объекта возгорания, что дает возможность командирам эргономично распределять ресурсы.

В свою очередь, интеграционный аспект отражен в специализированных системах управления и связи (С2), построенных на ИИ: так, российские аналоги платформ уровня «Palantir», на сегодняшний день адаптированные для нужд гражданской обороны, вполне могут обеспечить координацию сил и средств в ходе крупномасштабных межведомственных учений, а системы раннего обнаружения существенно сокращают время реагирования курсантов в тренировочных заданиях.

Судя по имеющимся эмпирическим данным, применение упомянутых выше технологий повышает реалистичность учений на 50–70 % [5, с. 106], что позволяет существенно снизить травматизм участников, а также минимизировать материальные затраты.

На основе проведенного исследования можно констатировать, что интеграция ИИ-технологий двойного назначения в учебный процесс поможет перейти от сценарных, шаблонных учений к адаптивным и стресс-тестирующим вариантам работы. В частности, в ответ на действия тренируемых курсантов подразделений пожарной охраны, учебная ИИ-платформа может реальном времени модифицировать такие параметры условного пожара, как скорость распространения, направление возгорания, возникновение вторичных угроз,

При этом анализ технических характеристик показал, что ключевыми компонентами данной системы являются:

- 1) цифровой двойник локации (на базе GIS-данных и BIM-моделей);
- 2) модуль физически достоверного моделирования пожара и задымления;
- 3) агентная модель поведения условных пострадавших;
- 4) «интеллектуальный противник» (Adversarial AI), основная задача которого находить наиболее уязвимые места в действиях подразделения.

Таблица 1.
Количественные параметры повышения эффективности учений при внедрении ИИ-симулятора (теоретическая оценка)

Параметр оценки	Традиционные учения (базовый уровень)	Учения с применением адаптивного ИИ-симулятора (расчетный потенциал)
Вариативность сценариев за сессию	1–2	До 50+ (генерация на основе начальных условий)
Учет динамических факторов (погода, разрушения)	Минимально, заранее предопределены	Реалистичная динамика, реагирующая на действия обучаемых
Глубина обратной связи (анализ решений)	Качественный разбор постфактум	Количественная оценка каждого тактического решения в реальном времени
Масштаб привлекаемых условных ресурсов (техника, люди)	Ограничен наличием реальных сил	Виртуально не ограничен
Стоимость одного условного часа активных действий	Высокая (ГСМ, износ, логистика)	Сокращается на 60–80 % после этапа первоначальной разработки модели

Представленные в таблице 1 результаты дают возможность говорить о качественном сдвиге от традиционных методов тренировок к интеллектуальной симуляционной среде. Основным теоретическим результатом нашего исследования — это переход от сценарных

учений к адаптивным, которые помогают курсантам вырабатывать стрессоустойчивость в ходе учений. стресс-тестирующим. Применяемые в рамках такой работы ИИ-платформы, ядром которых является «интеллектуальный противник» («Adversarial AI»), позволяют находить уязвимые места в действиях подразделения при динамической модификации параметров пожара. На наш взгляд, данная технология прямо коррелирует с данными Таблицы 1, когда вариативность сценариев возрастает с 1–2 до 50 + за одно проведенное учебное мероприятие, а гибкость мышления личного состава и готовность к нештатным ситуациям возрастают в несколько раз. При таком подходе мы можем учесть практически все основные динамические факторы моделируемой ситуации поджара: то есть, сами учения перестают быть рутинной, становятся реактивными при имитации непредсказуемости реального чрезвычайного происшествия.

Техническая реализация данной платформы основана на создании цифрового двойника локации на основе GIS и BIM-данных, который позволяет обеспечить высокую детализацию картины учений. При этом работа модуля физически достоверного пожара и задымления усиливается технологиями предиктивной аналитики. Мы также установили, что можно прогнозировать распространение огня и автоматически картировать зоны риска с помощью машинное обучение на основе данных с многофакторных датчиков (дым, температура, утечка газа т.п.). В то же время, чтобы сделать учения еще более достоверными можно применить агентную модель поведения условных пострадавших, которая позволяет добавить определенный социально-психологический компонент в симуляцию пожара.

Практическое внедрение интеллектуальных технологий пожарной охраны возможно за счет конкретных технологических решений, среди которых можно перечислить системы компьютерного зрения, включая видеоаналитику для камер «DJI Thermal» и термографический скрининг с точностью $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ для мониторинга температуры. Согласно таблице 1, именно благодаря непрерывному потоку информации с сенсоров глубина данной обратной связи является основанием для количественной оценки каждого тактического решения в реальном времени.

Двойной функционал также есть и у иммерсивных тренажеров на базе VR/AR (Oculus Quest 2) и робототехнических комплексов («Витязь», «Уран», БПЛА): с одной стороны, они обеспечивают безопасную отработку навыков в виртуальных условиях. С другой — такие системы являются физическими интерфейсами, создающими единое киберфизическое пространство для учений. Однако, применение такого рода систем должно быть связано с тем экономическим преимуществом, которое отражено нами в таблице 1: стоимость условного часа

активных учебных действий сокращается на 60–80 % после внедрения ИИ-технологий, при этом масштаб привлекаемых условных ресурсов становится виртуально неограниченным.

Системы управления и связи (C2) на основе ИИ, а также упомянутые нами их российские аналоги платформ «Palantir», позволяют координировать действия в ходе крупных межведомственных учений, моделировать сложную среду виртуально реальной чрезвычайной ситуации. Такого рода системы также позволяют агрегировать данные со всех участвующих в учениях киберфизических системах: дронов, роботов, датчиков, симуляторов. При этом у операторов учений создается целостная и детальная картина прохождения курсантами испытаний.

Таким образом, проведенный анализ обучающихся возможностей ИИ в сфере учений подразделений пожарной охраны позволяет констатировать, что внедрение технологий двойного назначения позволит вывести подготовку курсантов на принципиально новый уровень. Применение ИИ-технологий в исследуемой нами сфере позволит достичь: 1) резкого увеличения вариативности сценариев учений; 2) перехода к объективной количественной оценке действий курсантов; 3) существенного повышения реалистичности (примерно на 50–70 %) при снижении травматизма курсантов и долгосрочных материальных затрат учебных заведений; 4) создания масштабируемой тренировочной среды, без ограничения физическим пространством.

Полученные нами в итоге результаты позволяют сформулировать достаточно прочную основу для дальнейшего развития обучающих систем на основе ИИ, включая стратегический экспортный потенциал этих технологий в сфере борьбы с пожарами.

Выводы

В ходе исследования была теоретически доказана необходимость технологий искусственного интеллекта двойного назначения в процессе создания новых обучающих систем для подразделений пожарной охраны. При этом нами было также выяснено, что основным ключевым преимуществом ИИ-симуляторов является возможность генерировать самые разнообразные сценарии возгораний, что позволяет преодолеть основной недостаток традиционных учений — сценарная предсказуемость. В ходе исследования нам также удалось систематизировать типы ИИ-алгоритмов, наиболее релевантные для задач имитации пожаров и поведения в кризисной среде: предиктивные, агентные и генеративные. На наш взгляд, в будущем внедрение подобных систем в работу Государственной противопожарной службы Российской Федерации. Стратегически необхо-

димое оснащение российских пожарных такого рода системами предполагает, на наш взгляд, развитие цифровой инфраструктуры, включая создание библиотек цифровых двойников типовых объектов, а также подготовку инструкторов для обучения работе с комплексны-

ми симуляционными средами. При этом для успешного внедрения таких обучающих систем является введение пилотных отраслевых стандартов обучения курсантов подразделений пожарной охраны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов С.Н., Морозова Д.П. Разработка и внедрение инновационных методов обучения пожарной безопасности в образовательных учреждениях // Современное педагогическое образование. — 2023. — № 11. — С. 56–79.
2. Багажков И.В., Никишов С.Н., Кузнецов А.В. Алгоритм реализации сценариев ситуационных пожарно-тактических задач с применением МВТК-МЧС // Современные проблемы гражданской защиты. — 2023. — № 3 (48). — С. 77–92.
3. Булгаков В.В. Иммерсивная форма подготовки: актуальность и перспективы внедрения в образовательный процесс вузов МЧС России // Вестник МГПУ. Серия: Информатика и информатизация образования. — 2020. — № 4 (54). — С. 56–79.
4. Государственная противопожарная служба Российской Федерации // МЧС России. — URL: <https://вдпо.рф/enc/gosudarstvennaya-protivopozharnaya-sluzhba> (дата обращения: 01.05.2024).
5. Brown R. Autonomous Vehicles for Hazardous Material Response. Safety Science. — 2022. — № 1. — pp. 105–225.
6. Casper J., Murphy R.R. Human-robot interactions during the robot-assisted urban search and rescue response at the World Trade Center // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans. — 2003. — № 2. — pp. 367–385.
7. Green M., Hall P. Artificial Intelligence and Robotics in Fire and Rescue Services // AI Magazine. — 2024. — № 44(2). — pp. 56–63.
8. Johnson A. Sensor Fusion for Enhanced Situational Awareness in Firefighting. IEEE Sensors Journal. — 2019. — № 19. — pp. 88–96.
9. Khan M.A. Applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) in fire safety // Fire Technology. — 2020. — № 1. — pp. 637–666.
10. Smith J., Williams B. Autonomous Ground Vehicles for Fire Suppression. Fire Technology. — 2024. — № 60(1). — pp. 123–130.

© Шкитронов Михаил Евгеньевич (shkitronov@mail.ru); Войтенко Олег Викторович
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОСТРОЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ПОЧЕК ПРИ ГНОЙНО-СЕПТИЧЕСКИХ ОСЛОЖНЕНИЯХ В НЕОТЛОЖНОЙ АБДОМИНАЛЬНОЙ ХИРУРГИИ

ACUTE KIDNEY INJURY IN PURULENT-SEPTIC COMPLICATIONS IN EMERGENCY ABDOMINAL SURGERY

**K. Aksenov
L. Lobanov
T. Aksenova
S. Lobanov
Yu. Lobanov
P. Pershin**

Summary. Acute kidney injury (AKI) is a common and life-threatening complication in abdominal surgery, significantly increasing mortality and the length of hospital stay. The problem is particularly relevant in patients with purulent-septic complications; however, the risk factors and outcomes of AKI in this group remain understudied.

Objective: To identify predictors influencing the incidence of acute kidney injury and to assess disease outcomes in patients with purulent-septic complications in abdominal surgery.

Materials and Methods: A single-center observational study was conducted involving 70 intensive care unit patients with peritonitis and sepsis (main group) and 20 patients who underwent elective laparoscopic cholecystectomy (control group). The diagnosis of AKI was made according to KDIGO criteria.

Results: In the main group, AKI was diagnosed in 34 patients (48.6 %), with 16 (47 %) of them having stage 3. Mortality in stage 3 AKI was 87.5 %. The most significant factors for the development of AKI were: sepsis, proteinuria, and the duration of surgery. In the control group, despite a comparable frequency and structure of comorbidity, no cases of AKI were recorded.

Conclusion: The development of AKI in purulent-septic processes is a prognostically unfavorable factor. Prevention should be aimed at timely correction of volumic disorders, adequate treatment of sepsis, and mandatory monitoring of renal function in at-risk patients.

Keywords: acute kidney injury, sepsis, peritonitis, markers, and risk factors.

Аксенов Константин Олегович

аспирант,

Читинская государственная медицинская академия

Лобанов Леонид Сергеевич

кандидат медицинских наук, доцент,

Читинская государственная медицинская академия

leonid.lobanov74@mail.ru

Аксенова Татьяна Александровна

доктор медицинских наук, доцент,

Читинская государственная медицинская академия

tatianaks@mail.ru

Лобанов Сергей Леонидович

доктор медицинских наук, профессор,

Читинская государственная медицинская академия

slobanov15@mail.ru

Лобанов Юрий Сергеевич

кандидат медицинских наук, доцент,

Читинская государственная медицинская академия

yuriilobanov@mail.ru

Першин Павел Викторович

врач-уролог ГУЗ ГКБ №1, Чита

pashkamanul1998@gmail.com

Аннотация. Острое повреждение почек (ОПП) является распространенным и жизнеугрожающим осложнением в абдоминальной хирургии, существенно повышающим летальность и продолжительность госпитализации. Особую актуальность проблема приобретает у пациентов с гнойно-септическими осложнениями, однако факторы риска и исходы ОПП в этой группе остаются недостаточно изученными.

Цель: Выявление предикторов, влияющих на частоту развития острого повреждения почек, и оценка исходов заболевания у пациентов с гнойно-септическими осложнениями в абдоминальной хирургии.

Материалы и методы: Проведено одномоментное наблюдательное исследование 70 пациентов отделения реанимации с перитонитом и сепсисом (основная группа) и 20 пациентов, перенесших плановую лапароскопическую холецистэктомию (контрольная группа). Диагноз ОПП определялся по критериям KDIGO.

Результаты: В основной группе ОПП установлено у 34 пациентов (48,6 %), из них у 16 (47 %) выявлена 3-я стадия. Летальность при ОПП 3-й стадии составила 87,5 %. Наиболее значимыми факторами развития ОПП явились: сепсис, протеинурия, продолжительность оперативного вмешательства. В контрольной группе, несмотря на сопоставимую частоту и структуру коморбидности, случаев ОПП зафиксировано не было.

Заключение: Развитие ОПП при гнойно-септических процессах является прогностически неблагоприятным фактором. Профилактика должна быть направлена на своевременную коррекцию волевических нарушений, адекватное лечение сепсиса и обязательный мониторинг функции почек у пациентов группы риска.

Ключевые слова: острое повреждение почек (ОПП), сепсис, перитонит, маркеры ОПП, факторы риска.

Острое повреждение почек (ОПП) представляется распространенной и потенциально смертельной проблемой у пациентов хирургического профиля, перенесших абдоминальные операции [1,2,3,4]. По данным литературы, частота ОПП у пациентов, которым проводилось оперативное лечение на органах брюшной полости, может составлять от 13 до 16 % при этом риск летального исхода повышается в 2–3 раза [1,3]. Острое повреждение почек ассоциируется с увеличением продолжительности госпитализации. Вероятность развития ОПП зависит от многих факторов, в частности, от характера и объема оперативного вмешательства, особенностей патологического процесса, коморбидного фона и других. В масштабном исследовании, включившем 57075 пациентов, было установлено, что срочная операция ассоциирована с достоверным повышением риска ОПП. Скорректированный коэффициент опасности в этой группе составил 1,9 по сравнению с пациентами, перенесшими плановые операции [5]. Данные масштабных исследований свидетельствуют о серьезных отдаленных последствиях ОПП. Каждый третий пациент (31 %) сталкивается с развитием ХБП в течение года после острого эпизода, а повторные случаи ОПП усугубляют повреждение почек. При этом риск сохраняется в долгосрочной перспективе, даже если функция почек изначально пришла в норму, что было подтверждено десятилетним наблюдением [6,7].

Как известно, ОПП — патологическое состояние, развивающееся в результате токсичного воздействия ренальных и/или экстраренальных повреждающих факторов, характеризующееся быстрым (часы-дни) развитием признаков повреждения или дисфункции почек различной степени выраженности. Признаки ОПП определяют в соответствии с рекомендациями KDIGO на основании наличия одного из следующих критериев: нарастание креатинина $\geq 0,3$ мг/дл ($\geq 26,5$ мкмоль/л) в течение 48 ч, или нарастание креатинина $\geq 1,5$ раза, возникшее в течение 7 суток от исходного показателя, или темп диуреза $< 0,5$ мл/кг/ч в течение 6 ч [8,9].

Патогенез, ОПП представляет собой комплексное повреждение различных структур почки, которое приводит к органной недостаточности. Ключевым звеном является нарушение клубочковой фильтрации и экскреторной функции, что влечет за собой расстройство системного гомеостаза. [10,11,12]. Вместе с тем, несмотря на значительное количество исследований по данной теме, остается недостаточно изученным вопрос о факторах риска ОПП и исходах заболевания в группе пациентов с гнойно-септическими осложнениями в абдоминальной хирургии.

Цель исследования — определение предикторов, влияющих на частоту развития острого повреждения почек, и оценка исходов заболевания у пациентов с распространенным перитонитом.

Материалы и методы

Проведено одномоментное наблюдательное исследование 70 пациентов (мужчин — 42, женщин — 28, в возрасте от 23 до 77 лет), находившихся на лечение в отделении реанимации и интенсивной терапии городской клинической больницы №1 г. Читы, в период 2023–2025 г. С этой целью разработаны специальные карты, включавшие наиболее объективную и доступную базовую информацию о пациентах: общие сведения, результаты диагностики, особенности операции.

Проводилась оценка факторов риска: возраста, пола, наличия коморбидных заболеваний: артериальной гипертензии, сахарного диабета, сердечной патологии, заболеваний, сопровождающихся развитием синдрома нижних мочевыводящих путей. Проведен анализ характера, объема и длительности оперативного вмешательства. Критерием включения в группу исследования было наличие у пациента хирургической патологии, осложненной развитием распространенного перитонита. Источником перитонита явились заболевания органов брюшной полости и их осложнения (таблица №1). Диагноз устанавливался на основании общеклинических и лабораторных данных, результатах оперативного лечения, мониторинга послеоперационного периода. В результате все пациенты основной группы разделены на две подгруппы: 1а (n=34) пациенты с выявленными признаками ОПП, 1б (n=36) без признаков ОПП.

Таблица 1.
Источники распространенного перитонита

Источник перитонита	Количество	%
Панкреонекроз	16	22,9 %
Неопухолевые заболевания кишечника (Перфорация, острая кишечная непроходимость, дивертикулит, заворот, мегадолихосигма, ущемленные грыжи, мезентериальная ишемия)	13	18,6 %
Острый аппендицит (Острый гангренозно-перфоративный/флегмонозный аппендицит, аппендикулярный инфильтрат, аппендикулярный абсцесс)	11	15,7 %
Опухоли брюшной полости (диссеминация)	10	14,3 %
Перфорация язвы желудка/двенадцатиперстной кишки	9	12,8 %
Заболевания желчного пузыря, желчевыводящих путей и печени	6	8,6 %
Травмы живота с повреждением внутренних органов	5	7,1 %
Всего	70	100 %

В качестве группы сравнения проведен анализ историй болезни 20 пациентов (мужчин — 7, женщин — 13, в возрасте от 28 до 74 лет) с диагнозом: Желчнокаменная болезнь. Хронический калькулезный холецистит, ремиссия, которым выполнена лапароскопическая холецистэктомия. Всем пациентам проводилось исследование уровня креатинина и мочевины в сыворотке крови, которые как известно, являются биохимическими маркерами функции почек. Расчет скорости клубочковой фильтрации производился по формуле CKD-EPI. Оценка развития и степени тяжести ОПП проводилась с использованием критериев KDIGO. Для обработки данных использовались методы описательной статистики (медиана, среднее значение, стандартное отклонение). Для оценки взаимосвязей между категориальными переменными применялся критерий хи-квадрат (χ^2). Корреляционный анализ проводился с вычислением коэффициента корреляции Пирсона (r) для количественных и точечно-бисериального коэффициента для качественных и количественных переменных. Статистическая значимость определялась при p -value $<0,05$.

Результаты и обсуждение

В исследуемой группе, среди 70 пациентов с осложненной хирургической патологией, ОПП выявлено у 34 пациентов (48,6 %) Рис. 1. Установлено следующее распределение по стадиям KDIGO: 1 стадия: 10 пациентов (29,4 %), 2 стадия: 8 пациентов (23,5 %), 3 стадия: 16 пациентов (47 %). В контрольной группе случаев ОПП не выявлено. Всего в основной группе умерло 26 пациентов (37,1 %). В группе 1а, летальных исходов было 18 (69,2 %),

в группе 1б — 8 (30,8 %). При этом летальность у пациентов с ОПП 3 стадии, была значительно выше, чем в среднем по основной группе — 14 неблагоприятных исходов из 16 (87,5 %). Данные представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Факторы риска и исходы при ОПП

Факторы риска и исходы Основная группа n=70	Группа 1а n=34	Группа 1б n=36	Показатель Достоверности P
Сепсис n=26	22 (84,6 %)	4 (11,4 %)	P1<0,05
Летальный исход n=26	18 (69,2 %)	8 (30,8 %)	P2<0,05
Возраст старше 65 лет n=44	26 (59,1 %)	18 (40,9 %)	P3<0,05

P1 — статистически значимое различие между 1 и 2 группой; P2 — между 1 и 3 группой; P3 — между 2 и 3 группой

Выявленные факторы риска можно разделить на предоперационные, интраоперационные и послеоперационные.

К предоперационным факторам риска относятся: возраст >65 лет: подавляющее число летальных исходов (22 из 26) и случаев ОПП (26 из 34) произошло у пациентов старше 65 лет. Средний возраст пациентов в группе с развившимся ОПП составил 68,1 лет, в группе без ОПП — 61,8 лет. Наиболее часто встречающимися коморбидными заболеваниями выступили: сахарный диабет 2 типа, артериальная гипертензия, ИБС, ХСН, ХОБЛ. Структура коморбинности в группах 1а и 1б представлена в таблице 3.

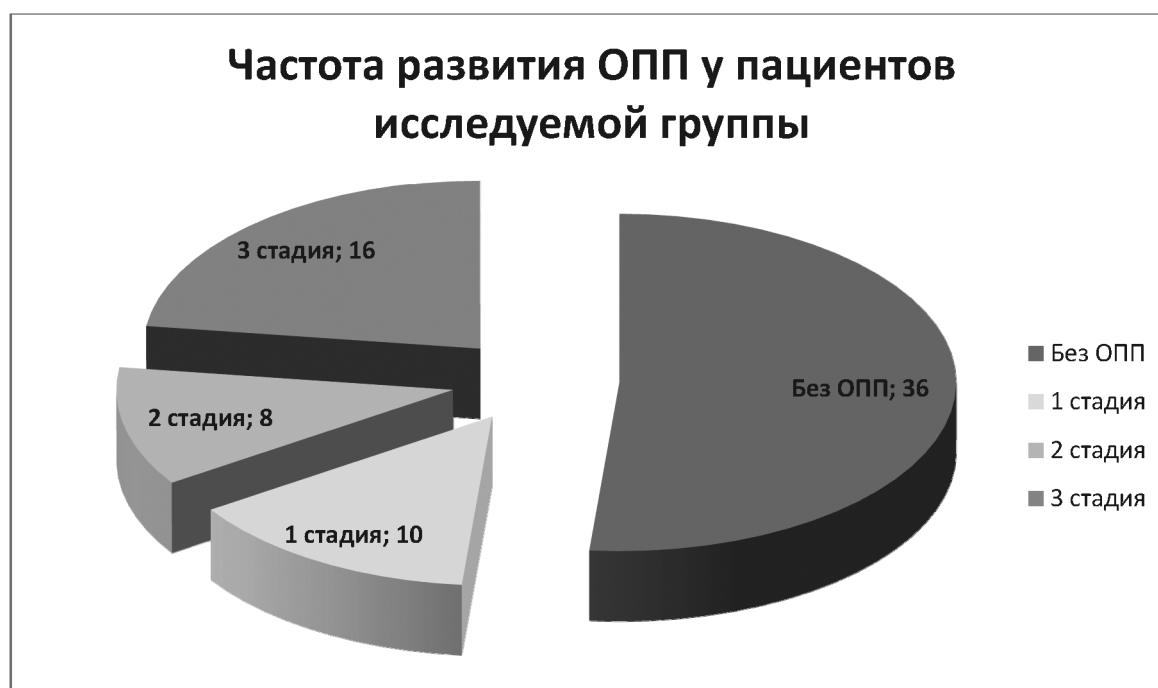


Рис. 1. Частота развития ОПП в группе больных с гнойно-септическими осложнениями

Таблица 3.

Структура сопутствующей патологии у пациентов с наличием и отсутствием признаков ОПП

Коморбидное заболевание	Группа 1а	Группа 1б
Артериальная гипертензия	62.5 %	42.1 %
Абдоминальное ожирение	18.8 %	10.5 %
Сахарный диабет 2 типа	18.8 %	10.5 %
Ишемическая болезнь сердца	25.0 %	21.1 %
Хроническая сердечная недостаточность	12.5 %	15.8 %
Хроническая обструктивная болезнь легких	12.5 %	15.8 %

Коморбидность в контрольной группе — 73.3 %, в основной — 68.6 %. В обеих группах доминируют одни и те же классы хронических заболеваний: сердечно-сосудистые (артериальная гипертензия, ишемическая болезнь сердца), метаболические (сахарный диабет 2 типа) и хронические заболевания легких (ХОБЛ). Таким образом, аналогия в коморбидности не связана со спецификой основной патологии, а отражает общие эпидемиологические тенденции в структуре заболеваемости населения, особенно в старших возрастных группах, которые и составляют основу контингента хирургического стационара.

В условиях планового операционного стресса коморбидность является управляемым фоном, не приводящим к серьезным осложнениям. В условиях же экстренной абдоминальной катастрофы (перитонит, сепсис) эти же

коморбидные состояния становятся критически важными факторами, значительно увеличивающими риск развития тяжелого ОПП и летального исхода, формируя категорию пациентов максимального риска. Вместе с тем, несмотря на высокую частоту сопутствующей патологии, ни у одного пациента контрольной группы не развилось ОПП, что не позволяет рассматривать коморбидность, как ключевой фактор риска. Наиболее сильная зависимость выявлена между развитием сепсиса на фоне основного заболевания и частотой ОПП. Из 26 пациентов с установленным сепсисом у 22 (84,6 %) выявлено острое повреждение почек. Летальность в этой когорте достигла крайне высоких значений, составив 69,2 % (18 случаев из 26). Ключевым фактором, инициирующим каскад патологических реакций, служил распространенный перитонит (зарегистрирован у 48 пациентов), который, особенно при гнойном, фибринозно-гнойном или каловом характере, выступал основным триггером системного воспаления и последующего сепсиса.

Как известно, длительные и обширные операции (гемиколэктомия, резекция кишки, релапаротомии) несут большой риск кровопотери, гиповолемии и интраоперационной гипотонии. Для оценки влияния данного фактора на риск возникновения ОПП нами проведен анализ длительности вмешательств у пациентов с развившимся ОПП (подгруппа 1а — 34 пациента) и без признаков ОПП (подгруппа 1б — 36 пациентов). Данные представлены в таблице 4.

Несомненно, одним из важных тестов, является характер изменений в анализах мочи. Обнаружено, что

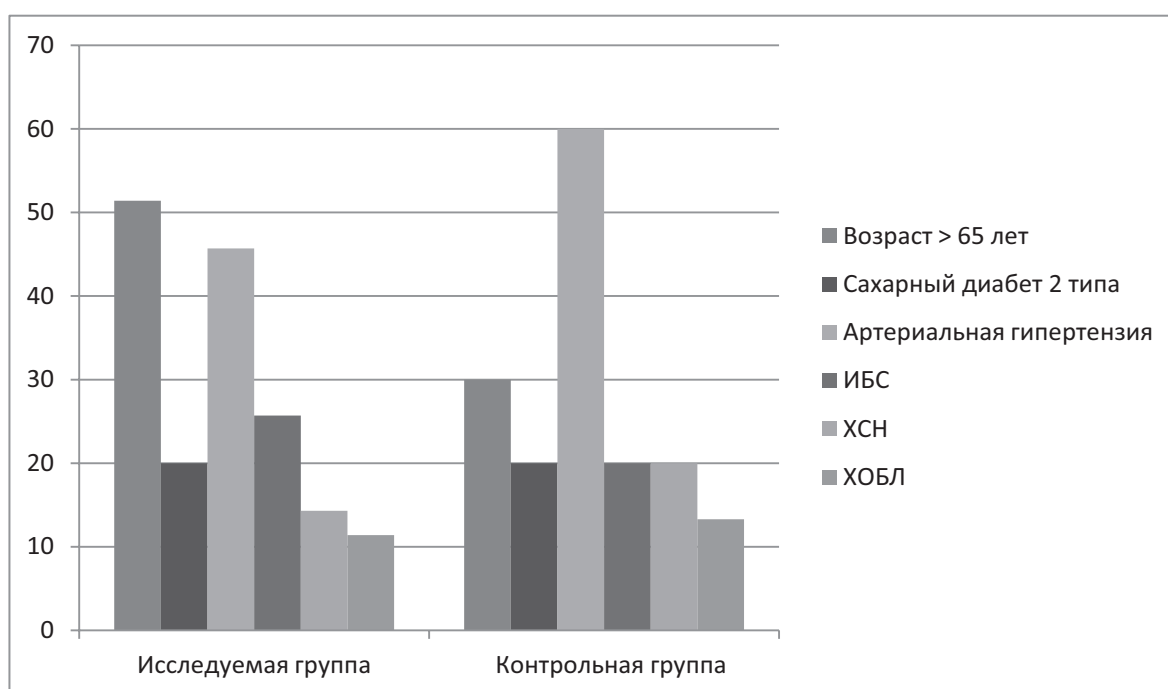


Рис. 2. Коморбидность среди пациентов исследуемой и контрольной группы

Таблица 4.
Влияние продолжительности операции на частоту ОПП

Группы пациентов (основная группа n=70)	Число пациентов	Средняя длитель- ность операции (мин) Ме (Q1, Q3)	P
1а. С признаками ОПП	34 (48,6 %)	126 (97, 150)	P1<0,05
1б. При отсутствии при- знаков ОПП	36 (51,4 %)	73 (35, 80)	P2<0,05
2. Контрольная группа	20	55 (35, 65)	P3<0,05

P1 — статистически значимое различие между 1 и 2 группой; P2 — между 1 и 3 группой; P3 — между 2 и 3 группой. протеинурия, лейкоцитурия и микрогематурия, являющиеся наиболее частыми спутниками ОПП, отражая как септическое поражение почечной ткани, так и другие патогенетические механизмы. Все три мочевых синдрома демонстрируют статистически значимую корреляцию с развитием ОПП (рис. 3). Протеинурия является наиболее сильным предиктором с коэффициентом корреляции 0.63 и относительным риском 3.90, что делает ее ценным ранним маркером для прогнозирования и своевременной профилактики острого повреждения почек.

При этом олигурия и особенно анурия (12 случаев, все с ОПП 3 ст. и летальным исходом) являются не столько фактором риска, сколько ранним проявлением уже развившегося тяжелого ОПП.

Таблица 5.
Корреляционная связь факторов риска
с развитием ОПП

Фактор риска	Коэффициент корреляции	Статистическая значимость	Клиническая интерпретация
Сепсис	0.72	p < 0.001	Системное воспаление приводит к полиорганной недостаточности
Протеинурия	0.63	p < 0.01	Маркер повреждения почечного фильтра
Распространенный перитонит	0.51	p < 0.01	Источник эндотоксикоза
Гемотрансфузия	0.45	p < 0.05	Реакция на гемотрансфузию, риск гемолиза
Полиморбидность	0.42	p < 0.05	Кумулятивный эффект факторов риска
Гиповолемия	0.41	p < 0.05	Снижение почечного кровотока
Возраст > 65 лет	0.35	p < 0.05	Возрастное снижение почечного резерва
ТЭЛА	0.38	p < 0.05	Острая правожелудочковая недостаточность
Артериальная гипертензия	0.32	p < 0.05	Хроническое повреждение почечных сосудов

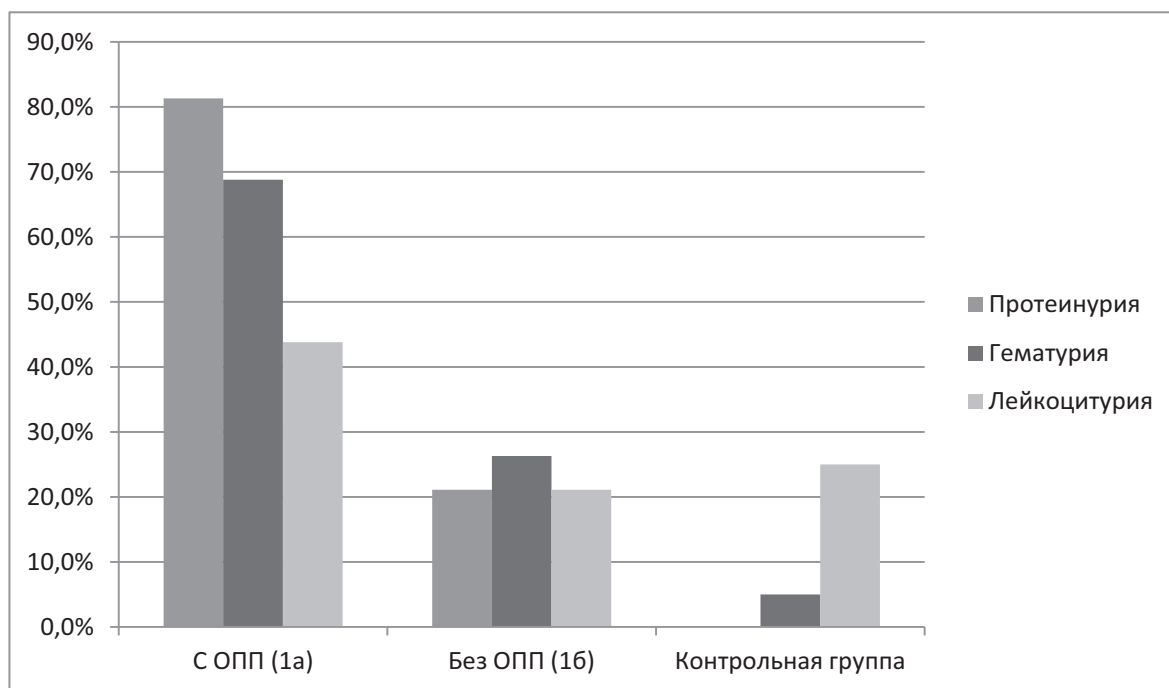


Рис. 3. Лабораторные маркеры риска ОПП

Заключение

Таким образом можно выделить наиболее значимые факторы влияющие на исходы болезни: основными предикторами ОПП, являются сепсис и распространенный перитонит. Наличие сепсиса приводит к развитию ОПП в 84.6% случаев. Экстренный характер и большая продолжительность (более 100 минут) оперативного вмешательства, являются независимыми хирургическими факторами риска. Плановая операция (контрольная группа) даже на фоне аналогичной коморбидности не привела ни к одному случаю ОПП. Среди исследуемых лабораторных параметров протеинурия, гематурия и лейкоцитурия имели наиболее сильную статистическую связь с развитием ОПП, что позволяет рассматривать их, как ценный предиктор для раннего выявления пациентов группы риска и своевременного начала профилактических мероприятий.

Развитие ОПП в исследуемой когорте имеет полиэтиологическую природу и является, вероятно, результатом взаимодействия нескольких патогенетических механизмов: системной воспалительной реакции (сепсис), гиповолемии (кровопотеря, гемотрансфузия), гемодина-

мических катастроф и прямого повреждения почечной паренхимы. Проведенный анализ подтверждает данные современных исследований о том, что ОПП является не просто частым осложнением, а ключевым предиктором летальности в абдоминальной хирургии.

Выводы

1. Острое повреждение почек (ОПП) у пациентов с осложненной абдоминальной патологией, повышает вероятность летального исхода, более чем в 2 раза.
2. Основным предиктором (ОПП), является наличие системного воспаления (сепсис, перитонит). К значимым хирургическим факторам риска относятся — экстренный характер, объем и большая продолжительность оперативного вмешательства.
3. Профилактика должна быть направлена на контроль модифицируемых факторов риска, в первую очередь — своевременную коррекцию гемодинамических нарушений и адекватное лечение сепсиса с обязательным мониторингом функции почек, особенно после объемных операций и у лиц старшей возрастной группы.

ЛИТЕРАТУРА

1. O'Connor M.E., Kirwan C.J., Pearse R.M., Prowle J.R. Incidence and associations of acute kidney injury after major abdominal surgery. *Intensive Care Med.* 2016 Apr;42(4):521–530. doi: 10.1007/s00134-015-4157-7. Epub 2015 Nov 24. PMID: 26602784.
2. Céspedes B., Gutiérrez R., Egaña J.I., de la Maza P., Toro L., Penna A. Association Between Postoperative Acute Kidney Injury and Long-Term Mortality in Patients Undergoing Major Abdominal Surgery: A Cohort-Based Study. *A Pract.* 2025 Aug 22;19(8): e02038. doi: 10.1213/XAA.0000000000002038. PMID: 40844863.
3. Liu J., Lin S.H., Zhao Y.S., Luo R.J., Zhang Z.T., Wang L.Y., Xie K., Fan J., Zhang M., Chai Y.S., Tang H., Xu F. Incidence, and risk factors of acute kidney injury after abdominal surgery: a systematic review and meta-analysis. *Ann Med.* 2025 Dec;57(1):2547324. doi: 10.1080/07853890.2025.2547324. Epub 2025 Aug 17. PMID: 40819346; PMCID: PMC12360056.
4. Lara-Jiménez A., Monedero P., Echarri G. Postoperative acute kidney injury in major abdominal surgery. Utility of the urinary biomarker [TIMP-2] × [IGFBP7] (NephroCheck™). *Rev Esp Anestesiol Reanim (Engl Ed).* 2025 Aug-Sep;72(7):501853. doi: 10.1016/j.redare.2025.501853. Epub 2025 May 21. PMID: 40409484
5. Khetarpal S., Tremper K.K., Heung M., Rosenberg A.L., Englesbe M., Shanks A.M., Campbell D.A. Jr. Development, and validation of an acute kidney injury risk index for patients undergoing general surgery: results from a national data set. *Anesthesiology.* 2009;110(3):505–515. PMID: 19212261. <https://doi.org/10.1097/ALN.0b013e3181979440>.
6. Collins A.J., Foley R.N., Gilbertson D.T., et al. United States Renal Data System public health surveillance of chronic kidney disease and end-stage renal disease. *Kidney Int Suppl* (2011). 2015;5(1):2–7. doi:10.1038/kisup.2015.2.
7. Sawhney S., Marks A., Fluck N., et al. Post-discharge kidney function is associated with subsequent ten-year renal progression risk among survivors of acute kidney injury. *Kidney International.* 2017; 92(2):440–452; doi:10.1016/j.kint.2017.02.019.
8. Смирнов А.В., Добронравов В.А., Румянцев А.Ш., Каюков И.Г. Острое повреждение почек. Москва: МИА, 2015. — 448.
9. Kidney Disease: Improving Global Outcomes (KDIGO) Acute Kidney Injury Work Group. KDIGO Clinical Practice Guideline for Acute Kidney Injury // *Kidney Inter.* — 2012. — Suppl.2. — P.1–138.
10. Смирнов А.В., Румянцев А.Ш. Острое повреждение почек. Часть I. Нефрология. 2020;24(1):67–95. <https://doi.org/10.36485/1561-6274-2020-24-1-67-95>
11. Ostermann M., Lumlertgul N., Jeong R., See E., Joannidis M., James M. Acute kidney injury. *Lancet.* 2025 Jan 18;405(10474):241–256. doi: 10.1016/S0140-6736(24)02385-7. PMID: 39826969.
12. Devarajan P. Pathogenesis of intrinsic acute kidney injury. *Curr Opin Pediatr.* 2023 Apr 1;35(2):234–238. doi: 10.1097/MOP.0000000000001215. Epub 2022 Dec 9. PMID: 36482770; PMCID: PMC9992147.

© Аксенов Константин Олегович; Лобанов Леонид Сергеевич (leonid.lobanov74@mail.ru);
 Аксенова Татьяна Александровна (tatianaks@mail.ru); Лобанов Сергей Леонидович (slobanov15@mail.ru);
 Лобанов Юрий Сергеевич (yurilobanov@mail.ru); Першин Павел Викторович (pashkamanul1998@gmail.com)
 Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПРОФИЛАКТИКИ РЕЦИДИВОВ КРОВОТЕЧЕНИЙ ПРИ ЭРОЗИВНЫХ ПОРАЖЕНИЯХ ЖЕЛУДКА

OPTIMIZATION OF METHODS FOR PREDICTING AND PREVENTING BLEEDING RECURRENCE IN EROSIVE GASTRIC LESIONS

**D. Amarantov
E. Orevkov
N. Afanaseva**

Summary. Aim: To optimize the treatment algorithm for patients with bleeding caused by erosive gastric lesions by developing a method for predicting and preventing recurrent bleeding in this condition.

Materials and Methods. Analysis of data from 232 patients with bleeding due to erosive gastric lesions.

Results. Risk factors for bleeding recurrence in patients with erosive gastric lesions were identified. The timing of rebleeding following initial hemostasis was analyzed. Algorithms for preventing bleeding recurrence in patients with erosive gastric lesions were developed.

Conclusion. An algorithm for predicting and preventing recurrent gastrointestinal bleeding in patients with erosive gastric lesions has been introduced into clinical practice. The use of this algorithm improves the effectiveness of treatment in patients with erosive gastric lesions.

Keywords: Dieulafoy's lesion, erosive gastritis, gastrointestinal bleeding, recurrent bleeding, endoscopic hemostasis.

Амарантов Дмитрий Георгиевич

доктор медицинских наук, профессор,

Пермский государственный медицинский университет

имени академика Е.А. Вагнера

svetlam1@yandex.ru

Оревков Евгений Борисович

Ассистент, Пермский государственный медицинский

университет имени академика Е.А. Вагнера

orevkv.fanat@yandex.ru

Афанасьева Нина Валерьевна

Пермский государственный медицинский университет

имени академика Е.А. Вагнера

nina.v.afanaseva@yandex.ru

Аннотация. Цель исследования: оптимизировать алгоритм лечения больных с кровотечениями, обусловленными эрозивными поражениями желудка, путем создания методики прогнозирования и профилактики рецидивов кровотечений при этой патологии.

Материалы и методы. Анализ данных 232 пациентов с кровотечениями при эрозивных поражениях желудка.

Результаты исследования. Выявлены факторы риска рецидива кровотечения у пациентов с эрозивными поражениями желудка. Проанализированы сроки повторной геморрагии от момента первичного гемостаза. Сформированы алгоритмы профилактики рецидива кровотечения у пациентов с эрозивными поражениями желудка.

Выводы. В клиническую практику внедрен алгоритм прогнозирования и профилактики рецидивов желудочно-кишечных кровотечений у пациентов с эрозивными поражениями желудка. Применение данного алгоритма позволяет повысить эффективность лечения пациентов с эрозивными поражениями желудка.

Ключевые слова: синдром Дъелафуа, эрозивный гастрит, желудочно-кишечное кровотечение, рецидив кровотечения, эндоскопический гемостаз.

Введение

Эрозивные поражения желудка — группа заболеваний, характеризующихся локальными поверхностными дефектами слизистой оболочки желудка, не проникающими за пределы ее собственной мышечной пластинки [1]. Часто данные состояния осложняются желудочно-кишечным кровотечением, что требует экстренной хирургической помощи [2; 3]. В данную группу заболеваний могут быть включены такие патологии, как эрозивный гастрит и синдром Дъелафуа. Эрозивный гастрит — заболевание, характеризующееся поражением слизистой оболочки желудка, преимущественно

воспалительного характера [4]. Синдром Дъелафуа — это редкое генетическое заболевание, характеризующееся кровотечением вследствие разрыва аномально расширенных сосудов подслизистого слоя желудка [5]. По литературным данным, эрозивный гастрит является причиной желудочно-кишечных кровотечений в 8–15 % случаев [6]; синдром Дъелафуа — в 1–6,5 % случаев [7; 8].

В современной хирургии предпочтение отдается эндоскопическим методам купирования желудочно-кишечных кровотечений [9, 10]: эффективность данных методов достигает 90 % [11]. С появлением более совершенных методов эндоскопического гемостаза смерт-

ность при синдроме Дъелафуа снизилась с 80 до 9–13 % [3; 12]. На сегодняшний день существует множество способов эндоскопического гемостаза: клипирование, инъекции сосудосуживающих веществ, термическое воздействие. Консенсус об оптимальном способе пока не достигнут [13; 14].

Эндоскопический гемостаз снижает риск рецидива кровотечений, но не предотвращает его полностью. Рецидив кровотечения после первоначального гемостаза происходит в 12,5–15 % случаев синдрома Дъелафуа, что требует повторного эндоскопического вмешательства или оперативного лечения [15]. Факторы риска рецидива кровотечения после первичного эндоскопического гемостаза точно не определены. Например, в качестве предполагаемых предикторов рецидива кровотечения при синдроме Дъелафуа называются инъекционное эндоскопическое лечение, лейкоциты более $10 \times 10^9/\text{л}$ и протромбиновое время более 12 секунд [16].

Таким образом, на сегодняшний день остается ряд нерешенных вопросов при лечении пациентов с желудочно-кишечными кровотечениями, обусловленными эрозивными поражениями желудка: не выявлен наиболее эффективный способ эндоскопического гемостаза, не определены факторы риска рецидива кровотечения, не разработаны алгоритмы профилактики повторных геморрагий.

Цель исследования

Оптимизировать алгоритм лечения больных с желудочно-кишечными кровотечениями, обусловленными эрозивными поражениями желудка (ЭПЖ).

Материалы и методы

Анализ данных 232 пациентов с эрозивными поражениями желудка (ЭПЖ). Пациенты проходили лечение в хирургическом отделении №2 ГБУЗ ПК ГКБ им. М.А. Твелье. Было сформировано две группы пациентов: в первую группу (I) были включены 96 (41,38 %) пациентов, в лечении которых использовалась собственная методика прогнозирования и профилактики рецидивов кровотечения. В I группе было 57 (59,38 %) мужчин и 39 женщин (40,62 %). Вторая (II) группа состояла из 136 (58,62 %) пациентов, в лечении которых использовались стандартные методики. II группа включала 81 (59,56 %) мужчину и 55 (40,44 %) женщин. Группы были идентичны по возрастному и гендерному составу.

Все пациенты поступили в медицинский стационар с клиникой желудочно-кишечного кровотечения, которая включала в себя рвоту неизменной кровью, рвоту «кофейной гущей», мелену и их сочетания. В приемном отделении пациентам выполнялись общий и биохимический анализ крови, общий анализ мочи, электро-

кардиография. Основным диагностическим методом являлась эзофагогастродуоденоскопия (ЭГДС), дополнительными методами обследования — КТ и УЗИ брюшной полости. Эзофагогастродуоденоскопию выполнили всем 232 (100 %) обследуемым сразу при поступлении в хирургическое отделение. УЗИ выполнили 96 (41,38 %) пациентам, КТ — 23 (9,91 %). При выполнении эзофагогастродуоденоскопии оценивали локализацию и характер источника кровотечения, далее осуществляли эндоскопический гемостаз различными методами: инъекционный гемостаз в сочетании с аргонплазменной коагуляцией или клипированием эрозии.

Результаты

Первоначально мы исследовали частоту выявления синдрома Дъелафуа в стационарах, оказывающих экстренную хирургическую помощь. Мы исходили из предположения, что синдром Дъелафуа верифицируется далеко не во всех случаях и часто ошибочно заменяется диагнозом эрозивного гастрита. Это связано с тем, что установить диагноз синдрома Дъелафуа по результатам эндоскопии возможно не во всех случаях, достоверная диагностика возможна только при патологоанатомическом исследовании стенки желудка.

По литературным данным, синдром Дъелафуа является причиной желудочно-кишечных кровотечений в 1–6,5 % случаев [7; 8]. При анализе данных четырех Центральных районных больниц Пермского края с 2016 по 2020 г. было выявлено: из 1265 эпизодов желудочно-кишечных кровотечений синдром Дъелафуа диагностирован лишь в одном случае, что составляет 0,079 %. Это подтверждает наше предположение о том, что в большинстве случаев врачи-эндоскописты избегают постановки достаточно редкого диагноза синдрома Дъелафуа и стремятся установить более распространенный и понятный диагноз эрозивного гастрита. Однако дифференцировать данные нозологии крайне важно, так как при синдроме Дъелафуа (в отличие от эрозивного гастрита) источником кровотечения служат аневризматически расширенные сосуды, остановка кровотечения из которых бывает крайне затруднительной и требует иного подхода.

В связи с этим мы решили среди всех больных ЭПЖ выделить группу пациентов, у которых мы не можем достоверно исключить диагноз синдрома Дъелафуа при эндоскопическом исследовании. В ретроспективной части исследования в данную группу мы включили пациентов с установленным при первичной эндоскопии диагнозом синдрома Дъелафуа и больных с эрозивным гастритом, эндоскопическая картина которых при ретроспективном исследовании не позволяла достоверно отвергнуть наличие диагноза синдрома Дъелафуа. Всех больных с единичными эрозиями отнесли в группу с диагнозом

эрозивного гастрита. При обнаружении множественных эрозий в качестве источника желудочно-кишечного кровотечения наличие синдрома Дъелафуа мы считали исключенным. В проспективном исследовании мы также поделили больных на подгруппы, руководствуясь этим принципом.

В обеих группах пациентов было выделено две подгруппы: подгруппа А — пациенты с единичными ЭПЖ, в которую вошли больные с уже установленным диагнозом синдрома Дъелафуа, и больные с эрозивным гастритом, эндоскопическая картина которых не позволяла достоверно отвергнуть наличие синдрома Дъелафуа; подгруппа В — пациенты с множественными ЭПЖ (больные с эрозивным гастритом, эндоскопическая картина которых позволяла отвергнуть возможность наличия синдрома Дъелафуа). IA подгруппа включала 46 пациентов (19,83 %), IB подгруппа — 50 (21,55 %), IIA подгруппа состояла из 72 пациентов (31,03 %), IIB подгруппа — из 64 (27,59 %).

Первоначально были выявлены предикторы рецидива кровотечения и сроки его возникновения, что определялось при исследовании пациентов II группы.

Во IIA подгруппе, с единичными ЭПЖ, рецидив кровотечения произошел у 34 пациентов (47,22 %). С целью выявления предикторов повторных эпизодов кровотечения проведен анализ взаимосвязи клинико-анамнестических данных с частотой рецидивов. В исследование включили следующие параметры пациентов: пол и возраст, симптоматику основного заболевания, наличие коморбидной патологии, сведения об оперативных вмешательствах в анамнезе, данные общего анализа крови (анемия и тромбоцитопения), эндоскопические признаки (локализацию эрозивных изменений и тип эндоскопической картины).

Рецидивирующий характер геморрагий наблюдался у 21 (29,16 %) из 48 (66,67 %) мужчин и у 13 (18,05 %) из 24 (33,33 %) женщин. Проведенный анализ не подтвердил статистически значимого влияния пола на риск повторного кровотечения ($p=0,404$).

Была выявлена корреляция возраста и риска рецидива кровотечения: среди лиц в возрасте 40–49 лет, которых насчитывалось 11 (15,28 %) человек, рецидив развился у 9 (12,5 %) пациентов, что подтверждает статистически значимую связь данного возрастного интервала с риском повторной геморрагии ($p=0,013$). Данные представлены в табл. 1.

Установлена зависимость между возрастом пациента и вероятностью повторного кровотечения. В когорте пациентов в возрасте 40–49 лет, насчитывавшей 11 (15,28 %) человек, повторные кровотечения развились

у 9 (12,5 %), что подтверждает наличие корреляции ($p=0,013$). Результаты иллюстрируют данные табл. 1.

Таблица 1.

Возрастные особенности исследуемой группы пациентов с единичными ЭПЖ

Параметр	Больные с рецидивом кровотечения (n=34)	Больные без рецидива кровотечения (n=38)	P
Возраст 19–29 лет	2 (2,77 %)	3 (4,16 %)	0,738
Возраст 30–39 лет	2 (2,77 %)	5 (6,94 %)	0,299
Возраст 40–49 лет	9 (12,5 %)	2 (2,77 %)	0,013
Возраст 50–59 лет	4 (5,55 %)	7 (9,72 %)	0,434
Возраст 60–69 лет	8 (11,11 %)	10 (13,88 %)	0,786
Возраст 70–79 лет	5 (6,94 %)	6 (8,33 %)	0,742
Возраст 80–89 лет	3 (4,16 %)	3 (4,16 %)	0,887
Возраст 90–99 лет	1 (1,38 %)	2 (2,77 %)	0,623

При оценке клинической симптоматики установлено, что рвота свежей кровью (гематемезис) являлась значимым предиктором рецидива: повторная геморрагия случилась у 13 (18,06 %) из 16 (22,22 %) больных с этим симптомом ($p=0,002$). Данные представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Взаимосвязь клинических проявлений и рецидивов кровотечений у больных единичными ЭПЖ

Параметр	Больные с рецидивом кровотечения (n=34)	Больные без рецидива кровотечения (n=38)	P
Рвота кровью	13 (18,05 %)	3 (4,16 %)	0,002
Рвота кофейной гущей	3 (4,16 %)	5 (6,94 %)	0,560
Мелена	8 (11,11 %)	14 (19,44 %)	0,221
Рвота кровью и мелена	4 (5,55 %)	9 (12,5 %)	0,172
Рвота кофейной гущей и мелена	6 (8,33 %)	7 (9,72 %)	0,933

Других корреляций между исследуемыми данными и риском рецидива кровотечения выявлено не было. Таким образом, в группе риска рецидива желудочных кровотечений при единичных ЭПЖ находятся пациенты в возрасте 40–49 лет и пациенты с гематемезисом.

Важным аспектом являлось определение временного окна, в котором наиболее вероятно развитие повторной геморрагии. Это было необходимо для определения оптимальных сроков выполнения контрольного эндоскопического исследования (ЭГДС) с профилактической целью. Анализ временных интервалов возникновения

рецидивов показал, что абсолютное большинство повторных геморрагий — 23 (31,94 %) случая — случилось на первые сутки после первичного эндоскопического гемостаза. В более отдалённые периоды частота рецидивов оказалась кратно ниже: на вторые сутки (24–48 ч) — у 2 (2,77 %) пациентов, на третьи (48–72 ч) — у 3 (4,16 %), на пятые (96–120 ч) — у 5 (6,94 %) и на шестые (120–144 ч) — у 1 (1,38 %). Таким образом, основной процент повторных кровотечений развивается в пределах 24 часов после первичного гемостаза. Это послужило основанием для вывода: повторную профилактическую ЭГДС целесообразно выполнять по окончании первых суток с момента первичного гемостаза.

Следующим этапом были определены предикторы рецидива кровотечения у пациентов с множественными эрозивными поражениями, эндоскопическая картина которых позволяла достоверно отвергнуть диагноз синдрома Дъелафуа. Исследование провели на основе анализа данных 64 (100 %) пациентов подгруппы IIB. Рецидив кровотечения был зафиксирован у 26 (40,63 %) человек. Корреляции возраста, пола пациента с рецидивом кровотечения обнаружено не было. Взаимосвязь была найдена с лабораторными данными: анемия средней степени тяжести была выявлена у 16 (25 %) человек с рецидивами кровотечений, у 12 (18,75 %) — без рецидива кровотечения; данные представлены в табл. 3.

Таблица 3.

Показатели гемоглобина (степень анемии) у группы пациентов с множественными ЭПЖ, эндоскопическая картина которых позволяла достоверно исключить наличие синдрома Дъелафуа

Параметр	Больные с рецидивом кровотечения (n=26)	Больные без рецидива кровотечения (n=38)	P
Анемия тяжелой степени (гемоглобин <70 г/л)	2 (3,12 %)	9 (20,31 %)	0,096
Анемия средней степени (гемоглобин 70–90 г/л)	16 (25 %)	12 (18,75 %)	0,018
Анемия легкой степени (гемоглобин 90–120 г/л)	8 (12,5 %)	17 (20,31 %)	0,261

Также был проведен анализ сопутствующих заболеваний пациентов: у 8 (12,5 %) человек с рецидивом кровотечения были выявлены варикозно-расширенные вены пищевода; среди пациентов без рецидива такое состояние диагностировано только у 3 (4,68 %). Данные представлены в табл. 4.

Таким образом, прогностически значимыми предикторами возникновения рецидивов кровотечений при множественных ЭПЖ без признаков синдрома Дъелафуа являются варикозно-расширенные вены пищевода

Таблица 4.

Анамнестические данные пациентов с множественными ЭПЖ, эндоскопическая картина которых позволяла достоверно исключить наличие синдрома Дъелафуа

Параметр	Больные с рецидивом кровотечения (n=26)	Больные без рецидива кровотечения (n=38)	P
Гипертоническая болезнь (ГБ)	19 (29,68 %)	28 (43,75 %)	0,957
Ишемическая болезнь сердца (ИБС)	9 (14,06 %)	15 (23,43 %)	0,694
Язвенная болезнь желудка	3 (4,68 %)	4 (6,25 %)	0,899
Язвенная болезнь двенадцатиперстной кишки	6 (9,37 %)	5 (7,81 %)	0,302
Варикозно-расширенные вены желудка	1 (1,56 %)	2 (3,12 %)	0,793
Варикозно-расширенные вены пищевода	8 (12,5 %)	3 (4,68 %)	0,018
Постоянный пероральный прием ацетилсалициловой кислоты	6 (9,37 %)	14 (21,85 %)	0,244

($p=0,018$) и анемия средней степени тяжести ($p=0,018$). У 19 (29,58 %) пациентов с множественными эрозиями рецидив кровотечения произошел в течение 24 часов после первичного гемостаза, то есть наиболее частый срок возникновения рецидивов кровотечений у пациентов с множественными ЭПЖ — это первые сутки (0–24 ч) с момента первичного обследования (ЭГДС).

Следующим этапом был разработан эффективный способ эндоскопического гемостаза при синдроме Дъелафуа. Мы исходили из предположения, что при стандартных методах эндоскопического гемостаза воздействие направлено только на кровоточащий дефект пораженного сосуда, размер которого обычно не превышает 1–2 мм. При применении подобного стандартного гемостаза у больных синдромом Дъелафуа не происходит гемостатического воздействия на аневризматическое расширение артерии подслизистого слоя желудка, которое может достигать до 1 см в диаметре. Вследствие этого высока вероятность появления нового дефекта сосудистой аневризмы и, следовательно, рецидива кровотечения.

Нами был разработан собственный способ эндоскопического гемостаза, при котором после выполнения аргонплазменной коагуляции непосредственно кровоточащего дефекта слизистой производится аргонплазменная коагуляция неизменной слизистой на площадке диаметром 15 мм вокруг кровоточащего дефекта,

что приводит к облитерации полости аневризмы. В ряде случаев осуществляется дополнительно клипирование кровотока дефекта.

С учетом выявленных нами предикторов и сроков рецидива кровотечения были разработаны алгоритмы действий при поступлении пациента с желудочным кровотечением при ЭПЖ. Алгоритм для лечения пациентов с единичными эрозиями представлен на рис. 1.

Первым шагом являлось выполнение эндоскопического гемостаза по оригинальной методике. Вторым шагом было определение факторов риска повторной геморрагии — гематемезис или возраст в диапазоне 40–49 лет. Наличие перечисленных предикторов служило показанием для повторной ЭГДС в интервале 18–20 часов после первичного гемостаза. В случае визуализации рецидива кровотечения применялся повторный эндоскопический гемостаз, выполняемый по авторской методике. Если же определялись признаки нестабильного гемостаза, реализовывались профилактические эндоскопические мероприятия: превентивная обработка кровотока сосуда и зоны проекции аневризмы с помощью аргонплазменной коагуляции. Пациентам без факторов риска контрольную ЭГДС назначали через 72 часа (трое суток) от момента первичного гемостаза. Также проводилась ЭГДС «по требованию» при клинике, подозрительной на рецидив кровотечения. Третьим шагом являлось оперативное лечение при возникновении повторного рецидива кровотечения.

Алгоритм для лечения пациентов с множественными ЭПЖ, эндоскопическая картина которых позволяла отвергнуть возможность наличия синдрома Дьелафуа, включал следующие этапы. Первый шаг — выполнение комбинированного эндоскопического гемостаза при ЭГДС. Второй шаг — определение факторов риска повторной геморрагии (наличие у пациента варикозно-расширенных вен пищевода и анемии средней степени тяжести). При обнаружении данных предикторов сразу после ЭГДС устанавливался назогастральный зонд, по которому через 18–24 часа с момента первичного гемостаза проводили промывание полости желудка холодным раствором. При обнаружении примеси свежей или старой крови проводили повторную ЭГДС. При визуализации рецидива кровотечения применяли повторный комбинированный эндоскопический гемостаз. При обнаружении неустойчивого гемостаза выполнялись мероприятия эндоскопической профилактики: превентивная обработка эрозии с помощью аргонплазменной коагуляции. При клинике, подозрительной на рецидив кровотечения, проводилась ЭГДС «по требованию». Третий шаг — оперативное лечение при возникновении повторного рецидива кровотечения.

Разработанные алгоритмы применили в клинической практике при лечении пациентов IA и IB подгрупп.

Для оценки эффективности было сравнили результаты лечения пациентов подгрупп IA и IIA с единичными эрозиями, а также подгрупп IB и IIB с множественными эрозиями.

IA подгруппа включала 46 (100 %) пациентов. В IA подгруппе средняя длительность госпитализации составила $6,4 \pm 2,3$ койко-дня, во IIA подгруппе — $7,0 \pm 2,1$ койко-дня.

В IA подгруппе выздоровели 45 (97,83 %) из 46 (100 %) пациентов, умер 1 (2,77 %) человек. Из 72 (100 %) больных IIA подгруппы выздоровели 66 (91,67 %) пациентов, летальный исход наступил у 6 (8,33 %) человек.

Результаты лечения оценивали следующим образом: хорошим результатом считали достижение полного выздоровления; удовлетворительным результатом считали рецидив кровотечения при наличии выздоровления; как неудовлетворительный результат расценивали летальный исход.

При сравнении результатов лечения выявлено, что в IA подгруппе доля хороших исходов достигла 76,09 % (35 пациентов), тогда как в IIA подгруппе — лишь 51,39 % (37 пациентов): разница статистически значима ($p=0,008$). Удовлетворительный результат в IA подгруппе был достигнут в 21,74 % случаев (у 10 пациентов), во IIA подгруппе — в 40,27 % (у 29 больных): различия также статистически значимы ($p=0,037$). Неудовлетворительный исход зафиксирован у 1 (2,17 %) пациента IA подгруппы и у 6 (8,33 %) в IIA подгруппе.

Для оценки эффективности предлагаемой методики в лечении пациентов с множественными эрозиями проведено сравнение результатов лечения пациентов IB и IIB подгрупп. В IB подгруппе средняя длительность госпитализации составила $6,8 \pm 3,4$ койко-дня, во IIB подгруппе — $5,6 \pm 2,6$ койко-дня.

Из 50 (100 %) пациентов IB подгруппы рецидивы кровотечений наблюдались у 12 (24 %) человек (из них летальный исход наступил у 3 (6 %)), тогда как среди 64 (100 %) больных подгруппы IIB рецидивы кровотечений имели место у 26 (40,61 %) пациентов (из них летальный исход наступил у 4 (6,25 %)). Умерло 3 (6 %) пациента IB подгруппы и 6 (9,38 %) человек IIB подгруппы.

Таким образом, хороший результат был достигнут в IB подгруппе — у 38 (76 %) больных, а во IIB подгруппе — у 36 (56,25 %) пациентов ($p=0,029$). Удовлетворительный результат был достигнут у 9 (18 %) пациентов IB подгруппы и у 22 (34,38 %) IIB подгруппы. Разница в количестве больных с достигнутым удовлетворительным результатом лечения в IB и IIB подгруппах была статистически незначимой ($p=0,052$). Неудовлетворительные результаты получены у 3 (6 %) больных IB подгруппы и у 6 (9,38 %) IIB подгруппы ($p=0,508$).



Рис. 1. Алгоритм прогнозирования и профилактики рецидивов кровотечений при единичных ЭПЖ

Обсуждение

Эрозивные поражения желудка, к которым следует отнести синдром Дьелафуа и эрозивный гастрит, могут приводить к рецидивирующим желудочным кровотечениям, что создает опасность для жизни пациента [2; 3]. По данным литературы, во всем объеме желудочно-кишечных кровотечений доля эрозивного гастрита составляет 8–15 % [6], а синдрома Дьелафуа — 1–6,5 % [7; 8]. Однако анализ данных лечения 1265 пациентов с желудочно-кишечными кровотечениями, проходивших лечение в районных стационарах 1–2-го уровней, показал,

что диагноз синдрома Дьелафуа был установлен только в 0,079 % случаев. Такое заметное отличие от цифр, которые предоставляют ведущие мировые клиники, позволило нам сделать вывод, что диагноз синдрома Дьелафуа в ряде случаев достоверно установить трудно и вместо него врачи склонны верифицировать более распространенный диагноз эрозивного гастрита. В связи с указанными сложностями диагностики мы приняли решение относиться к любому случаю кровотечения из единичных эрозий как к возможному синдрому Дьелафуа и применять соответствующие методики гемостаза.

Приоритетным методом остановки кровотечения является эндоскопический гемостаз [9; 10]. При этом, по данным литературы, риск рецидива кровотечения после первоначального гемостаза при синдроме Дье-лафуа может достигать 15 % [15]. Мы предположили, что возможной причиной высокой частоты рецидивов является тот факт, что традиционное гемостатическое воздействие при эндоскопии не захватывает весь аневризматический мешок артерии, и разработали оригинальный способ гемостаза, позволяющий устранить этот недостаток.

На сегодня в научном сообществе нет единого мнения о факторах риска рецидива кровотечения: в качестве потенциальных предикторов названы инъекционное эндоскопическое лечение, лейкоциты более $10 \times 10^9/\text{л}$ и протромбиновое время более 12 секунд [16]. В данном исследовании мы выявили, что предикторами рецидивов желудочных кровотечений при единичных

ЭПЖ являются возраст пациентов 40–49 лет и гематемезис, а при множественных ЭПЖ — варикозно-расширенные вены пищевода и анемия средней степени тяжести.

Результаты, полученные в исследовании, позволили разработать алгоритмы лечения желудочных кровотечений при эрозивных поражениях желудка.

Выводы

Внедрение в клиническую практику алгоритмов прогнозирования и профилактики рецидивов желудочно-кишечных кровотечений у пациентов с эрозивными поражениями желудка позволяет на 16,61 % снизить число рецидивов желудочно-кишечных кровотечений у пациентов с множественными эрозиями желудка и значительно увеличить число хороших результатов лечения у пациентов с единичными ЭПЖ (синдромом Дье-лафуа и эрозивным гастритом с единичными эрозиями) ($p=0,005$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Циммерман Я.С. Гастродуоденальные эрозии: современное состояние проблемы // Клиническая медицина. — 2012. — № 1. — С. 15–23.
2. Хирургическая тактика при синдроме Дье-лафуа редкой локализации / В.П. Земляной, Б.В. Сигуа, Д.В. Гуржий [и др.] // Журнал им. Н.В. Склифосовского. Неотложная медицинская помощь. — 2018. — Т. 7, № 1. — С. 65–67.
3. Upper Gastrointestinal Tract IrAEs: A Case Report About Sintilimab-Induced Acute Erosive Hemorrhagic Gastritis / Q. Ai, W. Chen, Y. Li, G. Li // Frontiers in Immunology. — 2022. — Vol. 13. — № 840916.
4. Хронические эрозии желудка на фоне приема дезагрегантов: мнение эндоскописта / А.Г. Короткевич, Я.Я. Маринич, П.В. Аксенов, М.М. Сапожникова // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. — 2017. — Т. 147, № 11. — С. 25–30.
5. Современные взгляды на этиологию, патогенез, диагностику и лечение синдрома Дье-лафуа (обзор литературы) / Д.Г. Амарантов [и др.] // Вестник хирургии. — 2021. — Т. № 180 (6). — С. 111–116.
6. Эволюция взглядов на эндоскопические аспекты лечения гастродуоденальных кровотечений / Л.А. Ушаева, Д.В. Завьялов, И.Н. Староверов [и др.] // Вестник Ивановской медицинской академии. — 2024. — Т. 29, № 1. — С. 45–49.
7. Clinical, endoscopic, and therapeutic features of bleeding Dieulafoy's lesions: case series and literature review / B. Aabdi, G. Kharrasse, A. Zazour [et al.] // BMJ Open Gastroenterology. — 2024. — Vol. 11. — № e001299.
8. Полянский В.В., Туранова О.А., Сазонова Е.А. Болезнь Дье-лафуа в судебно-медицинской практике // Судебная медицина. — 2020. — Т. 6, № 2. — С. 49–52.
9. Опыт применения аргонплазменной коагуляции для остановки желудочно-кишечных кровотечений в ГАУЗ «ГКБ им. Н.И. Пирогова» г. Оренбурга за период 2021–2023 гг. / А.А. Анисимова, И.Н. Бородин, О.Г. Мельниченко, Р.А. Дашкин // Оренбургский медицинский вестник. — 2024. — Т. XII, № 1 (45). — С. 7–10.
10. Хирургическая тактика при лечении больных с язвенными гастродуоденальными кровотечениями / В.Н. Репин, А.А. Чудинов, О.С. Гудков [и др.] // Пермский медицинский журнал. — 2014. — Т. 31, №4. — С. 6–11.
11. Dieulafoy's Lesion: A Rare and Elusive Cause of Massive Upper Gastrointestinal Bleeding Managed With Endoscopic Therapy / M.M. Alkhanjar, H.A. Hasan, S.H. Albanna [et al.] // Cureus. — 2025. — Vol. 17, № 1. — № e77206.
12. Dieulafoy Lesion in an Atypical Young Patient: A Case Report and Review of the Literature / M.A. Postoll-Downs, F. Ozguc, J. Vasudevan [et al.] // Cureus. — 2024. — Vol. 16, № 5. — № e60513.
13. Saha B., Takkellapati D., Beckman T.J. Cecal Dieulafoy lesion is a rare cause of lower gastrointestinal bleeding: A case report // SAGE Open Medical Case Reports. — 2023. — Vol. 11. — № 2050313X231203463.
14. Mujtaba S., Chawla S., Massaad J.F. Diagnosis and Management of Non-Variceal Gastrointestinal Hemorrhage: A Review of Current Guidelines and Future Perspectives // Journal of Clinical Medicine. — 2020. — Vol. 9, № 2. — № 402.
15. Nojkov B., Cappell M.S. Distinctive aspects of peptic ulcer disease, Dieulafoy's lesion, and Mallory-Weiss syndrome in patients with advanced alcoholic liver disease or cirrhosis // World Journal of Gastroenterology. — 2016. — Vol. 22, № 1. — P. 446–466.
16. Massinha P., Cunha I., Tomé L. Dieulafoy Lesion: Predictive Factors of Early Relapse and Long-Term Follow-Up // GE Port J Gastroenterol. — 2020. — Vol. 27 (4). — P. 237–243.

© Амарантов Дмитрий Георгиевич (svetlam1@yandex.ru); Оревкин Евгений Борисович (orevkv.fanat@yandex.ru);

Афанасьева Нина Валерьевна (nina.v.afanaseva@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МНОГОПРОФИЛЬНЫЙ ПОДХОД В ЛЕЧЕНИИ КРАНИАЛЬНЫХ НЕЙРОПАТИЙ

MULTIDISCIPLINARY APPROACH TO THE TREATMENT OF CRANIAL NEUROPATHIES

**A. Voronova
O. Vorontsova
N. Shaykhutdinov**

Summary. Cranial neuropathies represent a heterogeneous group of cranial nerve lesions, including neuropathic pain and motor deficits in neurovascular compression, viral and ischemic mononeuropathies, traumatic and tumor processes of the skull base. Clinical practice shows that isolated management of a patient within one specialty often leads to a delay in etiological diagnosis, excessive prescription of symptomatic therapy, and insufficient rehabilitation. The purpose of this article is to justify a multidisciplinary (neurological, neurosurgical, otolaryngological, ophthalmological, dental, infectious disease, and rehabilitation) approach to managing patients with cranial neuropathies, propose a structured routing model, and discuss the expected outcomes of implementing interdisciplinary protocols based on current domestic publications and clinical guidelines.

Keywords: cranial neuropathies, orofacial pain, trigeminal neuralgia, facial nerve neuropathy, microvascular decompression.

Воронова Алина Вадимовна

Кандидат медицинских наук, доцент, Ордена Трудового
Красного Знамени Медицинский институт
им. С.И. Георгиевского ФГАОУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского
neurolog85@mail.ru

Воронцова Ольга Дмитриевна

Ордена Трудового Красного Знамени
Медицинский институт им. С.И. Георгиевского
ФГАОУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского
vorontsova-05@yandex.ru

Шайхутдинов Никита Евгеньевич

Ордена Трудового Красного Знамени
Медицинский институт им. С.И. Георгиевского
ФГАОУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского
nikonikoni231@mail.ru

Аннотация. Краниальные нейропатии представляют гетерогенную группу поражений черепных нервов, включающую нейропатические боли и двигательные дефициты при нейроваскулярной компрессии, вирусных и ишемических мононейропатиях, травматических и опухолевых процессах основания черепа. Клиническая практика показывает, что изолированное ведение пациента в рамках одной специальности нередко приводит к задержке этиологической диагностики, избыточному назначению симптоматической терапии и недостаточной реабилитации. Цель статьи — обосновать многопрофильный (неврологический, нейрохирургический, ЛОР, офтальмологический, стоматологический, инфекционистский и реабилитационный) формат ведения пациентов с краниальными нейропатиями, предложить структурированную модель маршрутизации и обсудить результаты, ожидаемые при внедрении междисциплинарных протоколов на основе актуальных отечественных публикаций и клинических рекомендаций.

Ключевые слова: краниальные нейропатии, орофациальная боль, тригеминальная невралгия, нейропатия лицевого нерва, микровазкулярная декомпрессия.

Краниальные нейропатии включают поражения черепных нервов, проявляющиеся болью, чувствительными нарушениями, парезами и дисфункцией органов чувств. Практически значимым параметром является перекрест клинических «территорий» — неврологической, ЛОР, офтальмологической, стоматологической и нейрохирургической. В результате пациент с одной и той же этиологией (например, нейроваскулярным конфликтом или вирусной реактивацией) может последовательно получать разрозненные консультации и неодинаково трактуемые диагнозы, что задерживает выбор этиотропного и патогенетически обоснованного лечения. Клинические рекомендации по краниальным мононейропатиям у взрослых прямо предполагают не-

обходимость консультаций смежных специалистов, инструментальной верификации и этапного лечения в зависимости от формы поражения (рекомендуется первичная консультация невролога с визуальным исследованием при патологии периферической нервной системы) [6]. Отсюда следует потребность в многопрофильной модели, ориентированной на раннюю дифференциальную диагностику, рациональную анальгезию, адресную этиотропную терапию, своевременную нейрохирургическую коррекцию и реабилитацию.

Современный отечественный массив публикаций по краниальным нейропатиям логично группируется по трем клиническим доменам: нейропатическая боль

(включая орофациальные болевые синдромы), двигательные мононейропатии и смешанные синдромы при поражении нескольких нервов.

В отношении нейропатической боли практической опорой остаются обзоры, посвященные диагностике и терапии орофациальных болевых синдромов. М.Ю. Максимова подчеркивает необходимость клинко-анатомической верификации болевого фенотипа и эскалации терапии от доказательных фармакологических подходов к интервенционным методам при резистентном течении, обобщив собственные наблюдения и имевшиеся к тому времени данные литературы [7, с. 5–12]. Такая логика совпадает с международной концепцией «ступенчатого» ведения, но в российских условиях приобретает дополнительное значение из-за высокой доли пациентов, обращающихся первоначально в стоматологическую или ЛОР-службу.

Нейроваскулярная компрессия как причина краниальных нейропатий обсуждается в работах нейрохирургического профиля. На основе данных нейровизуализации Г.Ю. Григорян и Д.Ю. Усачев описали локализацию нейроваскулярного конфликта при тригеминальной невралгии, что имеет прямое значение для выбора хирургической тактики и прогнозирования исходов после декомпрессии [2, с. 37–44]. В клинической серии Ю.А. Шулева и соавт. показана высокая эффективность микроваскулярной декомпрессии у пациентов с тригеминальной невралгией на фоне вертебробазилярной долихоэкстазии; авторы отдельно указывают на профиль осложнений, связанный с транзиторной дисфункцией других черепных нервов. Показанием к МВД явилась неэффективность медикаментозного лечения. [8, с. 50–63]. Тем самым, даже «точечное» нейрохирургическое вмешательство потенциально требует последующего многопрофильного наблюдения (невролог, отоневролог, офтальмолог, реабилитолог).

Вклад анатомических факторов в клинику классической тригеминальной невралгии рассматривается в исследовании В.А. Балязина и соавт., где применение 3D КТ-ангиографии позволило описать краниоцервикальные особенности, коррелирующие со стороной болевых пароксизмов. Продемонстрировали высокую чувствительность МСРКТ в диагностике нейроваскулярного конфликта и выявили принципиальные различия между нейроваскулярным конфликтом и контактом [1, с. 33–41]. Данные усиливают аргументы в пользу интеграции лучевой диагностики в междисциплинарный консилиум и стандартизации протоколов МРТ/КТ-ангиографии у пациентов с подозрением на нейроваскулярный конфликт.

Вирусная этиология и множественное поражение нервов особенно характерны для реактивации вируса варицелла-зостер. Обзор А.Л. Гусевой, М.В. Замерград

и О.С. Левина по синдрому Рамсея Ханта описывает сочетанное вовлечение лицевого нерва, вестибулярных и кохлеарных структур, нарушение чувствительности в зоне иннервации тройничного нерва [3, с. 151–157], а также подчеркивает необходимость ранней диагностики и начала терапии для улучшения прогноза. При затяжном болевом синдроме и формировании постгерпетической невралгии появляются показания к интервенционным и нейрохирургическим методам. Э.Д. Исагулян и соавт. рассматривают варианты нейрохирургического лечения постгерпетической невралгии, что расширяет поле междисциплинарного взаимодействия с участием специалистов по боли и функциональной нейрохирургии, пациенту может быть показана имплантация системы для хронической нейростимуляции [5, с. 154–157].

Наконец, реабилитационный аспект наглядно отражен в работе Л.Б. Завалий и соавт., посвященной ведению пациентов с нейропатией лицевого нерва при повышенном тоне мышц здоровой стороны лица. Авторы демонстрируют, что на поздних этапах решающее значение имеют методы, направленные на симметризацию мышечного тонуса и профилактику вторичных двигательных нарушений, что требует участия реабилитолога и нередко врача, владеющего инъекционными методиками. Большинство методик ФР направлено на восстановление пораженной стороны. [4, с. 116–122]. Таким образом, литература последних лет поддерживает тезис о том, что клиническая эффективность в лечении краниальных нейропатий определяется согласованностью этапов диагностики, реабилитации и контроля исходов.

На основе проработанного материала разберём пример из медицинской практики, когда диагностика краниальной нейропатии была затруднена, пациентка обращалась к дерматологу, офтальмологу, неврологу. В результате длительной диагностики основного заболевания лечение носило симптоматический характер, и основное заболевание прогрессировало, состояние пациента ухудшилось. При появлении новых симптомов он обращался к разным специалистам, что не способствовало лечению основного заболевания. Сначала обращение к дерматологу было по поводу высыпания между пальцами левой кисти, затем возникли симптомы ОРВИ, в результате отсутствия лечения краниальной нейропатии возникало появление новых симптомов, возникло двоение при взгляде прямо. После длительной диагностики было проведено комплексное лечение.

Приведём пример из клинической практики: пациент М. 13 лет поступил экстренно 30.05.2025 г. в неврологическое отделение РДКБ с жалобами на двоение при взгляде вправо и влево, вниз, опущение правого века.

Анамнез заболевания: 27.02 ребенок обратил внимание на высыпания между пальцами левой кисти, обратились к дерматологу, выставлен диагноз «Простой раздражительный контактный дерматит, причина не уточнена» местно применял мазь «Акридерм» и бальзам «Липобейз», через 3 дня жалобы регрессировали. 12.03–19.03 проходил амбулаторное лечение «Острая инфекция верхних дыхательных путей неуточненная» с фебрильной лихорадкой (подъем температуры до 38,9°C) в течение 3-х дней, заложенность носа, кашель ситуационно дома получал терапию НПВС, Гроприносин 5 дней, Спрей Орал септ 5 дней, Лизобакт 5 дней. В начале апреля возникла сыпь на пальцах ног, за медицинской помощью не обращались, самостоятельно применяли местно мазь «Акридерм» и бальзам «Липобейз», регрессировали жалобы через 4–5 дней. Вечером 13.04 возникло двоение при взгляде прямо. 16.04 обратились амбулаторно к офтальмологу, подобраны очки для коррекции зрения, двоение уменьшилось. 21–22 апреля мать пациента обратила внимание на птоз левого века. 23 апреля повторная консультация офтальмолога, выставлен диагноз «Миопия слабой степени обоих глаз с астигматизмом. Бинокулярная диплопия обоих глаз. Птоз в/в левого глаза», 27.04 консультация невролога амбулаторно, предварительный диагноз: «Поражение центральной нервной системы неуточненное. Дифф. дз: Глазной формой миастении», рекомендовано проведение МРТ головного мозга. МРТ ГМ от 27.04.25 — без очаговой и костно-деструктивной патологии. 30.04.— самостоятельно обратились в приемный покой РДКБ, осмотрен неврологом, госпитализирован экстренно в неврологическое отделение с предварительным диагнозом: Синдром Гиена-Барре краниальная форма, с-м Миллера-Фишера. Диф.диагноз — Миастения.

Анамнез жизни: Ребенок от 1 беременности, протекавшей физиологически, роды 1 в срок, кесарево сечение. Ребенок родился с весом 3600 г, рост 56 см. Из перенесенных заболеваний — ОРВИ, ветряная оспа, острый бронхит, тонзиллит. Профилактические прививки: по возрасту. Аллергический и наследственный анамнез не отягощен. Состоит на учете у окулиста с диагнозом: Сходящиеся косоглазие. Астигматизм.

Неврологический статус на момент поступления: Общее состояние средней степени тяжести. Сознание ясное. Инструкции выполняет, интеллект по возрасту. ЧМН: Лицо симметричное, гипомимично. Зрачки D=S, фотореакции сохранены. Глазные щели D> S. При нагрузочных пробах слабость лобных складок D=S, симптом ресниц «+» с 2-х сторон. Роговичный и реснитчатый рефлексы сохранены. Диплопия при взгляде вправо, влево, вниз. Слабость отведения правого глазного яблока кнаружи. Язык по средней линии. Глотание и фонация не нарушены. Опущение небной занавески, D> S. Снижение глоточного рефлекса. Брюшные рефлексы торпидны. Су-

хожильные и периостальные рефлексы симметричные по оси тела живые D=S. В позе Ромберга устойчив. Мышечная сила 5 баллов. Мышечный тонус достаточный. Патологических стопных и менингеальных знаков нет. Физиологические отправления контролирует.

За время нахождения в стационаре получал терапию:

- в/в кап Магнезии сульфат 25 % 5,0+ физ.р/р 100,0, в конце инфузии фуросемид 1.0; физ.р/р 100,0, +Метилпреднизолон 1000 мг в/в кап 1 р/д с; с 04.06-перевод на таблетированную форму метилпреднизолона (48 мг в сутки)— постепенным снижением дозы каждые 3 дня. Цитиколин 1000мг+физ.р/р 100,0, 1 р/д; Спинолактон 25 мг 1т 3 р/д; Цитофлавин 1т 3 р/д; Витамины группы В (В1, В6) 1.0 в/м через день

Проведенные обследования:

- ОАСМЖ от 30.05.2025: слабосантохромная, прозрачная, белок 0.68 г/л, глюкоза 2.42 ммоль/л, хлориды — 124 ммоль/л цитоз 2 кл (за счет лимфоцитов)
- Исследование ликвора методом ПЦР 30.05.2025 г:

Показатели	Результат
ДНК вируса герпеса I и II типов (HSV I, II)	Не обнаружено
ДНК вируса Эпштейна-Барр (EBV)	Не обнаружено
ДНК цитомегаловируса (CMV)	Не обнаружено
ДНК вируса герпеса 6 типа (HHV6)	Не обнаружено
ДНК Varicella-Zoster virus (VZV)	Не обнаружено
ДНК Parvovirus B19	Не обнаружено
ДНК Toxoplasma gondii	Не обнаружено
ДНК Streptococcus agalactiae	Не обнаружено
ДНК Streptococcus pneumoniae	Не обнаружено
ДНК Haemophyus influenzae	Не обнаружено

- По результатам диагностики воспалительных полиневропатий (АТ к ганглиозидам) от 03.06 у ребенка обнаружены АТ к сульфатиду.
- Исследование крови методом ИФА от 04.06.2025:

Показатели	Уровень	Ед.изм.	Показатели	Уровень	Ед.изм.
Ig G к токсоплазме	0.01	МЕ/мл	Ig G к ЦМВ	4.44	РЕ/мл;
Ig M к токсоплазме	0.26	—	Ig M к ЦМВ	0.26	—

Показатели	Уровень	Ед.изм.	Показатели	Уровень	Ед.изм.
Ig G ВПГ 1тип	0.44		Ig G ВПГ 2тип	0.15	
Ig M к кап АГ ВЭБ	0.19	—	Ig G к ВПГ 1,2 типа		—
Ig G к кап. АГ ВЭБ	13.10	—	Ig M к ВПГ 1,2 типов	0.13	—

- ЭНМГ круговой мышцы глаза от 03.06.2025 — при проведении электронейрографии обнаружены признаки поражения моторных волокон скуловой ветви лицевого нерва (m.orbicularis oculi), с грубым снижением амплитуды М-ответов, повышения терминальной латентности, преимущественно аксонального характера, с вторичной демиелинизацией.

Динамика состояния ребенка на фоне медикаментозной терапии: с 02.06 отмечается улучшение подвижности небной занавески, восстановления глоточного рефлекса. С 04.06 восстановление подвижности лобных складок. С 09.06 — регресс диплопии, птоза век.

17.06.2025 г. ребенок выписан планово из неврологического отделения РДКБ с диагнозом: «Острая воспалительная демиелинизирующая краниальная полинейропатия, вероятнее, аутоиммунного генеза, с вовлечением глазодвигательной и орофарингеальной мускулатуры».

Неврологический статус на момент выписки: Состояние удовлетворительное. Сознание ясное. Инструкции выполняет, интеллект по возрасту. ЧМН: Лицо симметричное, мимика живая. Зрачки D=S, фотореакции сохранены. Глазные щели D=S. При нагрузочных пробах легкая слабость лобных складок D=S. Роговичный и реснитчатый рефлексы сохранены. Нистагма, диплопии, страбизма нет. Язык по средней линии. Глотание и фонация не нарушены. Глоточный рефлекс, D=S, живые. Брюшные рефлексы живые. Сухожильные и периостальные рефлексы симметричные по оси тела живые D=S. В позе Ромберга устойчив. Мышечная сила 5 баллов. Мышечный тонус достаточный. Патологических стопных и менингеальных знаков нет.

В данном примере мы можем наблюдать, что диагностика краниальной нейропатии была затруднена, и было необходимо проведение многопрофильного подхода в диагностике для раннего выявления заболевания и назначения комплексного лечения, что приводит к скорейшему выздоровлению пациента.

Опираясь на анализ отечественных источников и на структуру клинических рекомендаций по краниальным

мононейропатиям у взрослых [6], многопрофильный подход целесообразно представлять как управляемый клинический процесс с тремя уровнями решений: (1) уточнение этиологии и анатомического субстрата, (2) выбор доминирующего клинического синдрома (боль, парез, сенсорный дефицит, смешанный вариант), (3) подбор этапного лечения с заранее заданными точками контроля.

На диагностическом этапе основным является раннее разграничение функциональных и органических причин. Для орофациальной боли практическая модель включает неврологический осмотр с оценкой триггерных зон и соматосенсорного статуса, стоматологический осмотр (исключение одонтогенных источников), офтальмологическую оценку при орбитальных симптомах и, при подозрении на нейроваскулярный конфликт, нейровизуализацию с тонкими срезами в зоне корешкового входа нерва. Данные о взаимосвязи анатомических особенностей основания черепа и клиники классической тригеминальной невралгии поддерживают расширение протокола лучевой диагностики, включая 3D КТ-ангиографию в сложных случаях. МСРКТ включал исследование взаимоотношений верхней мозжечковой артерии и корешка тройничного нерва, положения костей мозгового черепа, а также особенностей краниоцервикального перехода [1, с. 33–41].

Терапевтический уровень решений в многопрофильной модели рационально строить по принципу «этиология — синдром — цель». При классической тригеминальной невралгии цель на раннем этапе сводится к купированию приступов и профилактике хронизации, что обычно достигается фармакотерапией, а при резистентности — интервенционными методами и нейрохирургией. Обзоры по орофациальной боли обосновывают необходимость четкого определения болевого фенотипа, поскольку смешение невралгии, миофасциальной боли и персистирующей идиопатической лицевой боли повышает риск неэффективной терапии. У большинства больных отмечаются различные невротические расстройства [7, с. 5–12]. Многопрофильный консилиум в этих случаях выполняет «анти-ятрогенную» функцию, снижая вероятность неоправданных стоматологических вмешательств и длительного приема анальгетиков без доказательной базы.

При подтвержденном нейроваскулярном конфликте междисциплинарное ведение позволяет синхронизировать нейрохирургические решения с оценкой рисков со стороны других систем. Нейрохирургические публикации демонстрируют, что микроваскулярная декомпрессия обеспечивает высокую вероятность стойкого купирования боли, но спектр транзиторных осложнений может включать дисфункцию других черепных нервов, в том числе нарушение слуха и парезы. Ишемические

нарушения могут возникнуть также вследствие перегиба (кинкинг) артериальных сосудов при их репозиции. [8, с. 50–63]. Поэтому в протоколе многопрофильного ведения целесообразно заранее планировать базовую аудиометрию, оценку вестибулярной функции и осмотр офтальмолога, а после операции — раннюю реабилитацию, направленную на восстановление функций и профилактику вторичных нарушений.

На остром этапе пациент нуждается в неврологической оценке степени пареза, ЛОР-осмотре при подозрении на отогенную причину, офтальмологическом контроле защиты роговицы при лагофтальме, а при нейроинфекции — в инфекционистском сопровождении. Для синдрома Рамсея Ханта характерно сочетанное вовлечение лицевого нерва и вестибулокохлеарных структур, что требует одновременного участия невролога и отоневролога, ранней этиотропной терапии. При проведении МРТ головного мозга у таких пациентов иногда отмечалось накопление контраста не только в лицевом нерве, но и в заднелатеральных областях продолговатого мозга на стороне поражения — в проекции ядра тройничного нерва. [3, с. 151–157]. При переходе в подострую и хроническую фазу возрастают задачи реабилитации и контроля вторичных двигательных феноменов. Результаты реабилитационных исследований показывают, что коррекция повышенного тонуса мышц «здоровой» стороны лица и работа с синкинезиями повышают функциональную симметрию и качество жизни. С целью коррекции высокого тонуса мышц здоровой стороны при НЛН или профилактики его развития используют инъекции ботулинического токсина типа А [4, с. 116–122]. Это расширяет роль реабилитолога и специалистов по ботулинотерапии в командной модели.

Отдельный клинический пласт составляет постгерпетическая невралгия и хроническая нейропатическая боль, когда стандартная фармакотерапия нередко оказывается недостаточной. Нейрохирургические подходы к постгерпетической невралгии, обсуждаемые в отечественной литературе, включают методы нейромодуляции и другие интервенционные стратегии, эффективность высокочастотной стимуляции объясняется десенсибилизацией гиперактивных нейронов широкого динамического диапазона [5, с. 154–157]. В многопрофильной схеме такие пациенты должны попадать в «кабинет боли» с возможностью совместного решения невролога, анестезиолога-алголога и нейрохирурга, при обязательной оценке психологического статуса, сна и функциональной активности, поскольку именно эти домены определяют тяжесть хронической нейропатической боли и ответ на лечение.

С практической точки зрения ожидаемые результаты внедрения многопрофильной модели включают: сокращение времени от первого обращения до верификации

этиологии (за счет единого диагностического маршрута), повышение доли пациентов, получающих адресную этиотропную терапию при вирусных поражениях, рационализацию направления на нейрохирургическое лечение при нейроваскулярном конфликте и улучшение реабилитационных исходов при нейропатии лицевого нерва. Дополнительно, систематизация контроля исходов (шкалы боли, степень пареза, показатели качества жизни) создает основу для локальных регистров и последующих клинико-экономических оценок, что особенно актуально для высокотехнологичных методов лечения. Ядром выступает невролог, который формирует первичный клинический вопрос и определяет потребность в срочной нейровизуализации. Нейрохирург оценивает признаки нейроваскулярной компрессии или объемного процесса в области основания черепа и определяет показания к высокотехнологичным вмешательствам. Оториноларинголог и отоневролог верифицируют отогенные причины, вовлечение вестибулокохлеарного нерва и функциональные последствия (головокружение, шум, снижение слуха), что принципиально для пациентов с сочетанными синдромами, описанными при реактивации VZV. У пациентов с нейропатией лицевого нерва и сопутствующей невралгией тройничного нерва рекомендовано проводить исследование крови [3, с. 151–157]. Офтальмолог обеспечивает профилактику кератопатии при лагофтальме и ведение нейроофтальмологических осложнений, а стоматолог или челюстно-лицевой хирург исключают одонтогенную и височно-нижнечелюстную патологию, часто маскирующуюся под поражение тройничного нерва. МРТ является обязательной частью обследования пациентов с НТН, так как клинические характеристики болевого синдрома не могут исключить вторичный характер невралгии. [7, с. 5–12].

Клиническая эффективность многопрофильного подхода во многом определяется тем, насколько заранее определены критерии перехода между этапами. Для пациентов с тригеминальной невралгией такими критериями могут быть частота и интенсивность пароксизмов, переносимость фармакотерапии и данные МРТ о наличии конфликта. Публикации по нейроваскулярному конфликту показывают, что точное картирование зоны компрессии облегчает планирование операции [2, с. 37–44], а учет анатомических особенностей костей мозгового черепа, краниоцервикальной области, верхних мозжечковых артерий у пациентов с классической невралгией тройничного нерва (кНТН) посредством выполнения мультиспиральной компьютерной ангиографии в режиме 3D [1, с. 33–41] повышает качество предоперационного отбора. Для нейропатии лицевого нерва точками контроля выступают динамика по шкале House–Brackmann, формирование синкинезий, выраженность гипертонии мышц здоровой стороны, степень защиты роговицы. В реабилитационных исследованиях подчер-

кивается, что позднее включение коррекционных программ увеличивает риск устойчивых дискинезий. Врач рекомендовал избегать активных упражнений (ЛФК в максимальной амплитуде движения) [4, с. 116–122].

Предлагаемая рамка контроля исходов включает обязательный «триадный» набор: оценка боли (например, числовая рейтинговая шкала и дневник приступов), оценка функции (шкалы пареза/дисфункции нерва и доменно-специфические тесты, включая аудиометрию или тесты слезопродукции при показаниях) и оценка качества жизни. Такой подход упрощает сравнение результатов между этапами лечения и обеспечивает обоснованность решения о направлении на интервенционную терапию или нейрохирургию. Для хронической невропатической боли после герпетической инфекции дополнительно целесообразно фиксировать сон, тревожность и депрессивные симптомы, поскольку именно коморбидность часто определяет рефрактерность боли и необходимость нейромодуляции. Тем не менее во многих случаях метод нейростимуляции является единственной альтернативой безуспешному консервативному лечению. [5, с. 154–157].

Наконец, немаловажным компонентом многопрофильного подхода становится профилактика. Для пациентов с герпесвирусными краниальными нейропатиями профилактическая стратегия включает повышение настороженности врачей первичного звена к ранним симптомам синдрома Рамсея Ханта и к сочетанному поражению нервов, описанному в отечественных обзорах. Для профилактики инфекции ВВЗ рекомендована вакцинация людей старше 60 лет [3, с. 151–157]. Для пациентов с невроваскулярным конфликтом профилактика рецидивов после лечения связана с рациональной реабилитацией и контролем факторов риска сосудистых нарушений, учитывая данные о технической сложности микроваскулярной декомпрессии при долинхозктазии. На следующий день после операции стандартно всем пациентам делали КТ головы для исключения геморрагических и других осложнений [8, с. 50–63]. В перспективе развитие телемедицинских консультаций и единых электронных протоколов может снизить «фрагментацию» ведения, сохранив при этом междисциплинарный характер решений.

Таким образом, многопрофильный подход в лечении краниальных нейропатий является клинически обусловленной необходимостью, вытекающей из гетерогенности этиологии и пересечения симптомов между неврологией, оториноларингологией, офтальмологией и стоматологией. Актуальные отечественные публикации подтверждают эффективность нейрохирургической коррекции невроваскулярного конфликта при тщательно выполненной диагностике и маршрутизации, но сопряжена с большей сложностью и риском [8, с. 50–63], [2, с. 37–44]. Существуют исследования, показывающие наличие определенных анатомических особенностей основания мозгового черепа у пациентов с КНТН [1, с. 33–41] и подчеркивающие решающую роль реабилитации при поражениях лицевого нерва. Техники ЛФК, направленные на расслабление и растяжение мышц, могут быть предложены в качестве профилактики развития осложнений с первых дней заболевания [4, с. 116–122]. Для вирусных краниальных нейропатий показана критичность раннего начала терапии и согласованного взаимодействия невролога, отоневролога и офтальмолога, полное выздоровление наиболее вероятно при максимально раннем назначении комбинации ГКС и противовирусных средств [3, с. 151–157]. При хронизации боли требуется участие специалистов по лечению боли и, в отдельных случаях, функциональной нейрохирургии; нейростимуляторы можно использовать на одном из первых этапов хирургического лечения больных с нейрогенными болевыми синдромами. [5, с. 154–157]. Предложенная модель этапного междисциплинарного ведения может быть использована как основа для локальных клинических протоколов и регистров исходов, обеспечивая воспроизводимость решений и повышение качества медицинской помощи. Практическая реализуемость модели повышается при наличии стандартизированных чек-листов первичного приема, типовых пакетов исследований (МРТ/КТ-ангиография по показаниям, аудиологический и офтальмологический минимум) и единых критериев направления на консилиум. Такая стандартизация соответствует логике клинических рекомендаций по краниальным мононейропатиям у взрослых [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Балязин В.А., Балязина Е.В., Зыкова О.М., Кравчик К.П., Афанасьева А.В. Топографо-анатомические особенности костей мозгового черепа у пациентов с классической невралгией тройничного нерва // Российский журнал боли. 2025. Т. 23, № 3. С. 33–41. DOI: 10.17116/pain20252303133.
2. Григорян Г.Ю., Усачев Д.Ю. Локализация невроваскулярного конфликта при тригеминальной невралгии // Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко. 2025. Т. 89, № 5. С. 37–44. DOI: 10.17116/neiro20258905137.
3. Гусева А.Л., Замерград М.В., Левин О.С. Синдром Рамсея Ханта // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2020. Т. 120, № 9. С. 151–157. DOI: 10.17116/jnevro2020120091151.
4. Завалий Л.Б., Синкин М.В., Селиверстова Е.Г., Рамазанов Г.Р., Петриков С.С. Реабилитация пациентов с нейропатией лицевого нерва при повышенном тоне мышц здоровой стороны лица // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2024. Т. 124, № 2. С. 116–122. DOI: 10.17116/jnevro2024124021116.

5. Исагулян Э.Д., Семенов Д.Е., Томский А.А. Нейрохирургическое лечение постгерпетической невралгии // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2024. Т. 124, № 2. С. 154–157. DOI: 10.17116/jnevro2024124021154.
6. Клинические рекомендации «Краниальные мононейропатии у взрослых» (одобрены Минздравом России) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_495902/ (дата обращения: 28.02.2026).
7. Максимова М.Ю. Диагностика и лечение орофациальных болевых синдромов // Российский журнал боли. 2023. Т. 21, № 1. С. 5–12. DOI: 10.17116/pain2023210115.
8. Шулев Ю.А., Гордиенко К.С., Трашин А.В., Печиборщ Д.А. Микроваскулярная декомпрессия при тригеминальной невралгии на фоне вертебробазилярной долихоэктазии // Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко. 2020. Т. 84, № 5. С. 50–63. DOI: 10.17116/neiro20208405150.

© Воронова Алина Вадимовна (neurolog85@mail.ru); Воронцова Ольга Дмитриевна (vorontsova-05@yandex.ru);

Шайхутдинов Никита Евгеньевич (nikonikoni231@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ДЕЙСТВИЯ ЦИСПЛАТИНА, СРАВНИТЕЛЬНАЯ ФАРМАКОКИНЕТИКА РЕГИОНАРНОЙ И СИСТЕМНОЙ ДОСТАВКИ ПРЕПАРАТА У ПАЦИЕНТОВ С ОПУХОЛЯМИ ГОЛОВЫ И ШЕИ

MOLECULAR MECHANISMS OF CISPLATIN ACTION, COMPARATIVE PHARMACOKINETICS OF REGIONAL AND SYSTEMIC DRUG DELIVERY IN PATIENTS WITH HEAD AND NECK TUMORS

A. Zagorulko

Summary. Cisplatin is a widely used chemotherapy drug. It is used to treat a variety of human cancers, including bladder cancer, head and neck cancer, lung cancer, ovarian cancer, and testicular cancer. Its mechanism of action is related to its ability to form complexes with the purine bases of DNA (deoxyribonucleic acid), disrupting the DNA repair mechanisms, causing DNA damage, and subsequently triggering the apoptosis of cancer cells. The possible drug resistance and the presence of side effects associated with damage to the renal tubules have led researchers to develop alternative, similar platinum-based anti-cancer drugs. Examples include carboplatin, oxaliplatin, ormaplatin, and enloplatin, but they are generally considered less effective than cisplatin. It is also important to consider the combination of cisplatin with other drugs to overcome drug resistance. This literature review focuses on the physical and chemical properties of cisplatin.

Keywords: cisplatin, mechanisms of action, pharmacokinetics of regional administration for head and neck tumors.

Загорулько Алексей Иванович

кандидат медицинских наук, заведующий отделением,
№2 филиал, Онкоцентр №1

ГКБ имени С.С. Юдина, г. Москва;

врач по рентгенэндоваскулярным диагностике
и лечению, врач сердечно-сосудистый хирург,

ФГАОУ ВО Российский университет дружбы народов
им. Патриса Лумумбы, г. Москва

alexrus80@yandex.ru

Аннотация. Цисплатин — широко распространенный химиотерапевтический препарат. Он используется для лечения множества видов рака у человека, включая рак мочевого пузыря, головы и шеи, лёгких, яичников и яичек. Механизм его действия связан со способностью образовывать соединения с пуриновыми основаниями ДНК (дезоксирибонуклеиновая кислота), нарушая механизмы репарации ДНК, происходит её повреждение и далее запускается апоптоз раковых клеток. Возможная лекарственная устойчивость и наличие побочных эффектов, связанных с повреждением почечных канальцев, вынудили исследователей разрабатывать альтернативные, аналогичные противораковые препараты, содержащие платину. Таким примером является карбоплатин, оксалиплатин, ормаплатин, энлоплатин, однако их действие признано менее эффективным, чем цисплатин. Также важно помнить о комбинированной терапии цисплатина с другими препаратами для преодоления лекарственной резистентности. В этом литературном обзоре повествуется о физико-химических свойствах цисплатина и родственных препаратах, а также его применение (как в качестве монотерапии, так и в комбинации с другими лекарствами) для лечения различных видов рака у человека.

Особое внимание уделяется молекулярным механизмам действия цисплатина, а также сравнение фармакокинетики при региональном (суперселективным) и внутривенном (системном) воздействии на плоскоклеточный рак орофарингеальной зоны.

Ключевые слова: цисплатин, механизмы действия, фармакокинетика регионального введения на опухоли головы и шеи.

Введение

Цисплатин или цис-дихлордихлорплатина представляет собой химическое (платиновое) соединение с квадратной геометрией. При комнатной температуре это белый или тёмно-жёлтый кристаллический порошок. Он слабо растворяется в воде и хорошо в растворах диметилприманида и N,N-диметилформамида. Цисплатин стабилен при нормальных температуре

и давлении, но может медленно превращаться с течением времени в транс-изомер [1,2], он имеет молекулярную массу 301,1 г/моль, плотность 3,74 г/см³, температуру плавления 270 °С, растворимость в воде 2,53 г/л при 25 °С.

Цисплатин синтезирован М. Пейроном в 1844 году, а его химическая структура была впервые объяснена Альфредом Вернером в 1893 году. Однако это соедине-

ние не получило научных исследований до 1960-х годов. Первоначальные наблюдения Розенберга в Мичиганском государственном университете указали на то, что некоторые продукты электролиза платиновых сетчатых электродов способны ингибировать деление клеток *Escherichia coli*, что вызвало значительный интерес к возможному использованию этих продуктов в химиотерапии рака [3]. С этого момента большое внимание проявляется к использованию комплексов платины, палладия и других благородных металлов для лечения опухолей. В 1960-х годах были обнаружены его цитотоксические свойства, и к концу 1970-х годов он занял место ключевого препарата в системном лечении раковых клеток. Среди многих химиотерапевтических препаратов, которые широко используются для лечения рака, цисплатин является одним из самых убедительных. Он был первым соединением платины, одобренным FDA (Food and Drug Administration, агентство Министерства здравоохранения и социальных служб США) для лечения рака в 1978 году [4].

Клинически доказано, что цисплатин хорошо борется с различными типами рака. Надо отметить, что современная химиотерапия различных опухолей в комбинации нескольких препаратов возможна также и внутриаириальным введением цисплатина. Например, широко известная схема лечения опухолей головы и шеи (цисплатин + доцетаксел + 5фторурацил) подразумевает внутривенное и внутриаириальное введение препаратов.

С молекулярной точки зрения цисплатин представляет собой прекрасный пример того, как небольшое изменение химической структуры может существенно повлиять на биологическую активность в клетке-мишени. Цисплатин, карбоплатин и оксалиплатин состоят из двухзарядного иона платины, окруженного четырьмя лигандами. Аминолиганды образуют более сильные взаимодействия с ионом платины, а хлоридные лиганды или карбоксилатные соединения образуют уходящие группы, позволяющие иону платины связываться с основаниями ДНК [5].

Карбоплатин или цис-диаммин(1,1-циклобутанкарбоксилат) платина является химиотерапевтическим препаратом, используемым при раке яичников, легких, головы и шеи. С точки зрения своей структуры карбоплатин отличается от цисплатина тем, что имеет бидентатный дикарбоксилатный лиганд вместо двух хлоридных лигандов, которые являются уходящими группами в цисплатине. Он проявляет низкую реактивность и медленную кинетику связывания ДНК, хотя он образует те же продукты реакции *in vitro* в эквивалентных дозах с цисплатином. Некоторые исследования показывают, что цисплатин и карбоплатин вызывают разные морфологические изменения в линиях клеток, проявляя при

этом свое цитотоксическое поведение [6]. Сниженная реактивность ограничивает образование комплексов белок-карбоплатин, которые выводятся из организма. Низкая скорость выведения карбоплатина означает, что он дольше задерживается в организме, и, следовательно, его действие более продолжительно (период полувыведения карбоплатина составляет 30 часов, а у цисплатина 1,5–3,6 ч.). Преимуществом карбоплатина является снижение нефротоксического действия. Главным недостатком карбоплатина является его миелосупрессивное действие, приводящее к значительному снижению продукции кровяных клеток и тромбоцитов в костном мозге, иногда до 10 % от обычного уровня [7]. Карбоплатин менее эффективен, чем цисплатин, он может быть эффективен лишь на 1/8–1/45. Клинический стандарт дозирования карбоплатина обычно составляет 4:1 по сравнению с цисплатином, а именно, доза, которая определена для цисплатина, требуется в четыре раза больше карбоплатина чтобы достичь одинаковую эффективность. Стабильность карбоплатина и его инертность позволяет проходить через весь организм человека, до 90 % введенного карбоплатина может быть обнаружено в моче [8].

Молекулярные механизмы фармакологии цисплатина

Известно несколько мембранных транспортеров соединений платины. Цисплатин активируется после попадания в клетку. В цитоплазме атомы хлора цисплатина замещаются молекулами воды. Этот гидролизированный продукт является мощным электрофилом, способным реагировать с любым нуклеофилом, включая сульфгидрильные группы белков и атомы доноров азота нуклеиновых кислот. Цисплатин связывается с реактивным центром N7 на остатках пурина и вызывает повреждение (ДНК) в раковых клетках, блокирует клеточное деление и приводит к апоптотической гибели клеток. 1,2-внутрицепочечные сшивки пуриновых оснований с цисплатином являются наиболее заметными среди изменений в ДНК. К ним относятся 1,2-внутрицепочечные d (Gp G)-аддукты и 1,2-внутрицепочечные d (Ap G)-аддукты, составляющие около 90 % и 10 % аддуктов соответственно. Имеются данные, что 1,3-внутрицепочечные аддукты d (GpXpG) и другие аддукты, такие как межцепочечные сшивки и нефункциональные аддукты, способствуют токсичности цисплатина. Таким образом, опубликованные исследования указали на ДНК, как на критическую мишень цитотоксичности цисплатина, наиболее показательным доказательством является гиперчувствительность к цисплатину как прокариотических, так и эукариотических клеток с дефицитом репарации ДНК [9–10]. Эти несколько молекулярных механизмов цисплатина, приводящих к апоптозу, были вовлечены в лечение рака у человека.

Апоптоз клеток вызываемый цисплатином

Апоптоз — это контролируемый тип клеточной смерти, зависящий от энергии и приводящий к уменьшению клетки, конденсации хроматина, почкованию мембраны, экстернализации фосфатидилсерина и активации семейства цистеиновых протеаз, называемых каспазами [11]. Активация каспаз является ключевым шагом в начале апоптоза, и несколько стимулов активируют каспазы, включая те, которые активируют рецепторы смерти плазматической мембраны (каспаза 8) и вызывают дисфункцию митохондрий (каспаза 9). Каспазы являются либо инициаторами, либо исполнителями апоптоза. Инициаторные каспазы включают каспазы 8 и 9, и активация этих каспаз приводит к активации нижестоящих или исполнительных каспаз, таких как каспазы 3 и 7 [12]. Каспазы-киллеры отвечают за многие биохимические характеристики апоптоза, включая расщепление и активацию поли (АДФ-рибозо)полимеразы и ингибитора белка домена активатора каспазы, что приводит к фрагментации ДНК.

Цисплатин в первую очередь индуцирует гибель клеток путем апоптоза, а дефект в апоптотической сигнализации также может обуславливать резистентность к цисплатину. Существует два основных пути апоптотической гибели клеток [13,14]. Внешний путь инициируется, когда лиганды связываются с суперсемейством рецепторов фактора некроза опухоли-α (TNFα), за которым следует олигомеризация и рекрутирование прокаспазы-8 через адаптерные молекулы для формирования сигнального комплекса, индуцирующего клеточную гибель. Внутренний путь инициируется клеточным стрессом, таким как повреждение ДНК, что приводит к высвобождению цитохрома-С из митохондрий, вызывая активацию прокаспазы-9 посредством взаимодействия с фактором активации, способствующим апоптозу-1 и образования активного комплекса апоптосомы. Белки семейства Bcl-2 регулируют апоптоз, вызванный повреждением ДНК, регулируя высвобождение митохондриального цитохрома-С в ответ на повреждение ДНК. Генотоксический стресс, вызванный цисплатином, активирует множественные пути передачи сигналов, что может способствовать апоптозу или развитию резистентности к химиотерапии.

Мутации вызываются несколькими сигналами, связанными со стрессом. Повреждение ДНК приводит к активации контрольных точек клеточного цикла, это задерживает клеточный цикл и приводит либо к восстановлению, либо к необратимому уничтожению клеток, вызывая их гибель. Реакция клеток на повреждение ДНК, вызванное цисплатином, определяет судьбу клетки — жить или умереть [15].

Повреждение белка p53 связано с повреждением ДНК и происходит в ответ на лечение цисплатином.

p53 — это короткоживущий белок, который активируется (фосфорилируется) мутировавшей ataxia telangiectasia (ATM) по сигналу повреждения ДНК. Активированный p53 теперь, в свою очередь, активирует Mdm2, который является E3 убиквитинлигазой. p53 может трансаktivировать гены, участвующие в прогрессии клеточного цикла, репарации ДНК и апоптозе. p53 может регулировать гибель клеток, вызванную цисплатином, несколькими механизмами, такими как: деградация fllice-like ингибиторного белка (FLIP), прямое связывание и противодействие антиапоптотической функции В-клеточной лимфомы-экстра-большой (Bcl -xL), повышенная экспрессия фосфатазы и гомолога тензина (PTEN) и ингибирование AMPK [15].

Токсикологические эффекты цисплатина

Лечение цисплатином связано с рядом токсических побочных эффектов, включая нефротоксичность, гепатотоксичность и кардиотоксичность. Во отчетах о случаях заболевания сообщалось о многочисленных сердечно-сосудистых событиях, включая изменения электрокардиограммы, аритмии, миокардит, кардиомиопатию и застойную сердечную недостаточность. Снижение активности антиоксидантной защитной системы, происходит из-за окислительного стресса, вызванного образованием активных форм кислорода, включая антиоксидантные ферменты и неферментативные молекулы, а также восстановленный глутатион, что является одним из основных изменений притоксичности цисплатина [16].

Утечка лактатдегидрогеназы (ЛДГ) и креатинкиназы (КК) из кардиомиоцитов, обусловленная кардиотоксичностью, может быть вторичным явлением после вызванного цисплатином перекисного окисления липидов сердечных мембран. Дегенерация и некроз клеток сердечных мышечных волокон с фиброзной тканевой реакцией и вакуолизацией цитоплазмы многих мышечных клеток, а также наполнение кровеносных сосудов кровью являются гистологическими изменениями, вызванными цисплатином [17].

Высокие дозы цисплатина могут привести к гепатотоксичности. Окислительный стресс является основной причиной токсичности, вызванной цисплатином, вследствие истощения восстановленного глутатиона. Во многих исследованиях сообщалось о значительном повышении уровня малонового альдегида в печени и снижении уровня антиоксидантных ферментов у крыс. Наиболее чувствительными биомаркерами, непосредственно связанными с повреждением клеток и токсичностью, являются трансаминазы, поскольку они локализованы в цитоплазме и высвобождаются в кровоток после повреждения клеток. Повышение уровня печеночных ферментов в сыворотке крови и билирубина является показателем нарушения функции печени. Было показано

но, что гепатотоксичность цисплатина усугубляется повышенной экспрессией фермента цитохрома P450-2E1. Наблюдаемые гистопатологические изменения будут включать некроз и дегенерацию гепатоцитов с инфильтрацией воспалительных клеток вокруг портальной области и расширением синусоидов [16]. В последних исследованиях основное внимание уделяется методам защиты от гепатотоксичности, вызванной цисплатином, с использованием различных агентов, таких как селен и витамин Е.

Почки накапливают цисплатин в большей степени, чем другие органы, и являются основным путем его выведения. Концентрация цисплатина в эпителиальных клетках проксимальных канальцев примерно в 5 раз выше, чем в сыворотке крови. Непропорциональное накопление цисплатина в почечной ткани способствует цисплатин-индуцированной нефротоксичности. Биосинтез аминокислот лизина и метионина приводит к образованию четвертичного аммониевого соединения, называемого карнитином, который необходим для транспорта жирных кислот из цитозоля в митохондрии во время расщепления липидов для генерации метаболической энергии. Повреждение почек вызвано ингибированием синтеза карнитина, а также реабсорбцией карнитина проксимальными канальцами нефрона, что обусловлено снижением его выработки. Цисплатин выводится почками как путем клубочковой фильтрации, так и путем канальцевой. Концентрации цисплатина в почках превышают его концентрации в крови, что указывает на активное накопление препарата паренхиматозными клетками почек. В последние годы исследования выявили два различных мембранных транспортера, способных транспортировать цисплатин в клетки. Позже цисплатин биотрансформируется в почках в конъюгаты цистеинилглицина и другие соединения с высоким содержанием тиолов с помощью некоторых локализованных ферментов.

Также имеются данные о других видах токсического воздействия цисплатина на органы, таких как ототоксичность, гастротоксичность, миелосупрессия, аллергические реакции и некоторые репродуктивные токсические эффекты [18].

Витамин D и его аналоги регулируют экспрессию генов, связываясь со специфическими рецепторами витамина D. После активации лиганда и димеризации с рецептором ретиноида X гетеродимеры связываются со специфическими нуклеотидными последовательностями, элементами ответа на витамин D, в целевых генах, активируя или подавляя их экспрессию. Ряд целевых генов витамина D был идентифицирован в нескольких типах опухолевых клеток: p21, E-кадгерин, c-Jun N-концевая киназа (JNK), онкоген c-Myc, семейство инсулиноподобных трансформирующих факторов роста и их рецепто-

ры. Цисплатин используется в сочетании с витамином D для лечения плоскоклеточного рака и рака толстой кишки [19,20]. Опубликованные исследования показали, что предварительная обработка клеток человеческой промиелоцитарной лейкемии (HL-60) в течение 72 часов кальцитриолом или его новыми аналогами значительно усиливала их чувствительность к антипролиферативному эффекту *in vitro* цисплатина, доксорубина или генистеина. Более того, для всех протестированных цитотоксических агентов наблюдался синергический антипролиферативный эффект. Этот эффект выражался в значительном снижении значений ID50 (ингибирующая доза 50 %) для каждого применяемого цитотоксического агента после предварительной обработки клеток HL-60 кальцитриолом или его аналогами.

Физико-математическое обоснование преимуществ внутриартериального применения лекарственного препарата

Нормальная физиология кровообращения человеческого организма устроена таким образом, что в его основе лежат два круга кровообращения. Большой круг кровообращения несет от сердца артериальную, обогащенную кислородом кровь к органам и тканям всего организма, где через микроциркуляторное русло происходит обмен веществ. Движение крови в нем обеспечивает сердце, как биологический насос, а именно левый желудочек. К сердцу от органов и тканей возвращается венозная кровь, обедненная кислородом. Движение крови в малом круге кровообращения обеспечивает правый желудочек. Количество крови, находящейся в артериальных и венозных сосудах всего организма, называется объемом циркулирующей крови (ОЦК). ОЦК измеряется в литрах (л) и приблизительно равно 1/13 веса человека. Движение крови по сосудам осуществляется непрерывно. Скорость движения крови зависит от многих факторов, но в основном от давления, которое создает левый желудочек, в норме 120–140 мм.рт.ст.

Итак, если представить макет пациента с опухолью языка и проанализировать математически концентрацию препарата в опухоли и временной интервал, введенного внутривенно и внутриартериально, то будет понятно почему в клинической практике получается разный результат.

Макет 1, внутривенное введение. Лекарственный препарат в дозе 120 мг вводим в кубитальную вену или верхнюю полую вену, то с током крови он попадает в малый круг кровообращения, где дополнительно разбавляется объемом крови после чего выбрасывается левым желудочком в аорту и только потом попадает в сосуды опухоли. Время введения препарата 30 минут. Период полувыведения цисплатина составляет 1,5–3,6 ч. Исходная системная концентрация = $120 \text{ мг} / 6.5 \text{ L} = 18 \text{ мкг/л}$

mL (в целом ОЦК). Опухоль получит только — 5 % артериального кровотока (область головы/шеи = 250–300 из 5000 mL/min — объем кровотока в язычной артерии). 70 % экстракция в первый проход лекарственного препарата. Итого в концентрации цисплатина в опухоли языка будет: $18 \times 0.05 \times 0.7 = 0.63 \mu\text{g/mL} \approx 0.5\text{--}1.5 \mu\text{g/mL}$. Временная динамика: $t = 0\text{--}30$ с.: транзит через ВПВ, разбавление в системе; $t = 30\text{--}60$ с.: прохождение через лёгкие (дополнительное разбавление); $t = 60\text{--}120$ с.: достижение опухоли в системной циркуляции (уже сильно разбавлено); $t = 120+$ с.: постепенное снижение (нет re-entry циклов!). [21–25].

Макет 2, внутриартериальное введение. Лекарственный препарат в дозе 120 мг вводим в язычную артерию. Время введения 30 минут. Скорость инфузии = $120 \text{ мг} / 30 \text{ мин} = 4 \text{ мг/мин}$. Кровоток язычной артерии $\approx 75 \text{ mL/min}$ (средний показатель). Артериальная концентрация = $4 / 75 = 53 \mu\text{g/mL}$. Такое количество препарата цисплатин попадает в опухоль. В опухолевых капиллярах (с поглощением): $50\text{--}95 \mu\text{g/mL}$. Это в 73 РАЗА выше, чем в/в доставка! Временная динамика: $t = 0\text{--}5$ сек: прибытие в опухоль из питающей артерии. $t = 5\text{--}15$ сек: пиковая концентрация ($95\text{--}100 \mu\text{g/mL}$) — терапевтическое окно. $t = 15\text{--}30$ сек: венозный отток, снижение. $t = 60\text{--}75$ сек: RE-ENTRY цикл ($35 \mu\text{g/mL}$). $t = 120+$ сек: дополнительные циклы. Можно сделать вывод, что внутриартериальное введение достигает терапевтических концентраций (выше порога $10 \mu\text{g/mL}$) [21–25].

Отдельного обсуждения затрагивает системное введение цисплатина при раке легких, где основное крово-

снабжение осуществляется через легочный ствол, куда, собственно, и попадает сразу лекарственное вещество из верхней полой вены. Этим и обосновывается положительное лечение данного вида опухоли.

Обсуждение

Цисплатин является одним из наиболее эффективных противораковых средств, широко используемых при лечении солидных опухолей. В целом, цисплатин и другие соединения на основе платины считаются цитотоксическими препаратами, которые убивают раковые клетки путем повреждения ДНК, ингибирования синтеза ДНК и митоза, а также индукции апоптотической гибели клеток. Несколько молекулярных механизмов действия включают индукцию окислительного стресса, характеризующегося продукцией активных форм кислорода и перекисным окислением липидов, индукцию сигнализации p53 и остановку клеточного цикла, снижение активности протоонкогенов и антиапоптотических белков, а также активацию как внутренних, так и внешних путей апоптоза. Однако химиотерапия цисплатином также связана со значительными побочными эффектами, которые включают гепатотоксическое, нефротоксическое, кардиотоксическое, нейротоксическое и/или гематотоксическое повреждение. Кроме того, у некоторых пациентов может развиваться рецидив после лечения цисплатином, поскольку их опухоли рефрактерны к цисплатину. Поэтому комбинированная терапия цисплатином с другими препаратами является распространённой практикой при лечении онкологических заболеваний у человека. Результаты ряда исследований свидетельствуют о том, что сочетание других препаратов с цисплатином представляет собой наилучший терапевтический подход для преодоления лекарственной резистентности и снижения нежелательных побочных эффектов. В перспективе комбинированные стратегии, направленные на несколько механизмов, таких как снижение поглощения цисплатина и уменьшение воспаления, могут обеспечить наилучшие возможности для клинически значимой профилактики.

Физико-математическим обоснованием концентрации препаратов в опухоли исследователи давно занимались. Yokoуama с соавторами (1999 г.) доказали быстрый пик концентрации при внутриартериальном селективном введении цисплатина. Проводили прямое измерение платины в опухолевой ткани. Kovács A. с соавторами (2004 г.) опубликовал «классический труд» где показал 5-ти летнюю выживаемость исследованных пациентов (77 %) с раком ротоглотки [21]. Miyake M. и соавторы (2015 г.) вывели формулу зависимости дозы от клиренса, которая может быть использована для точного прогнозирования оптимальной дозы неадаплатина при внутриартериальном введении [22]. Akihiro Homma (2017 г.) с соавторами провели исследование по подбору

Таблица 1.

Сравнение параметров ВАХТ и в/в введения цисплатина

Параметр	Внутриартериально (суперселективно)	Внутривенно (любое место)	Преимущество ВАХТ
Концентрация в опухоли	50–100 $\mu\text{g/mL}$	0.5–1.5 $\mu\text{g/mL}$	50–100×
Время доставки	5–15 сек	60–120 сек	12–24× быстрее
Статус	Терапевтическая ✓	Субтерапевтическая ✗	Работает vs Не работает
Локальный контроль	93 %	25 %	3.7× лучше
Облегчение боли	100 % (часы)	30 % (дни)	3.3× лучше
Выживаемость	77 % (5-летняя)	20 % (2-летняя)	3.8× лучше
Нефротоксичность	5 % (с антидотом)	45 %	9× безопаснее

дозы и подтверждению эффективности суперселективного внутриартериального введения цисплатина и сопутствующей лучевой терапии при местнораспространенном раке верхнечелюстной пазухи [23]. Federico C. с соавторами в (2020 г.) доказал, что локальная доставка платины и ее концентрация в ткани опухоли составила 3896 ng Pt/g ткани, а внутривенная всего лишь 53 ng Pt/g ткани. Одновременно с этим концентрация на 80 % ниже в крови и 60 % ниже в почках [24]. Vogl T.J., и соавторы (2025г.) в своем исследовании показали, что после внутриартериального применения цисплатина средняя выживаемость — 12,6 месяцев и составила 93 % и это доказывает эффективность современного метода лечения [25]. Загорулько А.И. и соавторы (2024 г.) представили клиническое наблюдение, которое демонстрирует, что внутриартериальная химиоэмболизация в лечении конкретного ЗНГШ явилась методом, который позволил минимизировать частоту нежелательных побочных эффектов химиотерапии, создать благоприятные условия для последующего выполнения радикальных хирургических вмешательств [26]. Lindsay J. Nitsche и соавторы. (2025 г.) в своем исследовании проводил фармакокинетические измерения и доказали на 51 % преимущества локальной доставки над системным введением в любом органе, где возникла опухоль [27]. В статье Загорулько А.И. и соавторы (2025 г.) представлено клиническое наблюдение, где в выводах отмечено, что суперселективная внутриартериальная химиоинфузия цисплатина при плоскоклеточном раке верхнечелюстной пазухи, является перспективным методом лечения, показавшая себя безопасной и эффективной [28]. В 2026 году Загорулько А.И. и соавторы опубликовали данные анализа долгосрочной выживаемости в открытом проспективном исследовании по селективной внутриартериальной химиотерапии при местно-распространенном неоперабельном раке головы и шеи. В исследование включено 56 пациентов с 3-летним периодом наблюдения, где отмечена 58,9 % общая выживаемость, полученные результаты соответствуют мировым стандартам и указывают на потенциал комбинированных подходов. В заключении авторы отмечают, что «Селективная ВАХТ должна рассматриваться как стандартный лечебный подход в специализированных учреждениях, располагающих необходимым оборудованием и опытом» [29].

В 2025 году Онкоцентре №1 ГКБ им С.С. Юдина г. Москва утверждено и одобрено локальным этическим комитетом (выписка из протокола №7 от 30.04.2025 г.) исследование под названием «Нерандомизированное исследование II фазы по оценке эффективности и токсичности

внутриартериальной химиотерапии в лечении неоперабельных местно-распространенных плоскоклеточных карцином головы и шеи». На момент публикации статьи анализу и кратковременному наблюдению подверглись 1/2 включенных пациентов, набор в группы продолжается. Всем пациентам проводили внутриартериальное введение расчетных доз цисплатина по схеме DCF, другие компоненты схемы вводились внутривенно. У некоторых пациентов после окончания введения цисплатина забирали кровь из кубитальной вены и отдавали в лабораторию на исследование количественного анализа платины, методом масспектрологии. Средняя введенная доза в/артериально составляла 120–150 мг, примечательно, что измерения периферической крови составили от 4,5 до 6,2 мг платины. Можно предположить, что значительная часть платины поглощается тканями опухоли, поскольку инактиватор натрия тиосульфата не применялся. Промежуточные результаты этого исследования были доложены на «Научно-практической конференции с международным участием. ЗНО органов головы и шеи: долголетие и качество жизни больных» г. Москва 11.04.2026 года, а также XV Съезде онкологов и радиологов стран СНГ и Евразии, г. Минск, Республика Беларусь 22.04.2026. Надо отметить, что промежуточные результаты этого исследования вызвали немалый интерес у экспертного сообщества.

Заключение

Итак, препараты платины, посредством повреждения ДНК опухолевой клетки, оказывают хороший клинический эффект при лечении различных видов рака. Использование многокомпонентных схем усиливают лечебный эффект, но при этом значительно угнетают кроветворные, мочевыделительные органы, клетки печени. Как показано выше в статье, добавление к лечению витамина Д улучшают результаты лечения. Математические расчеты показывают, что региональная доставка препарата создает наибольшую концентрацию препарата в клетках опухоли, по сравнению с системной, а целью любой химиотерапии является воздействие на опухоль. В статье приведены ссылки на международных и отечественных авторов, интересующихся данным вопросом лечения рака. Необходимо создание единой информационной базы в Российской Федерации, пациентов и эндovasкулярных специалистов, занимающихся ВАХТ опухолей головы и шеи, для анализа большой выборки больных и выработки единой стандартизации подхода в лечебных мероприятиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Akron The Chemical Database. [3/25/14]; The Department of Chemistry at the University of Akron. 2009 <http://ull.chemistry.uakron.edu/erd> and search on CAS number.
2. IARC. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans. Vol. 26. International Agency for Research on Cancer; Lyon, France: 1981. Cisplatin. In Some Antineoplastic and Immunosuppressive Agents. pp. 151–164.
3. Rosenberg B., vanCamp I., Krigas T. Inhibition of cell division in *Escherichia coli* by electrolysis products from a platinum electrode. *Nature*. 1965; 205:698–699. doi: 10.1038/205698a0.
4. Kelland L. The resurgence of platinum-based cancer chemotherapy. *Nat. Rev. Cancer*. 2007; 7:573–584. doi: 10.1038/nrc2167.
5. Goodsell D.S. The molecular perspective: Cisplatin. *Stem Cells*. 2006; 24:514–515. doi: 10.1634/stemcells.2006-CSC2.
6. Natarajan G., Malathi R., Holler E. Increased DNA-binding activity of cis-1,1'-cyclobutanedicarboxylatodiammineplatinum (II) (carboplatin) in the presence of nucleophiles and human breast cancer MCF-7 cell cytoplasmic extracts: activation theory revisited. *Biochem. Pharmacol.* 1999; 58:1625–1629. doi: 10.1016/S0006-2952(99)00250-6.
7. Canetta R., Rozencweig M., Carter S.K. Carboplatin: the clinical spectrum to date. *Cancer Treat. Rev.* 1985; 12(Suppl A):125–136. doi: 10.1016/0305-7372(85)90027-1.
8. Go R.S., Adjei A.A. Review of the comparative pharmacology and clinical activity of cisplatin and carboplatin. *J. Clin. Oncol.* 1999; 17:409–422. doi: 10.1200/JCO.1999.17.1.409.
9. Beck D.J., Brubaker R.R. Effect of cis-platinum (II) diamminodichloride on wild type and deoxyribonucleic acid repair deficient mutants of *Escherichia coli*. *J. Bacteriol.* 1973; 116:1247–1252. doi: 10.1128/jb.116.3.1247-1252.1973.
10. Fraval H.N., Rawlings C.J., Roberts J.J. Increased sensitivity of UV-repair-deficient human cells to DNA bound platinum products which unlike thymine dimers are not recognized by an endonuclease extracted from *Micrococcus luteus*. *Mutat. Res.* 1978; 51:121–132. doi: 10.1016/0027-5107(78)90014-3.
11. Salvesen G.S., Dixit V.M. Caspases: intracellular signaling by proteolysis. *Cell*. 1997; 91:443–446. doi: 10.1016/S0092-8674(00)80430-4.
12. Salvesen G.S., Abrams J.M. Caspase activation — stepping on the gas or releasing the brakes? Lessons from humans and flies. *Oncogene*. 2004; 23:2774–2784. doi: 10.1038/sj.onc.1207522.
13. Nunez G., Benedict M.A., Hu Y., Inohara N. Caspases: the proteases of the apoptotic pathway. *Oncogene*. 1998; 17:3237–3245. doi: 10.1038/sj.onc.1202581.
14. Kischkel F.C., Hellbardt S., Behrmann I., Germer M., Pawlita M., Krammer P.H., Peter M.E. Cytotoxicity-dependent APO-1 (Fas/CD95)-associated proteins form a death-inducing signaling complex (DISC) with the receptor. *EMBO J.* 1995; 14:5579–5588. doi: 10.1002/j.1460-2075.1995.tb00245.x.
15. Basu A., Krishnamurthy S. Cellular responses to Cisplatin-induced DNA damage. *J. Nucleic Acids* 2010. 2010 doi: 10.4061/2010/201367.
16. Kart A., Cigremis Y., Karaman M., Ozen H. Caffeic acid phenethyl ester (CAPE) ameliorates cisplatin-induced hepatotoxicity in rabbit. *Exp. Toxicol. Pathol.* 2010; 62:45–52. doi: 10.1016/j.etp.2009.02.066.
17. Al-Majed A.A., Sayed-Ahmed M.M., Al-Yahya A.A., Aleisa A.M., Al-Rejaie S.S., Al-Shabanah O.A. Propionyl-L-carnitine prevents the progression of cisplatin-induced cardiomyopathy in a carnitine-depleted rat model. *Pharmacol. Res.* 2006; 53:278–286. doi: 10.1016/j.phrs.2005.12.005.
18. Hartmann J.T., Lipp H.P. Toxicity of platinum compounds. *Expert Opin. Pharmacother.* 2003; 4:889–901. doi: 10.1517/14656566.4.6.889.
19. Light B.W., Yu W.D., McElwain M.C., Russell D.M., Trump D.L., Johnson C.S. Potentiation of cisplatin antitumor activity using a vitamin D analogue in a murine squamous cell carcinoma model system. *Cancer Res.* 1997; 57:3759–3764.
20. Milczarek M., Rosinska S., Psurski M., Maciejewska M., Kutner A., Wietrzyk J. Combined colonic cancer treatment with vitamin D analogs and irinotecan or oxaliplatin. *Anticancer Res.* 2013; 33:433–444.
21. Kovács A. Intra-arterial induction high-dose chemotherapy with cisplatin for oral and oropharyngeal cancer: long-term results. *Br J Cancer* 90, 1323–1328 (2004). <https://doi.org/10.1038/sj.bjc.6601674>.
22. Miyake M., Ohbayashi Y., Iwasaki A. et al. Superselective Intra-arterial Infusion Chemotherapy with Nedaplatin for Oral Cancer: A Pharmacological Study of the Dose Clearance. *J. Maxillofac. Oral Surg.* 14, 616–623 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12663-014-0730-9>.
23. Homma A., Onimaru R., Matsuura K., et al. Dose-finding and efficacy confirmation trial of the superselective intra-arterial infusion of cisplatin and concomitant radiotherapy for locally advanced maxillary sinus cancer (Japan Clinical Oncology Group 1212): Dose-finding phase. *Head & Neck*. 2017; 00:000–000. <https://doi.org/10.1002/hed.25001>.
24. Federico C., Sun J., Muz B., Alhallak K., Cospers P.F., Muhammad N., Jeske A., Hinger A., Markovina S., Grigsby P., Schwarz J.K., Azab A.K., Localized Delivery of Cisplatin to Cervical Cancer Improves Its Therapeutic Efficacy and Minimizes Its Side-Effect Profile, *International Journal of Radiation Oncology • Biology • Physics* (2020), doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2020.11.052>.
25. Vogl T.J., Tröger A., Bernatz S. et al. Efficacy and safety of transarterial chemoperfusion for head and neck malignancies. *Radiol med* 130, 1254–1262 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11547-025-02039-2>.
26. Загоруйко А.И., Черняев М.В., Козлов Д.В., Голубцов А.К. Лечение плоскоклеточного рака головы и шеи с помощью суперселективной внутриартериальной химиоинфузии. Клинический отчет. Лабораторная и клиническая медицина. Фармация. 2024; 4(1):25–33. (На рус.). DOI: 10.14489/lcmp.2024.01.pp.025–033.
27. Lindsay J. Nitsche, B.S., a Leslie Curtin, DVM, b Sandra Sexton, DVM, b Thaeir Khoury, M.D., c Joshua D. Prey, M.S., d Sai Yendamuri, M.D., and Todd L. Demmy, MDa. Preclinical experience with cisplatin, gemcitabine, and doxorubicin in pulmonary suffusion. <https://doi.org/10.1016/j.xjon.2024.12.012>.
28. Загоруйко А.И., Нистратов Г.П. Внутриартериальное введение цисплатина у пациентов с распространенной карциномой верхнечелюстной пазухи. Эффективность и безопасность // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. — 2025. — №10/2. — С. 87–93 DOI 10.37882/2223-2966.2025.10-2.07.
29. Загоруйко А.И., Черняев М.В. Селективная внутриартериальная химиотерапия при местно-распространенном неоперабельном раке головы и шеи: анализ долгосрочной выживаемости в открытом проспективном исследовании. // Наука и инновации в медицине. 2026; 11(1):38–44. DOI: <https://doi.org/10.35693/SIM696031>.

© Загоруйко Алексей Иванович (alexrus80@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МЕЛАТОНИН И РЕПРОДУКТИВНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ: ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫЙ ПОДХОД В ПРОГРАММАХ ЭКО

MELATONIN AND REPRODUCTIVE POTENTIAL: A PERSONALIZED APPROACH IN IVF PROGRAMS

A. Ichmelyan
A. Bogdasarov
L. Davidyan
R. Bogdasarova
D. Oleynikova

Summary. Age-related decline in fertility is associated with oxidative stress and disruption of circadian regulation of oogenesis. Melatonin (MT) acts as a key endogenous modulator of these processes; however, its prognostic value and therapeutic potential in ART programs remain a subject of debate.

To assess the prognostic significance of melatonin deficiency in IVF outcomes and to justify a differentiated approach to the correction of circadian disorders, taking into account the polymorphism of the MTNR1B melatonin receptor gene.

This prospective cohort study included 239 patients (aged 35–45 years) with idiopathic infertility and a history of IVF failure. The main group (n=115) comprised women with melatonin deficiency (nighttime salivary level <40 pg/mL), while the comparison group (n=124) had a preserved circadian profile. A 3-month preconception preparation using agomelatine and melatonin was conducted. The daily MT profile, its content in follicular fluid (FF), and the estradiol/testosterone (E2/T) ratio were determined by HPLC-MS. Endometrial expression of LIF and CD56 was assessed immunohistochemically. Genotyping of the MTNR1B gene polymorphism rs1387153 was performed using real-time PCR.

Initially, pathogenetically significant correlations were revealed in patients with MT deficiency: nighttime MT levels inversely correlated with testosterone concentration in FF ($p=-0.52$; $p=0.005$) and directly correlated with LIF expression in the endometrium ($p=0.45$; $p=0.016$). ROC analysis established a threshold nighttime MT value of <31 pg/mL as a predictor of pregnancy non-occurrence with high accuracy (AUC=0.91; sensitivity 89.2 %, specificity 82.4 %). In carriers of the minor T allele (rs1387153, n=28), the therapeutic response was minimal: the increase in nighttime MT was only from 8.0 to 11.0 pg/mL ($p=0.001$), and the clinical pregnancy rate (CPR) was 8.9%. In patients with the C/C genotype (n=87), complete normalization of the circadian rhythm was achieved; the fertilization rate (74.0 %) and CPR (29.8 %) did not differ from the comparison group ($p>0.05$).

Thus, melatonin deficiency is a modifiable risk factor for IVF failure; however, the effectiveness of correction is determined by the MTNR1B genotype. The proposed personalized algorithm allows, in patients without genetic resistance, to completely negate the negative impact of MT deficiency and achieve outcomes comparable to the population without initial disorders.

Ичмелян Альберт Мусакович

кандидат медицинских наук, доцент,
ГОУ ВПО Ульяновский государственный университет
ichmelyan@rambler.ru

Богдасаров Азат Юрьевич

доктор медицинских наук, профессор,
ГОУ ВПО Ульяновский государственный университет
azat-01@mail.ru

Давидян Лиана Юрьевна

доктор медицинских наук, профессор,
ГОУ ВПО Ульяновский государственный университет
dliana2009@mail.ru

Богдасарова Регина Азатовна

аспирант,
ГОУ ВПО Ульяновский государственный университет
bogdasarovar@bk.ru

Олейникова Диана Валерьевна

кандидат медицинских наук, старший преподаватель,
ГОУ ВПО Ульяновский государственный университет
cgkb79@mail.ru

Аннотация. Возрастное снижение фертильности ассоциировано с оксидативным стрессом и нарушением циркадной регуляции оогенеза. Мелатонин (MT) выступает ключевым эндогенным модулятором этих процессов, однако его прогностическое значение и терапевтический потенциал в программах ВРТ остаются предметом дискуссий.

Цель — оценить прогностическую значимость дефицита мелатонина в исходах программ ЭКО и обосновать дифференцированный подход к коррекции циркадных нарушений с учетом полиморфизма гена рецептора мелатонина MTNR1B.

В проспективное когортное исследование включены 239 пациенток (35–45 лет) с идиопатическим бесплодием и неудачами ЭКО в анамнезе. Основную группу (n=115) составили женщины с дефицитом мелатонина (ночной уровень в слюне <40 пг/мл), группу сравнения (n=124) — с сохраненным циркадным профилем. Проведена 3-месячная прекоцепционная подготовка с использованием агомелатина и мелатонина. Методом ВЭЖХ-МС определяли суточный профиль MT, его содержание в фолликулярной жидкости (ФЖ), соотношение эстрадиол/тестостерон (Е2/Т). Иммуногистохимически оценивали экспрессию LIF и CD56 в эндометрии. Генотипирование полиморфизма rs1387153 гена MTNR1B выполнено методом ПЦР в реальном времени.

Исходно у пациенток с дефицитом MT выявлены патогенетически значимые корреляции: уровень ночного MT обратно коррелировал с концентрацией тестостерона в ФЖ ($p=-0.52$; $p=0.005$) и прямо коррелировал с экспрессией LIF в эндометрии ($p=0.45$; $p=0.016$). ROC-анализ установил пороговое значение ночного MT <31 пг/мл как предиктор ненаступления беременности с высокой точностью (AUC=0.91; чувствительность 89,2 %, специфичность 82,4 %). У носительниц минорного аллеля Т (rs1387153, n=28) терапевтический ответ был минимальным: прирост ночного MT составил лишь с 8,0 до 11,0 пг/мл ($p=0.001$), а частота наступления беременности (ЧНБ) —

Keywords: melatonin, age-associated infertility, circadian rhythms, IVF, ovarian reserve, endometrial receptivity, MTNR1B polymorphism, personalized medicine, oxidative stress.

Современные демографические тенденции характеризуются неуклонным ростом возраста первородящих, что определяет увеличение доли пациенток позднего репродуктивного возраста в программах вспомогательных репродуктивных технологий (ВРТ) [1, 2]. Несмотря на значительный прогресс в области культивирования эмбрионов и оптимизации протоколов стимуляции, частота наступления беременности у женщин старше 35 лет остается стабильно низкой, что диктует необходимость поиска новых модифицируемых факторов репродуктивного успеха [3, 4].

Ключевым звеном патогенеза возраст-ассоциированного снижения фертильности признано накопление активных форм кислорода (АФК), ведущее к повреждению митохондриальной ДНК ооцитов, дисфункции клеток кумулюса и индукции апоптотических каскадов [5, 6]. В этом контексте исключительный интерес представляет мелатонин (N-ацетил-5-метокситриптамиин) — нейрогормон эпифиза, реализующий дуальную функцию: синхронизатора циркадных ритмов через рецепторы MTNR1A/MTNR1B и прямого эндогенного антиоксиданта, нейтрализующего гидроксильные и пероксильные радикалы [7–9].

Фундаментальные исследования последних лет убедительно демонстрируют, что клетки гранулезы и ооциты экспрессируют функционально активные рецепторы мелатонина, а концентрация гормона в фолликулярной жидкости коррелирует с качеством ооцитов и эмбрионов [10, 11]. Более того, мелатонин модулирует активность ключевого фермента стероидогенеза — ароматазы CYP19A1, обеспечивая оптимальный баланс эстрадиола и тестостерона в фолликулярной микросреде [12].

Однако в рутинной клинической практике оценка мелатонинового статуса не проводится. Одномоментное определение уровня гормона в сыворотке крови малоинформативно ввиду выраженной циркадной зависимости его секреции, пик которой приходится на темное время суток [13]. Именно нарушение архитектоники

циркадного ритма — снижение амплитуды ночного пика при сохранении базальных дневных значений — представляет собой ранний маркер эндогенной дисфункции эпифиза, ассоциированной с репродуктивными неудачами [14, 15].

До настоящего времени остаются неопределенными критерии селекции пациенток для проведения мелатонинотерапии, отсутствуют валидированные пороговые значения МТ, ассоциированные с неблагоприятным прогнозом в программах ЭКО, и не изучено влияние генетического полиморфизма рецепторного аппарата МТ на эффективность коррекции. Настоящее исследование выполнено для восполнения указанных пробелов.

Ключевые слова: мелатонин, возраст-ассоциированное бесплодие, циркадные ритмы, ЭКО, овариальный резерв, рецептивность эндометрия, полиморфизм MTNR1B, персонализированная медицина, оксидативный стресс.

Цель исследования — на основании комплексной оценки циркадного профиля мелатонина, его концентрации в фолликулярной жидкости и молекулярно-генетического анализа полиморфизма rs1387153 гена MTNR1B определить прогностическую значимость дефицита МТ в отношении ключевых этапов программы ЭКО и научно обосновать дифференцированный подход к персонализированной коррекции у пациенток с возраст-ассоциированным идиопатическим бесплодием.

Проведено проспективное сравнительное открытое исследование в параллельных группах на клинических базах Центра репродуктивной медицины (г. Краснодар) и Университетской клиники (г. Ульяновск) в период с января 2019 по декабрь 2024 года. Дизайн исследования одобрен локальными этическими комитетами (протокол № 78–19 от 12.03.2019 и № 112–22 от 05.04.2022). Все пациентки подписали информированное согласие.

Из 1578 пациенток с идиопатическим бесплодием, обратившихся за период исследования, критериям включения соответствовали 276 женщин. 37 пациенток отказались от участия по различным причинам. Итоговая выборка составила 239 пациенток, распределенных на группы в зависимости от исходного уровня ночного мелатонина в слюне. Основную группу (дефицит МТ,

ночной уровень <40 пг/мл) составили 115 женщин, группу сравнения (нормальный циркадный профиль, МТ ≥ 40 пг/мл) — 124 женщины.

Пациенткам основной группы назначалась двухэтапная прекоцепционная подготовка продолжительностью 2–3 месяца:

1. Коррекция циркадной дисфункции: агомелатин 25 мг/сут за 30–60 минут до сна по схеме: 3 недели приема, 1 неделя перерыва, 2 последовательных курса (под контролем врача-психиатра для оценки переносимости).
2. Заместительная терапия: после завершения курса агомелатина — мелатонин в дозе 3–6 мг/сут за 30 минут до сна ежедневно, непрерывно, включая период стимуляции суперовуляции и лютеиновую фазу цикла переноса.

Группа сравнения получала стандартную терапию без назначения препаратов мелатонина или агомелатина.

Определяли суточный профиль мелатонина оценивали в слюне, собранной в 4 временные точки: 07:00, 15:00, 23:00 и 03:00. Забор слюны строго стандартизирован: исключение кофеина, алкоголя, никотина и чистки зубов за 2 часа до сбора; ночной сбор осуществлялся при освещении менее 30 люкс. Концентрацию МТ определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с тандемной масс-спектрометрией (ВЭЖХ-МС) на системе Agilent 6460 Triple Quad (Agilent Technologies, США). Чувствительность метода — 0,5 пг/мл, коэффициент вариации — 4,2–6,8 %. Рассчитывали амплитуду циркадного ритма (МТф) как отношение ночного пика к среднесуточному значению.

В фолликулярной жидкости, аспирированной при трансвагинальной пункции, определяли концентрацию МТ, общего тестостерона (Т) и эстрадиола (Е2) методом ВЭЖХ-МС. Рассчитывали соотношение Е2/Т как интегральный маркер функциональной активности гранулы и эффективности ароматизации андрогенов.

ДНК выделяли из буккального эпителия с использованием набора QIAamp DNA Mini Kit (Qiagen, Германия). Генотипирование полиморфизма rs1387153 (C>T) гена MTNR1B проводили методом ПЦР в реальном времени с TaqMan-зондами на амплификаторе CFX96 (Bio-Rad, США). Идентифицировали генотипы C/C, C/T и T/T, которые впоследствии были объединены в группы C/C и носители аллеля Т (C/T+T/T) ввиду малой частоты гомозигот Т/Т.

Пайпель-биопсию эндометрия выполняли на 7-й день после овуляции в естественном или стимулированном цикле (21–23 день менструального цикла). Иммуногистохимическое исследование проводили на автоматиче-

ском иммунофлуоресценции Ventana BenchMark ULTRA (Roche, Швейцария) с использованием первичных антител к LIF (Abcam, Великобритания) и CD56 (Dako, Дания). Оценку экспрессии проводили полуколичественным методом с расчетом индекса IRS (для LIF) и подсчетом количества позитивных клеток на 1 мм² стромы (для CD56).

Оценку зрелости ооцитов (GV, MI, MII) проводили через 4 часа после пункции. Оплодотворение оценивали через 16–18 часов после инсеминации/ИКЦИ по наличию двух пронуклеусов. Культивирование эмбрионов осуществляли до стадии бластоцисты (5–6 сутки) в среде Continuous Single Culture (Irvine Scientific, США). Качество эмбрионов оценивали по классификации Gardner и Schoolcraft.

Объем выборки рассчитан априорно исходя из ожидаемой разницы в частоте наступления беременности 15 % между группами (мощность 80 %, $\alpha=0,05$). Статистическая обработка выполнена с использованием пакета IBM SPSS Statistics версии 26.0. Данные представлены как медиана и интерквартильный размах Me [Q1; Q3]. Для сравнения независимых групп применяли U-критерий Манна-Уитни, зависимых — критерий Уилкоксона. Категориальные переменные сравнивали с помощью критерия χ^2 Пирсона с поправкой Йейтса. Корреляционный анализ выполнен с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена (ρ). Для выявления нелинейных зависимостей применяли обобщенные аддитивные модели (GAM). Диагностическую значимость оценивали методом ROC-анализа с расчетом площади под кривой (AUC). Критический уровень значимости принят $p < 0,05$.

Проведенные исследования показали, что группы были сопоставимы по основным клинко-демографическим параметрам. Медиана возраста в основной группе составила 39,0 лет против 38,5 лет в группе сравнения ($p=0,342$). Индекс массы тела (23,1 vs 22,8 кг/м²; $p=0,472$), уровень АМГ (1,6 vs 1,7 нг/мл; $p=0,281$) и количество антральных фолликулов (8,0 в обеих группах; $p=0,354$) также не имели статистически значимых различий.

У пациенток основной группы зафиксировано выраженное уплощение циркадного ритма. Медиана ночного уровня МТ составляла 14,0 пг/мл, что было в 3,4 раза ниже показателя группы сравнения — 48,0 пг/мл ($p=0,0001$). Уровень МТ в фолликулярной жидкости также был значимо ниже: 2,64 против 4,72 пг/мл соответственно ($p < 0,0001$). Амплитуда циркадного ритма (МТф) в основной группе составляла 2,1, что свидетельствовало о глубокой циркадной дисрегуляции по сравнению с контролем, где данный показатель находился на уровне 4,7.

После проведенного курса прекоцепционной подготовки в основной группе в целом отмечена досто-

верная положительная динамика по всем параметрам ($p < 0,0001$ для всех). Медиана ночного МТ увеличилась в 2,6 раза — до 36,0 пг/мл. Принципиально важным результатом явилась полная нормализация амплитуды циркадного ритма: после лечения МТф в основной группе достигла 4,81, не имея статистически значимых отличий от группы сравнения (4,72; $p=0,162$).

При генотипировании полиморфизма rs1387153 носительство минорного аллеля Т (генотипы С/Т и Т/Т) выявлено у 28 пациенток основной группы, что составило 24,3 %. Остальные 87 женщин (75,7 %) имели гомозиготный генотип С/С.

Анализ динамики мелатонинового статуса в зависимости от генотипа выявил принципиальные различия. У пациенток с генотипом С/С терапия привела к клинически значимому росту ночного МТ с 17,0 до 42,0 пг/мл, что практически достигло уровня группы сравнения. Концентрация МТ в фолликулярной жидкости повысилась с 2,72 до 5,27 пг/мл. В подгруппе носительниц аллеля Т терапевтический ответ был минимальным: прирост ночного МТ составил лишь с 8,0 до 11,0 пг/мл ($p=0,001$), а концентрация МТ в ФЖ увеличилась незначительно — с 2,50 до 2,85 пг/мл ($p=0,002$). Сравнительный анализ величины прироста (Δ) между подгруппами продемонстрировал достоверно более низкую эффективность терапии у носительниц мутации по всем ключевым параметрам: Δ ночного МТ составил +3,0 пг/мл против +25,0 пг/мл в группе С/С ($p < 0,001$), Δ МТф — +0,35 против +2,55 ($p < 0,001$).

Корреляционный анализ, проведенный до начала терапии, выявил у пациенток с дефицитом МТ наличие устойчивых патологических взаимосвязей. Установлена сильная отрицательная корреляция между уровнем МТ и концентрацией тестостерона в фолликулярной жидкости ($r = -0,52$; $p=0,005$). Одновременно выявлена положительная корреляция ночного пика МТ с соотношением эстрадиола к тестостерону (Е2/Т) в ФЖ ($r = 0,41$; $p=0,032$). Данные закономерности указывают на то, что дефицит МТ сопряжен с нарушением ароматизации андрогенов: чем ниже ночной МТ, тем более андрогенной является фолликулярная среда.

Амплитуда циркадного ритма МТ (МТф) продемонстрировала значимую положительную связь с экспрессией фактора ингибции лейкемии (LIF) в железах эндометрия ($r = 0,45$; $p=0,016$). Ночной МТ положительно коррелировал с плотностью CD56+ натуральных киллеров ($r = 0,39$; $p=0,041$), что указывает на участие МТ в регуляции локального иммунного гомеостаза и процессов имплантации.

В подгруппе пациенток с генотипом С/С исходные корреляции были еще более выраженными: связь ноч-

ного МТ с Е2/Т в ФЖ достигала $r=0,58$ ($p < 0,001$), а связь МТф с LIF в строме — $r=0,47$ ($p < 0,001$). Регрессионная модель (GAM) для этой подгруппы продемонстрировала высокую объясняющую способность (скорректированный $R^2 = 0,62$; $p < 0,001$), при этом увеличение ночного МТ на 10 пг/мл ассоциировалось с ростом Е2/Т на 15–20 %.

Ключевым эффектом терапии стало не просто повышение абсолютных цифр МТ, а качественное изменение регуляторного ландшафта. В подгруппе пациенток с генотипом С/С, достигших нормализации уровня МТ, ранее выявленные жесткие корреляции полностью утратили статистическую значимость: связь МТ с Е2/Т снизилась с $r=0,58$ до $r=0,12$ ($p=0,267$), а связь МТ с CD56+ — с $r=-0,39$ до $r=-0,08$ ($p=0,455$). Данный феномен интерпретирован как разрыв «порочного круга»: фолликулогенез и созревание эндометрия перестали находиться в критической зависимости от текущего уровня МТ, что свидетельствует о восстановлении автономной физиологической регуляции.

В подгруппе носительниц мутации С/Т после терапии, несмотря на минимальный прирост гормона, также отмечена положительная динамика: отрицательная связь МТ с тестостероном ослабла и стала незначимой ($r = -0,52$ до $-0,21$; $p=0,289$). Это указывает, что даже частичная коррекция дефицита МТ у генетически отягощенных пациенток оказывает позитивное модулирующее действие на рецептивность эндометрия.

Сравнительный анализ результатов стимуляции и исходов переноса эмбрионов продемонстрировал четкую зависимость клинической эффективности от успеха нормализации МТ. У женщин основной группы в целом по сравнению с группой сравнения сохранялись статистически значимо худшие показатели: общее количество ооцитов (6,0 vs 9,0; $p < 0,001$), число зрелых ооцитов MII (2,0 vs 5,0; $p < 0,001$), доля оплодотворения (58,5 % vs 75,0 %; $p < 0,001$), количество бластоцист (1,0 vs 4,0; $p < 0,001$) и частота наступления клинической беременности (8,9 % vs 31,0 %; $p < 0,001$).

Однако при анализе подгрупп основной группы выявлена принципиальная гетерогенность исходов. У носительниц аллеля Т (резистентных к терапии) зафиксированы наихудшие результаты: количество ооцитов MII составило 2,0, доля оплодотворения — 58,0 %, число бластоцист — 1,0, а ЧНБ — лишь 8,9 %. Все показатели были достоверно хуже, чем в группе сравнения ($p < 0,001$).

У пациенток с генотипом С/С, достигших нормализации МТ, результаты были принципиально иными. Доля оплодотворения MII достигла 74,0 %, не отличаясь от группы сравнения (75,0 %; $p=0,151$). Частота наступления беременности составила 29,8 %, также не имея различий с контролем (31,0 %; $p=0,175$). Количество зрелых

ооцитов (4,0) и бластоцист (3,0) было выше, чем в резистентной подгруппе ($p < 0,001$), но сохранялось несколько ниже контрольных значений, что, вероятно, отражает остаточное влияние возраста на пул антральных фолликулов.

ROC-анализ подтвердил высокую диагностическую значимость определения ночного МТ как интегрального биомаркера успеха ВРТ. Наилучшие прогностические характеристики получены для прогнозирования ненаступления клинической беременности. Пороговое значение ночного МТ ≤ 31 пг/мл продемонстрировало отличную дискриминационную способность: площадь под кривой (AUC) составила 0,91 (95 % ДИ: 0,87–0,95) при чувствительности 89,2 % и специфичности 82,4 %. Высокая прогностическая точность (AUC > 0,8) также установлена для прогнозирования получения ≤ 3 ооцитов МII (порог МТ ≤ 36 пг/мл; AUC=0,85) и доли оплодотворения ≤ 65 % (порог МТ ≤ 29 пг/мл; AUC=0,88).

Проведенное исследование демонстрирует, что дефицит мелатонина является не просто эпифеноменом возрастного бесплодия, а самостоятельным модифицируемым фактором риска, вовлеченным в ключевые патогенетические механизмы неудач имплантации. Полученные данные согласуются с результатами мета-анализа Paula и соавт. (2023), показавшего, что добавление мелатонина в программы ВРТ ассоциировано с улучшением качества ооцитов и эмбрионов, однако эффективность терапии варьирует в широких пределах [25].

Впервые в настоящем исследовании продемонстрировано, что гетерогенность ответа на мелатонинотерапию может быть объяснена носительством функционально значимого полиморфизма rs1387153 гена MTNR1B. Ранее этот полиморфизм изучался преимущественно в контексте нарушений углеводного обмена и риска развития гестационного диабета [21, 22]. Наши данные расширяют представление о клинической значимости данной мутации, показывая ее роль в модуляции чувствительности рецепторного аппарата к экзогенному и эндогенному мелатонину у женщин с бесплодием.

Выявленная нами отрицательная корреляция между уровнем МТ и концентрацией тестостерона в фолликулярной жидкости подтверждает экспериментальные данные Woo и соавт. о способности мелатонина модулировать активность ароматазы CYP19A1 в клетках гранулезы [12]. В условиях дефицита МТ нарушается конверсия андрогенов в эстрогены, что создает избыточно андрогенную микросреду, признанную фактором, ухудшающим качество ооцитов и подавляющим пролиферацию клеток гранулезы [34, 35]. Нормализация уровня МТ у пациенток с генотипом С/С приводила к восстановлению баланса Е2/Т, что клинически выражалось в увеличении доли зрелых ооцитов и частоты оплодотворения.

Не менее важным представляется влияние МТ на рецептивность эндометрия. Экспрессия LIF — одного из ключевых цитокинов, обеспечивающих имплантацию, — продемонстрировала прямую зависимость от амплитуды циркадного ритма МТ. Это согласуется с данными экспериментальных исследований Chuffa и соавт., показавших, что введение мелатонина крысам повышает экспрессию LIF и улучшает имплантационные свойства эндометрия [29]. В нашей работе у пациенток с генотипом С/С после нормализации МТ корреляция с LIF утратила силу, что может свидетельствовать о выходе системы из состояния патологической зависимости и восстановлении автономной регуляции.

Пороговое значение ночного МТ < 31 пг/мл, установленное нами как предиктор ненаступления беременности с AUC 0,91, обладает высокой клинической значимостью и может быть рекомендовано в качестве скринингового маркера для выделения группы риска. Интересно, что этот порог несколько ниже границы дефицита (40 пг/мл), принятой в исследовании, что указывает на существование «серой зоны» (31–40 пг/мл), где нарушения носят функциональный характер и потенциально обратимы, в отличие от глубокого дефицита (< 31 пг/мл), ассоциированного с неблагоприятным прогнозом.

Ограничения настоящего исследования включают открытый дизайн, отсутствие рандомизации, а также относительно небольшой размер подгруппы носителей аллеля Т, что не позволило отдельно проанализировать генотипы С/Т и Т/Т. Требуются дальнейшие исследования с большей выборкой и более длительным периодом наблюдения для оценки отдаленных репродуктивных исходов, включая частоту живорождения.

Проведенное исследование количественно определило вклад дефицита мелатонина в структуру возраст-ассоциированного идиопатического бесплодия и обосновало персонализированный подход к его коррекции.

Основные итоги работы:

1. Дефицит МТ (< 40 пг/мл) выявлен у 46,5 % женщин 35–45 лет с повторными неудачами ЭКО и ассоциирован с 3,5-кратным снижением частоты наступления беременности.
2. Определены клинически значимые уровни ночного МТ в слюне: < 31 пг/мл — предиктор ненаступления беременности (AUC=0,91); < 29 пг/мл — предиктор низкой оплодотворяемости (AUC=0,88).
3. У 24,3 % пациенток с дефицитом МТ выявлен аллель Т полиморфизма rs1387153 гена MTNR1B, обуславливающий неэффективность стандартных доз МТ (прирост +3,0 пг/мл, частота беременности 8,9 %).

4. Доказана прямая корреляция дефицита МТ со снижением ароматизации андрогенов в фолликуле и экспрессии фактора имплантации LIF в эндометрии.
5. Нормализация уровня МТ у пациенток без генетической резистентности (генотип С/С) полностью нивелирует негативное влияние дефицита: частота оплодотворения (74,0 %) и беременности (29,8 %) достигли показателей группы с исходной нормой МТ.

Рекомендовано в обследование женщин старше 35 лет с неудачами ЭКО целесообразно включить опре-

деление ночного МТ в слюне (критический уровень <31 пг/мл). При выявлении дефицита показано генотипирование по rs1387153 для выбора терапевтической дозы: при генотипе С/С — стандартная схема (3–6 мг/сут), при носительстве аллеля Т — высокие дозы (10 мг/сут) в комбинации с антиоксидантами (коэнзим Q10, витамин Е).

Таким образом, исследование переводит коррекцию дефицита мелатонина в плоскость персонализированной доказательной медицины, значимо повышая эффективность программ ВРТ в сложной возрастной когорте пациенток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назаренко Т.А., Краснополская К.В., Ершова И.Ю., и др. Возраст-ассоциированное бесплодие: возможности преодоления //Акушерство и гинекология. 2021. № 10. С. 24–30. doi: 10.18565/aig.2021.10.24-30.
2. ESHRE Capri Workshop Group. Fertility and ageing //Human Reproduction Update. 2005. Vol. 11, No. 3. P. 261–276. doi: 10.1093/humupd/dmi006.
3. Краснополская К.В., Назаренко Т.А., Ершова И.Ю., и др. Эффективность программ ВРТ у пациенток позднего репродуктивного возраста //Российский вестник акушера-гинеколога. 2022. Т. 22, № 3. С. 44–51. doi: 10.17116/rosakush20222203144.
4. Broekmans F.J., Knauff E.A., te Velde E.R., et al. Female reproductive ageing: current knowledge and future trends //Facts, Views & Vision in ObGyn. 2009. Vol. 1, No. 1. P. 11–21.
5. May-Panloup P., Boucrot L., de la Barca J.M., et al. Ovarian ageing: the role of mitochondria in oocytes and follicles // Human Reproduction Update. 2016. Vol. 22, No. 6. P. 725–743. doi: 10.1093/humupd/dmw028.
6. Agarwal A., Aponte-Mellado A., Premkumar B.J., et al. The effects of oxidative stress on female reproduction: a review // Reproductive Biology and Endocrinology. 2012. Vol. 10. P. 49. doi: 10.1186/1477-7827-10-49.
7. Reiter R.J., Tan D.X., Korkmaz A., et al. Melatonin and stable circadian rhythms optimize maternal, placental, and fetal physiology // Human Reproduction Update. 2014. Vol. 20, No. 2. P. 293–307. doi: 10.1093/humupd/dmt054.
8. Tamura H., Takasaki A., Taketani T., et al. Melatonin as a free radical scavenger in the ovarian follicle // Endocrine Journal. 2013. Vol. 60, No. 1. P. 1–13. doi: 10.1507/endocrj.ej12-0263.
9. He C., Wang J., Zhang Z., et al. Mitochondrial synthesis of melatonin: an update //Journal of Pineal Research. 2019. Vol. 67, No. 3. e12606. doi: 10.1111/jpi.12606.
10. Jockers R., Delagrè P., Dubocovich M.L., et al. Update on melatonin receptors: IUPHAR Review 20 // British Journal of Pharmacology. 2016. Vol. 173, No. 18. P. 2702–2725. doi: 10.1111/bph.13536.
11. Tong J., Sheng S., Sun Y., et al. Melatonin levels in follicular fluid as markers for IVF outcomes and predicting oocyte maturation // Systems Biology in Reproductive Medicine. 2017. Vol. 63, No. 6. P. 374–381. doi: 10.1080/19396368.2017.1358767.
12. Woo M.M., Tai C.J., Kang S.K., et al. Direct action of melatonin in human granulosa-luteal cells // The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism. 2001. Vol. 86, No. 10. P. 4789–4797. doi: 10.1210/jcem.86.10.7912.
13. Benloucif S., Burgess H.J., Klerman E.B., et al. Measuring melatonin in humans // Journal of Clinical Sleep Medicine. 2008. Vol. 4, No. 1. P. 66–69.
14. Калинин С.Ю., Тюзиков И.А., Ворслов Л.О., и др. Мелатонин и репродуктивная система женщин // Проблемы репродукции. 2020. Т. 26, № 4. С. 36–43. doi: 10.17116/repro20202604136.
15. Olcese J.M. Melatonin and female reproduction: an expanding universe //Frontiers in Endocrinology. 2020. Vol. 11. P. 85. doi: 10.3389/fendo.2020.00085.
16. Fernando S., Wallace E.M., Vollenhoven B., et al. Melatonin in assisted reproductive technology: a randomized controlled trial // Fertility and Sterility. 2018. Vol. 109, No. 2. P. 258–265. doi: 10.1016/j.fertnstert.2017.11.003.
17. Prokopenko I., Langenberg C., Florez J.C., et al. Variants in MTNR1B influence fasting glucose levels // Nature Genetics. 2009. Vol. 41, No. 1. P. 77–81. doi: 10.1038/ng.290.
18. Wang Y.K., Zhao Y.J., Li X.L., et al. Melatonin protects against cisplatin-induced ovarian damage in mice via the MT1 receptor and antioxidant activity // Biology of Reproduction. 2021. Vol. 104, No. 2. P. 446–456. doi: 10.1093/biolre/iaaa197.
19. Kim M.K., Park E.A., Kim H.J., et al. Does supplementation of in-vitro culture medium with melatonin improve IVF outcomes in women with diminished ovarian reserve? // Reproductive BioMedicine Online. 2019. Vol. 39, No. 6. P. 901–907. doi: 10.1016/j.rbmo.2019.08.003.
20. Громова О.А., Торшин И.Ю., Тетрашвили Н.К., и др. Молекулярные механизмы влияния мелатонина на репродуктивную систему //Фарматека. 2022. № 5. С. 62–69. doi: 10.18565/pharmateca.2022.5.62-69.
21. Wang Z., Wang L., Zhang J., et al. Association of melatonin receptor 1B gene (rs10830963 and rs1387153) polymorphism with polycystic ovary syndrome risk // Gynecological Endocrinology. 2021. Vol. 37, No. 4. P. 347–351. doi: 10.1080/09513590.2020.1822799.
22. Liu L., Wang H., Li Z., et al. MTNR1B rs1387153 polymorphism is associated with gestational diabetes mellitus // Diabetes Research and Clinical Practice. 2016. Vol. 119. P. 77–81. doi: 10.1016/j.diabres.2016.07.004.
23. Choi J., Park S.M., Lee E., et al. Melatonin restores the cyclic adenosine monophosphate (cAMP) signaling pathway in aged mouse oocytes // Aging Cell. 2020. Vol. 19, No. 6. e13143. doi: 10.1111/ace1.13143.
24. Nishihara T., Hashimoto S., Ito K., et al. Oral melatonin supplementation improves oocyte and embryo quality in women undergoing in vitro fertilization //Journal of Pineal Research. 2014. Vol. 56, No. 4. P. 425–430. doi: 10.1111/jpi.12133.

25. Paula W.J., Lanes A., Ambartsumyan G., et al. Melatonin supplementation in women undergoing IVF: a systematic review and meta-analysis // *Fertility and Sterility*. 2023. Vol. 119, No. 2. P. 264–274. doi: 10.1016/j.fertnstert.2022.11.006.
26. Espino J., Macedo M., Lozano G., et al. Impact of melatonin supplementation in women with unexplained infertility undergoing fertility treatment // *Antioxidants*. 2019. Vol. 8, No. 9. P. 338. doi: 10.3390/antiox8090338.
27. Дубинская Е.Д., Гаспаров А.С., Барабанова О.Э., и др. Хронический эндометрит: современный взгляд на проблему // *Акушерство и гинекология*. 2018. № 12. С. 22–27. doi: 10.18565/aig.2018.12.22-27.
28. Lessey B.A., Kim J.J. Endometrial receptivity in the eutopic endometrium of women with endometriosis: it is affected and let me show you why // *Fertility and Sterility*. 2017. Vol. 108, No. 1. P. 19–27. doi: 10.1016/j.fertnstert.2017.05.031.
29. Chuffa L.G., Lupi L.A., Cuciolo M.S., et al. Melatonin promotes uterine receptivity in female rats // *Reproduction*. 2019. Vol. 158, No. 2. P. 151–163. doi: 10.1530/REP-19-0020.
30. Qu F., Wang F.F., Wu Y., et al. Melatonin enhances the implantation rate in patients undergoing frozen-thawed embryo transfer // *Reproductive BioMedicine Online*. 2021. Vol. 42, No. 1. P. 105–113. doi: 10.1016/j.rbmo.2020.09.021.
31. Rosas-Cruz A., Silva-Rojas A., Salazar-Páramo M., et al. Melatonin inhibits matrix metalloproteinase-9 activity and activation in human monocytes // *Journal of Pineal Research*. 2021. Vol. 71, No. 1. e12742. doi: 10.1111/jpi.12742.
32. Yong W., Ma H., Na D., et al. Agomelatine, a melatonin analog, improves sleep and restores reproductive function in stressed female rats // *Frontiers in Pharmacology*. 2022. Vol. 13. P. 938239. doi: 10.3389/fphar.2022.938239.
33. Тянянгин А.А., Коган И.Ю., Шилова Н.В., и др. Экспрессия рецепторов мелатонина в клетках гранулы женщин с различными гинекологическими заболеваниями // *Молекулярная медицина*. 2019. Т. 17, № 6. С. 42–46. doi: 10.29296/24999490-2019-06-07.
34. Babayev E., Seli E. Oocyte mitochondrial function and reproduction // *Current Opinion in Obstetrics and Gynecology*. 2015. Vol. 27, No. 3. P. 175–181. doi: 10.1097/GCO.0000000000000164.
35. Sasaki H., Hamatani T., Kamijo S., et al. Impact of oxidative stress on age-associated decline in oocyte developmental competence // *Frontiers in Endocrinology*. 2019. Vol. 10. P. 811. doi: 10.3389/fendo.2019.00811.
36. Carlomagno G., Nordio M., Chiu T.T., et al. Contribution of myo-inositol and melatonin to human reproduction // *European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology*. 2011. Vol. 159, No. 2. P. 267–272. doi: 10.1016/j.ejogrb.2011.07.038.
37. Tamura H., Jozaki M., Tanabe M., et al. Importance of melatonin in assisted reproductive technology and ovarian aging // *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. Vol. 21, No. 3. P. 1135. doi: 10.3390/ijms21031135.
38. Zhang L., Zhang Z., Wang J., et al. Melatonin regulates the crosstalk between autophagy and apoptosis in granulosa cells of patients with premature ovarian insufficiency // *Aging*. 2020. Vol. 12, No. 24. P. 25352–25366. doi: 10.18632/aging.104142.
39. Li Y., Liu H., Wu K., et al. Melatonin promotes human oocyte maturation and early embryo development by enhancing mitochondrial function // *Journal of Pineal Research*. 2021. Vol. 70, No. 3. e12719. doi: 10.1111/jpi.12719.
40. Yang Q., Wang F., Zhang Q., et al. The role of melatonin in polycystic ovary syndrome: a review // *Reproductive Sciences*. 2021. Vol. 28, No. 9. P. 2450–2458. doi: 10.1007/s43032-020-00433-3.
41. Liu Y., Zhao H., Zhang Q., et al. Melatonin improves endometrial receptivity and embryo implantation via MT2 receptor mediated PI3K/AKT signaling pathway // *Journal of Pineal Research*. 2023. Vol. 74, No. 2. e12845. doi: 10.1111/jpi.12845.
42. Chen S., Wang Y., Li D., et al. Melatonin protects against age-related ovarian aging by activating SIRT1-dependent autophagy // *Aging Cell*. 2022. Vol. 21, No. 5. e13612. doi: 10.1111/acer.13612.
43. Kim J.H., Park S.J., Kim T.S., et al. Melatonin prevents oxidative stress-induced mitochondrial dysfunction and apoptosis in human granulosa cells // *Antioxidants*. 2022. Vol. 11, No. 8. P. 1502. doi: 10.3390/antiox11081502.
44. Zhao D., Yu Y., Shen Y., et al. Melatonin synthesis and function: evolutionary history in animals and plants // *Frontiers in Endocrinology*. 2019. Vol. 10. P. 249. doi: 10.3389/fendo.2019.00249.
45. Hardeland R. Aging, melatonin, and the pro— and anti-inflammatory networks // *International Journal of Molecular Sciences*. 2019. Vol. 20, No. 5. P. 1223. doi: 10.3390/ijms20051223.
46. Majidinia M., Reiter R.J., Shakouri S.K., et al. The role of melatonin, a multitasking molecule, in the regulation of ovarian follicular development // *Journal of Cellular Physiology*. 2018. Vol. 233, No. 12. P. 9255–9267. doi: 10.1002/jcp.26927.
47. Ferraresi C., Bertoni L., Faria A.M., et al. Melatonin as a therapeutic agent for ovarian aging: a systematic review // *Frontiers in Endocrinology*. 2021. Vol. 12. P. 685986. doi: 10.3389/fendo.2021.685986.
48. Moustafa M.F., Abdel-Aziz A.M., El-Sayed M., et al. Melatonin pretreatment improves the developmental competence of vitrified mouse oocytes by modulating oxidative stress and apoptosis // *Cryobiology*. 2020. Vol. 95. P. 67–74. doi: 10.1016/j.cryobiol.2020.05.012.
49. Sun T.C., Liu X.C., Yang S.H., et al. Melatonin inhibits oxidative stress and apoptosis in cryopreserved ovarian tissue // *Reproductive BioMedicine Online*. 2020. Vol. 41, No. 5. P. 801–810. doi: 10.1016/j.rbmo.2020.07.017.
50. Wang F., Tian X., Zhang L., et al. Melatonin promotes the development of immature oocytes from the COH cycle into healthy offspring by protecting mitochondrial function // *Journal of Pineal Research*. 2020. Vol. 68, No. 2. e12621. doi: 10.1111/jpi.12621.
51. Zhang H., Li C., Wen D., et al. Melatonin improves the quality of maternally aged oocytes by maintaining intercellular communication and antioxidant capacity // *Aging*. 2021. Vol. 13, No. 10. P. 14075–14089. doi: 10.18632/aging.203022.
52. Chen X., Song T., Wang Y., et al. Melatonin attenuates oxidative stress-induced apoptosis of bovine ovarian granulosa cells // *Theriogenology*. 2022. Vol. 179. P. 142–151. doi: 10.1016/j.theriogenology.2021.11.018.

© Ичмелян Альберт Мисакович (ichmelyan@rambler.ru); Богдасаров Азат Юрьевич (azat-01@mail.ru);

Давидян Лиана Юрьевна (dliana2009@mail.ru); Богдасарова Регина Азатовна (bogdasarovar@bk.ru);

Олейникова Диана Валерьевна (csgkb79@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КАТЕТЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ФИБРИЛЛЯЦИИ ПРЕДСЕРДИЙ У ПАЦИЕНТОВ, ПЕРЕНЕСШИХ COVID-19: ПОЧЕМУ УСПЕШНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ ЛЕГОЧНЫХ ВЕН НЕ ГАРАНТИРУЕТ УДЕРЖАНИЯ РИТМА

EFFECTIVENESS OF CATHETER ABLATION OF ATRIAL FIBRILLATION IN PATIENTS AFTER COVID-19: WHY SUCCESSFUL PULMONARY VEIN ISOLATION DOES NOT GUARANTEE RHYTHM MAINTENANCE

**S. Kucherenko
N. Koriagina
V. Koriagin**

Summary. Background. The COVID-19 pandemic has resulted in a significant cohort of patients with persistent cardiac arrhythmias. Atrial arrhythmias, associated with disease severity and a poor prognosis, are reported in 19–22 % of patients hospitalized with the novel coronavirus infection. Although catheter ablation is the gold standard for rhythm control in symptomatic atrial fibrillation (AF), its effectiveness in patients who have recovered from COVID-19 remains poorly understood. A few international studies indicate an increased recurrence rate in the post-COVID population; however, the mechanisms underlying ablation failure and specific predictors of adverse outcomes in this patient population have not been established.

Purpose. To evaluate the efficacy of primary catheter ablation of atrial fibrillation in patients with a history of COVID-19, comparing the immediate success of the procedure with the rate of sinus rhythm maintenance at 12 months, and to determine the reasons for the discrepancy between these two parameters.

Materials and Methods. The study consecutively included 288 patients with paroxysmal and persistent AF who underwent radiofrequency or cryoballoon pulmonary vein isolation. The study group consisted of 120 patients with a confirmed history of COVID-19 (>12 weeks ago), and the comparison group consisted of 168 patients without coronavirus infection. Two endpoints were assessed: immediate (sinus rhythm at discharge) and long-term (freedom from any atrial tachyarrhythmia at 12 months after a 90-day blinding period). An analysis of laboratory markers of inflammation and hemostasis, as well as structural parameters of the left atrium using MSCT and echocardiography, was conducted over time. **Results.** The immediate effectiveness of the intervention was high and statistically comparable in both groups: sinus rhythm at discharge was recorded in 93.4 % of patients without COVID-19 and 87.6 % of patients with a history of post-COVID-19 ($p=0.093$). However, after 12 months of follow-up, the gap in effectiveness became highly significant: freedom from arrhythmia in the post-COVID-19 group was only 54.5 % versus 77.0 % in the control group ($p<0.001$). The relative risk of recurrence in patients with a history of COVID-19 increased by 2.81 times (95 % CI:

Кучеренко Сергей Викторович

Пермский государственный медицинский университет
им. академика Е.А. Вагнера
sergeiviktorovichkucherenko@gmail.com

Корягина Наталья Александровна

Доктор медицинских наук, профессор,
Пермский государственный медицинский университет
им. академика Е.А. Вагнера
nina11-85@mail.ru

Корягин Владимир Сергеевич

Ординатор, Пермский государственный медицинский
университет им. академика Е.А. Вагнера
vladimirkoryagin12@gmail.com

Аннотация. Актуальность. Пандемия COVID-19 привела к появлению значительной когорты пациентов с персистирующими нарушениями ритма сердца. У 19–22 % госпитализированных с новой коронавирусной инфекцией регистрируются предсердные аритмии, ассоциированные с тяжестью течения и неблагоприятным прогнозом. Несмотря на то, что катетерная абляция является «золотым стандартом» контроля ритма при симптомной фибрилляции предсердий (ФП), ее эффективность у пациентов, перенесших COVID-19, остается малоизученной. Единичные зарубежные исследования указывают на повышенную частоту рецидивов в постковидной популяции, однако механизмы, лежащие в основе ускользания эффекта абляции, и специфические предикторы неблагоприятного исхода у данной категории больных не установлены.

Цель. Оценить эффективность первичной катетерной абляции фибрилляции предсердий у пациентов с постковидным анамнезом, сопоставив непосредственный успех вмешательства с частотой удержания синусового ритма через 12 месяцев, и установить причины расхождения этих двух показателей.

Материалы и методы. В исследование последовательно включены 288 пациентов с пароксизмальной и персистирующей ФП, которым выполнена радиочастотная или криобаллонная изоляция легочных вен. Основную группу составили 120 больных с подтвержденным COVID-19 в анамнезе (давность >12 недель), группу сравнения — 168 пациентов без коронавирусной инфекции. Оценивались две конечные точки: непосредственная (синусовый ритм при выписке) и отдаленная (свобода от любых предсердных тахикардий через 12 месяцев после 90-дневного слепого периода). Проведен анализ лабораторных маркеров воспаления и гемостаза, структурных параметров левого предсердия по данным МСКТ и ЭхоКГ в динамике.

Результаты. Непосредственная эффективность вмешательства оказалась высокой и статистически сопоставимой в обеих группах: синусовый ритм при выписке зарегистрирован у 93,4 % пациентов без COVID-19 и 87,6 % пациентов с постковидным анамнезом ($p=0,093$). Однако через 12 месяцев наблюдения разрыв в эффективности стал высокозначимым: свобода от аритмии в постковидной группе составила лишь 54,5 % против 77,0 %

1.67–4.73). The structural basis for delayed failure was: constrictive left atrial remodeling (smaller LA linear dimensions after 12 months with a higher recurrence rate; $p=0.015$), a high rate of intra-atrial thrombotic deposits according to MSCT data (43.8 % vs. 28.6 %; $p=0.007$), and persistent hyperfibrinogenemia with paradoxically low CRP ($p=0.030$ and $p=0.015$, respectively).

Conclusion. The key challenge in interventional treatment of AF in post-COVID patients is not achieving the acute effect of pulmonary vein isolation but maintaining myocardial electrical stability in the long term. The high rate of late recurrences is due to ongoing atrial fibrosis due to immune dysregulation and endothelial dysfunction, which is beyond the scope of standard antral isolation.

Keywords: atrial fibrillation, COVID-19, catheter ablation, efficacy, recurrence, endotheliopathy.

Актуальность

Катетерная абляция легочных вен занимает центральное место в стратегии контроля ритма у пациентов с симптомной фибрилляцией предсердий, рефрактерной к медикаментозной терапии [1]. Классическим критерием эффективности процедуры служит стойкое удержание синусового ритма в течение 12 месяцев после вмешательства. Пандемия COVID-19 привнесла принципиально новые вызовы в эту парадигму. Если острое возникновение предсердных аритмий на фоне активной инфекции SARS-CoV-2 является хорошо документированным феноменом [2], то судьба пациентов, подвергающихся абляции после перенесенного COVID-19, остается предметом активной дискуссии. Два крупных исследования — Mohanty S. et al. (2022) [3] и Tankut E. et al. (2023) [4] — продемонстрировали более высокую частоту рецидивов в постковидной группе (38–41 % против 22 % в контроле), однако детальный анализ структурных и лабораторных механизмов, объясняющих эту разницу, в них не проводился. Принципиальный вопрос формулируется следующим образом: равнозначна ли процедурная эффективность абляции (подтвержденная изоляция легочных вен) клинической эффективности (свобода от рецидива) у данной категории больных? Доклинические и клинические данные свидетельствуют, что SARS-CoV-2 способен запускать каскад процессов, способных поддерживать аритмогенез независимо от наличия триггеров в легочных венах: эндотеиит с микротромбообразованием, системную гиперкоагуляцию и диффузный фиброз миокарда [5, 6]. В связи с этим цель настоящего исследования состояла в том, чтобы сопоставить непосредственный технический успех катетерной абляции с отдаленной клинической эффективностью у пациентов с постковидным анамне-

в контроле ($p < 0,001$). Относительный риск рецидива при наличии COVID-19 в анамнезе увеличился в 2,81 раза (95 % ДИ: 1,67–4,73). Структурной основой отсроченной неэффективности явились: констриктивный тип ремоделирования левого предсердия (меньшие линейные размеры ЛП через 12 месяцев при большей частоте рецидивов; $p=0,015$), высокая частота внутрипредсердных тромботических наложений по данным МСКТ (43,8 % против 28,6 %; $p=0,007$), а также персистирующая гиперфибриногенемия на фоне парадоксально низкого СРБ ($p=0,030$ и $p=0,015$ соответственно).

Заключение. Ключевой проблемой интервенционного лечения ФП у постковидных пациентов является не достижение острого эффекта изоляции легочных вен, а сохранение электрической стабильности миокарда в долгосрочной перспективе. Высокая частота поздних рецидивов обусловлена продолжающимся фиброзированием предсердий на фоне иммунной дисрегуляции и эндотелиальной дисфункции, что выходит за пределы компетенции стандартной антральной изоляции.

Ключевые слова: фибрилляция предсердий, COVID-19, катетерная абляция, эффективность, рецидив, эндотелиопатия.

зом и определить механизмы, лежащие в основе возможной диссоциации этих показателей.

Материалы и методы

В проспективное сравнительное исследование последовательно включено 288 пациентов с пароксизмальной и персистирующей формами ФП, госпитализированных для выполнения первичной катетерной абляции в отделение хирургического лечения сложных нарушений ритма сердца и электрокардиостимуляции регионального сосудистого центра ГБУЗ ПК «Клинический кардиологический диспансер» в период 2022–2023 гг. Протокол одобрен Локальным этическим комитетом, все участники подписали информированное согласие. Критерии включения: возраст 45–74 года; документированная пароксизмальная или персистирующая ФП; для группы постковидных пациентов — лабораторно подтвержденный COVID-19, перенесенный не менее чем за 12 недель до даты операции. Критерии исключения: постоянная форма ФП; ФВ ЛЖ < 50 %; выявленный тромбоз ушка ЛП на дооперационном этапе; тяжелая клапанная патология; ХБП 3б–5 стадии; декомпенсированный сахарный диабет; недавние (< 1 года) ОНМК или ИМ; злокачественные новообразования; ХОБЛ. Сформированы две группы: Группа 1 — пациенты без COVID-19 в анамнезе ($n=168$) и Группа 2 — пациенты, перенесшие COVID-19 ($n=120$). Группы были сопоставимы по возрасту (медиана 64 года, $p=0,189$), индексу массы тела, основным коморбидным состояниям и спектру принимаемой антиаритмической и антикоагулянтной терапии (все $p > 0,05$). Единственными исходными различиями явились преобладание женского пола в Группе 2 (62,8 % против 47,0 %; $p=0,008$) и более короткая длительность персистенции ФП до операции ($0,70 \pm 1,86$ мес. против $1,10 \pm 2,33$ мес.; $p=0,006$).

Вмешательство выполнялось в объеме антральной изоляции легочных вен с использованием радиочастотной (генератор Boston Scientific «Maestro», 50 Вт, 45°C, орошение 30 мл/мин) или криобаллонной (Arctic Front Advance) абляции. Доля РЧА/криоабляции в группах составила 57,7 %/42,3 % и 54,5 %/45,5 % соответственно ($p=0,589$). Критерием острого процедурного успеха служило подтверждение входного и выходного блока проведения для всех легочных вен. Первичная конечная точка эффективности определялась как свобода от любой предсердной тахикардии (ФП, трепетание предсердий, предсердная тахикардия) продолжительностью >30 секунд, зарегистрированной после завершения 90-дневного слепого периода. Контроль ритма осуществлялся на визитах через 3, 6 и 12 месяцев (ЭКГ, ХМ-ЭКГ; при симптомах — внеплановое обследование). Статистическая обработка выполнена в программе StatTech v. 4.14.2 (ООО «Статтех», Россия). Нормальность распределения проверялась критерием Шапиро–Уилка. Для сравнения использованы t-критерий Стьюдента, U-критерий Манна–Уитни, критерий χ^2 Пирсона и точный критерий Фишера. Отношение шансов (ОШ) приведено с 95 % доверительным интервалом (ДИ). Различия считались значимыми при $p < 0,05$.

Результаты

Непосредственный результат катетерной абляции оценивался по факту восстановления стабильного синусового ритма к моменту выписки из стационара. В Группе 1 (без COVID-19) синусовый ритм зарегистрирован у 155 из 168 пациентов (93,4 %), в Группе 2 (постковидный анамнез) — у 106 из 120 пациентов (87,6 %). Несмотря на кажущуюся разницу в 5,8 процентных пункта, это различие не достигло порога статистической значимости ($p=0,093$). Иными словами, с технической точки зрения изоляция легочных вен была одинаково успешно выполнима в обеих когортах, и наличие постковидного анамнеза не препятствовало достижению острого процедурного успеха.

Принципиально иная картина открылась при анализе 12-месячных исходов. В контрольной группе стабильный синусовый ритм сохранялся у 127 пациентов из 165, завершивших наблюдение (77,0 %). В постковидной группе этот показатель оказался радикально ниже — лишь 66 из 121 пациента (54,5 %) оставались свободными от аритмии ($p < 0,001$). Таким образом, почти половина больных, перенесших COVID-19, несмотря на исходно успешную абляцию, вернулись к аритмическому паттерну в течение первого года наблюдения. Отношение шансов рецидива предсердной тахикардии при наличии постковидного анамнеза составило 2,81 (95 % ДИ: 1,67–4,73), что выдвигает перенесенную коронавирусную инфекцию в разряд сильных независимых предикторов отдаленной неэффективности процедуры.

Для объяснения выявленной диссоциации между острым и отдаленным эффектом были проанализированы особенности структурного ремоделирования левого предсердия. По данным МСКТ, выполненной на дооперационном этапе, у постковидных пациентов почти в полтора раза чаще выявлялись дополнительные образования в полости левого предсердия и его ушке, подозрительные на тромбы или зоны выраженного спонтанного эхоконтрастирования: 43,8 % против 28,6 % в контроле ($p=0,007$; ОШ=1,95, 95 % ДИ: 1,19–3,18). Эти находки, не являясь абсолютным противопоказанием к абляции, маркируют глубокую эндотелиальную дисфункцию и протромботическую готовность, которая не устраняется изоляцией легочных вен.

Через 12 месяцев после абляции у пациентов с COVID-19 зафиксирован парадоксально меньший линейный размер левого предсердия (ЛП₂: 49,77±8,90 мм против 55,23±10,40 мм; $p=0,015$) при существенно более высокой частоте рецидивов, таблица 1. Данное наблюдение разрушает классическую логику «чем больше предсердие, тем хуже прогноз». Напротив, меньший размер ЛП в постковидной когорте отражает процесс фиброзной контрактуры — рубцового сморщивания ткани, которое создает диффузный электрически нестабильный субстрат, не нуждающийся в триггерах из легочных вен для поддержания аритмии.

В раннем послеоперационном периоде в Группе 2 отмечен более выраженный нейтрофильный ответ на абляционное повреждение (сегментоядерные нейтрофилы 66,00 % против 63,00 %; $p=0,012$), что может косвенно указывать на гиперергический воспалительный фон, способствующий реконнекции в зонах воздействия.

Однако наиболее показательные лабораторные сдвиги зафиксированы в отдаленные сроки. Через 12 месяцев у постковидных больных обнаружен уникальный биохимический диссонанс: уровень С-реактивного белка — классического маркера системного воспаления — оказался парадоксально низким (0,60 мг/л против 4,13 мг/л; $p=0,015$), в то время как концентрация фибриногена оставалась достоверно повышенной (3,50 г/л против 2,82 г/л; $p=0,030$). Дополняли эту картину относительная тромбоцитопения ($221 \times 10^9/\text{л}$ против $248 \times 10^9/\text{л}$; $p=0,025$) и тенденция к снижению СКФ (76,51 мл/мин/1,73 м² против 79,63 мл/мин/1,73 м²; $p=0,050$). Такой паттерн свидетельствует о переходе воспаления из острофазового ответа в хроническую прокоагулянтную и профибротическую стадию, при которой формально «нормальный» СРБ создает ложное ощущение благополучия, таблица 1.

Обсуждение

Находкой настоящего исследования является демонстрация глубокого разрыва между технической

Таблица 1.

Ключевые показатели эффективности катетерной абляции и ассоциированные с рецидивом факторы

Показатель	Группа 1 (без COVID-19)	Группа 2 (COVID-19)	p
Эффективность абляции			
Синусовый ритм при выписке, %	93,4	87,6	0,093
Свобода от аритмии через 12 мес., %	77,0	54,5	<0,001*
ОШ рецидива (95 % ДИ)	1,0 (референс)	2,81 (1,67–4,73)	<0,001*
Структурные предикторы неэффективности			
Доп. образования в ЛП (МСКТ), %	28,6	43,8	0,007*
Размер ЛП_2 через 12 мес., мм (M±SD)	55,23±10,40	49,77±8,90	0,015*
Лабораторные маркеры (через 12 мес.)			
СРБ, мг/л (Ме)	4,13	0,60	0,015*
Фибриноген, г/л (Ме)	2,82	3,50	0,030*
Тромбоциты, 10 ⁹ /л (Ме)	248	221	0,025*

* Различия считались значимыми при $p < 0,05$.

и клинической эффективностью катетерной абляции у пациентов с постковидным анамнезом. Тот факт, что острый успех процедуры был сопоставим в обеих группах ($p=0,093$), но годовая свобода от аритмии различалась почти на 23 процентных пункта ($p < 0,001$), указывает на фундаментальные изменения в самом аритмогенном субстрате, не затрагиваемые стандартной антральной изоляцией.

Данные Tankut E. et al. (2023) [4] и Mohanty S. et al. (2022) [3] также фиксировали более высокую частоту рецидивов у постковидных пациентов (38–41 % против 22 %), однако в этих работах не был детально проанализирован временной паттерн «ускользания» эффективности. В нашем исследовании впервые отчетливо показано, что проблема локализована не в периоперационном периоде, а развивается отсроченно, в сроки от 3 до 12 месяцев после вмешательства, что соответствует динамике прогрессирования фиброзных и иммуноопосредованных процессов. Три механизма, выявленные в нашей работе, объясняют, почему успешно выполненная изоляция легочных вен не гарантирует долгосрочного удержания ритма у постковидных больных.

По данным МСКТ, дополнительные массы в левом предсердии выявляются в 43,8 % случаев. Данный факт обусловлен повреждением эндотелия SARS-CoV-2 через рецептор ACE2, что приводит к системному эндотелии-

ту и микротромбозам [5]. Наличие таких масс даже при отрицательном результате чреспищеводной эхокардиографии в отношении крупных тромбов свидетельствует о существовании пристеночного протромботического слоя, который служит постоянным источником воспалительных медиаторов и поддерживает локальную электрическую гетерогенность.

В настоящем исследовании у пациентов с рецидивами отмечены меньшие размеры левого предсердия ($p = 0,015$), что противоречит традиционному представлению о дилатации ЛП как основном факторе, снижающем эффективность абляции. Согласно концепции фиброзной предсердной кардиомиопатии Kottkamp H. (2013) [7], диффузный фиброз, даже не увеличивая объем камеры, делает её электрически фрагментированной и способной поддерживать множественные re-entry независимо от венозных триггеров. Данные МРТ сердца после COVID-19 подтверждают наличие очагов неинфекционного фиброза у 60–78 % реконвалесцентов [6].

Через 12 месяцев наблюдения зарегистрирован диссонанс между низким уровнем СРБ и высоким фибриногена. Это соотносится с данными о долгосрочных последствиях COVID-19. Mandal S. с соавт. (2021) [8] показали, что у значительной доли пациентов после коронавирусной инфекции сохраняются лабораторные отклонения, в том числе повышенные уровни маркеров воспаления и гемостаза, даже при отсутствии клинических симптомов. СРБ, обладая коротким периодом полураспада (около 19 часов), быстро снижается по завершении острой фазы. Фибриноген же, регуляция которого осуществляется через более широкий спектр сигнальных путей (включая ИЛ-1, ИЛ-6 и ФНО- α), может оставаться патологически повышенным, что отражает вялотекущую персистенцию воспалительного процесса. Клиническая значимость этого наблюдения заключается в том, что мониторинг эффективности противовоспалительной терапии на основе одного лишь уровня СРБ у данной категории пациентов может давать ложноотрицательные результаты. В этом контексте фибриноген выступает более надёжным маркером сохраняющейся активности процесса, поддерживающего фиброгенез в миокарде предсердий.

Выводы

1. Катетерная абляция фибрилляции предсердий у пациентов, перенесших COVID-19, демонстрирует высокий непосредственный технический успех, сопоставимый с таковым у пациентов без коронавирусной инфекции (93,4 % против 87,6 %; $p=0,093$).
2. Отдаленная клиническая эффективность процедуры у постковидных больных резко снижается: через 12 месяцев свобода от предсердных тахикардий падает до 54,5% против 77,0% в контроле

($p < 0,001$), что соответствует почти трехкратному увеличению шансов рецидива ($ОШ=2,81$).

3. Основными детерминантами отсроченной неэффективности абляции являются: высокая частота внутрисердечных тромботических наложений

по данным МСКТ (43,8 %), констриктивный тип ремоделирования левого предсердия и персистирующая гиперфибриногенемия при парадоксально низком уровне СРБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hindricks G., Potpara T., Dagres N., et al. 2020 ESC Guidelines for the diagnosis and management of atrial fibrillation developed in collaboration with the European Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS) // *European Heart Journal*. — 2021. — Vol. 42, № 5. — P. 373–498. DOI: 10.1093/eurheartj/ehaa612.
2. Muskantow D.R., Turagam M.K., Sartori S., et al. Atrial fibrillation in patients hospitalized with COVID-19: incidence, predictors, and outcomes // *JACC: Clinical Electrophysiology*. — 2021. — Vol. 7, № 9. — P. 1120–1130. DOI: 10.1016/j.jacep.2021.02.009.
3. Mohanty S., La Frazia V.M., Gianni C., et al. COVID-19 infection and atrial fibrillation ablation outcomes: a multicenter study // *Heart Rhythm*. — 2022. — Vol. 19, № 5. — P. 721–728. DOI: 10.1016/j.hrthm.2022.02.009.
4. Tankut E., Gereide D.M., Bozyel S., et al. Impact of COVID-19 infection on the outcome of catheter ablation for atrial fibrillation // *Journal of Cardiovascular Electrophysiology*. — 2023. — Vol. 34, № 5. — P. 1089–1096. DOI: 10.1111/jce.15920.
5. Ackermann M., Verleden S.E., Kuehnle M., et al. Pulmonary vascular endothelialitis, thrombosis, and angiogenesis in COVID-19 // *New England Journal of Medicine*. — 2020. — Vol. 383, № 2. — P. 120–128. DOI: 10.1056/NEJMoa2015432.
6. Puntmann V.O., Carerj M.L., Wieters I., et al. Outcomes of cardiovascular magnetic resonance imaging in patients recently recovered from coronavirus disease 2019 (COVID-19) // *JAMA Cardiology*. — 2020. — Vol. 5, № 11. — P. 1265–1273. DOI: 10.1001/jamacardio.2020.3557.
7. Kottkamp H. Fibrotic atrial cardiomyopathy: a specific disease/syndrome supplying substrates for atrial fibrillation, atrial tachycardia, sinus node disease, AV node disease, and thromboembolic complications // *Journal of the American College of Cardiology*. — 2013. — Vol. 62, № 10. — P. 943–945. DOI: 10.1016/j.jacc.2013.05.015.
8. Mandal S., Barnett J., Brill S.E., et al. 'Long-COVID': a cross-sectional study of persisting symptoms, biomarker and imaging abnormalities following hospitalisation for COVID-19 // *Thorax*. — 2021. — Vol. 76, № 4. — P. 396–398. DOI: 10.1136/thoraxjnl-2020-215818.

© Кучеренко Сергей Викторович (sergeiviktorovichkucherenko@gmail.com); Корягина Наталья Александровна (nina11-85@mail.ru);

Корягин Владимир Сергеевич (vladimirkoryagin12@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОНКО-АССОЦИИРОВАННОЙ ВЕНОЗНОЙ ПАТОЛОГИИ НА КАЧЕСТВО ЖИЗНИ И ВЫРАЖЕННОСТЬ ПОСТТРОМБОТИЧЕСКОГО СИНДРОМА У ХРОНИЧЕСКИХ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ПАЦИЕНТОВ: РАЗРАБОТКА И ВАЛИДАЦИЯ ОПРОСНИКА ONCO-VTE-VEINQOL-28/VILLALTA

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF CANCER-ASSOCIATED VENOUS PATHOLOGY ON QUALITY OF LIFE AND SEVERITY OF POST-THROMBOTIC SYNDROME IN CHRONIC ONCOLOGICAL PATIENTS: DEVELOPMENT AND VALIDATION OF THE ONCO-VTE-VEINQOL-28/VILLALTA QUESTIONNAIRE

D. Matveev
M. Kuznetsov
D. Dolidze
S. Lebedev
S. Cheban

Summary. *Background:* Cancer-associated venous thromboembolism (CAT) and its chronic complications, including post-thrombotic syndrome (PTS) and chronic thromboembolic pulmonary hypertension, significantly impair the physical, emotional, and social well-being of cancer patients. Existing quality-of-life (QoL) instruments (EORTC QLQ-C30, VEINES-QOL/Sym, PEmb-QoL, SF-36) either do not account for the oncological context or fail to comprehensively assess venous symptoms in conjunction with post-thrombotic changes measured by the Villalta scale. *Objective:* To develop a combined questionnaire, Onco-VTE-VeinQoL-28/Villalta, for quantitative assessment of the impact of CAT on quality of life and PTS severity in chronic cancer patients, and to present a protocol for its psychometric validation. *Methods:* Based on a systematic literature review, patient focus groups, and expert evaluation, an initial pool of 28 self-reported items was developed (7-day recall period, 5-point Likert scale 0–4), covering domains of venous symptoms, functional limitations, somatic complaints, and psychological distress. Additionally, a physician-reported Villalta module was incorporated (5 symptoms + 5–6 clinical signs, scored 0–3). The following indices were calculated: IVS (0–40), IFO (0–32), IOSN (0–24), IPD (0–16), a composite QoL index (0–112), and total Villalta score (0–33+). A multicenter validation study (n=200) is designed to assess internal consistency (Cronbach's α), test-retest reliability (intraclass correlation coefficient, ICC), convergent and discriminant validity (correlation with EORTC QLQ-C30, VEINES-QOL/Sym, PEmb-QoL, and objective parameters), as well as responsiveness to change. *Expected Results:* The questionnaire is expected to demonstrate good psychometric performance (Cronbach's $\alpha > 0.8$, ICC > 0.7), moderate to strong correlations with established «gold standard» instruments

Матвеев Дмитрий Валентинович

доктор медицинских наук, профессор,
 ФГБОУ ДПО Российская медицинская академия
 непрерывного профессионального образования
 dvmatveev@mail.ru

Кузнецов Максим Робертович

доктор медицинских наук, профессор,
 Институт кластерной онкологии имени Л.Л. Левшина
 Сеченовского Университета; ГKB имени С.С. Юдина
 mrkuznetsov@mail.ru

Долидзе Давид Джонович

доктор медицинских наук, ученый секретарь,
 заведующий научно-клиническим отделом
 ГБУЗ ММНКЦ им. С.П. Боткина, г. Москва;
 профессор, ФГБОУ ДПО Российская медицинская
 академия непрерывного
 профессионального образования
 ddolidzed@mail.ru

Лебедев Сергей Сергеевич

доктор медицинских наук, профессор,
 ФГБОУ ДПО Российская медицинская академия
 непрерывного профессионального образования;
 заместитель главного врача по онкологии
 ГБУЗ ММНКЦ им. С.П. Боткина, г. Москва
 lebedevssd@yandex.ru

Чебан Сергей Валерьевич

врач-хирург, ГБУЗ МО Реутовская клиническая больница
 tchebansergiy@yandex.ru

Аннотация. *Введение.* Онкоассоциированная венозная тромбоземболия (CAT) и её хронические последствия — посттромботический синдром (PTS) и постэмболическая лёгочная гипертензия — значительно ухудшают физическое, эмоциональное и социальное благополучие пациентов с раком. Существующие опросники качества жизни (EORTC QLQ-C30, VEINES-QOL/Sym, PEmb-QoL, SF-36) либо не учитывают специфику онкологического статуса, либо не охватывают венозные симптомы в комплексе с посттромботическими изменениями, оцениваемыми шкалой Villalta. *Цель.* Разработать комбинированный опросник Onco-VTE-VeinQoL-28/Villalta для количественной оценки влияния CAT на качество жизни и тяжесть PTS у хронических онкологических больных, а также представить протокол его психометрической валидации. *Методы.* На основе систематического обзора литературы, фокус-групп с пациентами и экспертной оценки сформирован исходный пул из 28 вопросов самоотчёта (период 7 дней, шкала Лайкерта 0–4), объединяющих домены венозных симптомов, функциональных ограничений, со-

($r > 0.6$), and the ability to discriminate between patients with different degrees of PTS severity. *Conclusion:* The Onco-VTE-VeinQoL-28/Villalta questionnaire represents the first specialized instrument integrating CAT-specific quality-of-life assessment with objective PTS evaluation in chronic cancer patients. Upon completion of validation, it may be recommended for routine clinical practice and research use.

Keywords: cancer-associated thrombosis, quality of life, post-thrombotic syndrome, questionnaire validation, chronic cancer patients, VEINES-QoL/Sym, Villalta scale, EORTC QLQ-C30.

Введение

Современные достижения в онкологии привели к значительному увеличению выживаемости пациентов, в том числе с метастатическими формами рака. Это сформировало новую клиническую реальность — хроническое течение онкологического заболевания, при котором контроль над опухолевым процессом нередко сопровождается накоплением осложнений противоопухолевой терапии и сопутствующих состояний. Одним из наиболее частых и прогностически неблагоприятных осложнений является онкоассоциированная венозная тромбоэмболия (CAT — cancer-associated thrombosis) [1–5].

По данным российских и международных руководств, частота венозных тромбоэмболических осложнений (ВТЭО) у онкологических больных в 7–11 раз выше, чем в общей популяции, а при аутопсии признаки тромбоэмболии обнаруживаются у значительной доли умерших от рака [1]. Клинический спектр CAT включает тромбоз глубоких вен (ТГВ), тромбоэмболию лёгочной артерии (ТЭЛА), тромбоз поверхностных вен, катетер-ассоциированные тромбозы, а также их отдалённые последствия — посттромботический синдром (PTS) и пост-ТЭЛА синдром [1–5].

Острые эпизоды CAT ассоциированы с повышенной летальностью, прерыванием противоопухолевой терапии и госпитализациями. Однако для хронических онкологических больных не менее значимы долгосрочные последствия венозной патологии. Посттромботический

матических жалоб и психологического дистресса. Дополнительно включён врачебный модуль Villalta (5 симптомов + 5–6 признаков, оценка 0–3). Рассчитаны индексы: IVS (0–40), IFO (0–32), IOSN (0–24), IPD (0–16), сводный индекс QoL (0–112) и суммарный балл Villalta (0–33+). Представлен дизайн многоцентрового валидационного исследования с участием 200 пациентов, включающий оценку внутренней согласованности (α Кронбаха), ретестовой надёжности (ICC), конвергентной и дискриминантной валидности (корреляция с EORTC QLQ-C30, VEINES-QoL/Sym, PEmb-QoL и объективными параметрами), а также чувствительности к изменениям. *Ожидаемые результаты.* Предполагается, что опросник продемонстрирует хорошую психометрическую состоятельность ($\alpha > 0.8$, ICC > 0.7), умеренную-высокую корреляцию со шкалами — «золотыми стандартами» ($r > 0.6$) и способность различать пациентов с разной степенью PTS. *Заключение.* Onco VTE-VeinQoL-28/Villalta является первым специализированным инструментом, сочетающим оценку CAT-специфического качества жизни и объективизацию PTS у хронических онкологических больных. После завершения валидации опросник может быть рекомендован для рутинной клинической практики и научных исследований.

Ключевые слова: онко-ассоциированный тромбоз, качество жизни, пост-тромботический синдром, валидация опросника, хронические онкологические больные, VEINES-QoL/Sym, Villalta, EORTC QLQ-C30.

синдром, развивающийся у 20–50 % пациентов после перенесённого ТГВ, проявляется хронической болью, отёком, тяжестью в конечности, гиперпигментацией, индурацией кожи и, в тяжёлых случаях, трофическими язвами [6,7]. Аналогично, после ТЭЛА у части пациентов сохраняются одышка, снижение толерантности к физической нагрузке и тревога [8].

Качество жизни, связанное со здоровьем (HRQoL), у онкологических пациентов с CAT значительно ухудшается. В обзоре Morales Arteaga и соавт. (2024) подчёркивается, что HRQoL-ущерб не ограничивается острой фазой и усиливается при рецидивах ВТЭО, кровотечениях, развитии PTS, а также при распространённом раке и снижении функционального статуса [6]. Качественные исследования выявляют четыре основных механизма снижения качества жизни: симптомный (боль, отёк, одышка), психоэмоциональный (страх рецидива и кровотечения), механизм бремени лечения (длительные инъекции низкомолекулярных гепаринов) и системный (госпитализации, отмена противоопухолевой терапии) [6,9–11].

Для измерения HRQoL при венозной патологии предложен ряд валидированных инструментов. Наиболее распространёнными являются **VEINES-QoL/Sym** (26 пунктов, оценка венозных симптомов и качества жизни за 4 недели) [12], **PEmb-QoL** (около 40 пунктов, специфичный для ТЭЛА) [13,14], общие онкологические опросники **EORTC QLQ-C30** [15] и **SF-36** [16]. Однако каждый из этих инструментов имеет ограничения применительно к CAT. EORTC QLQ-C30 и SF-36 не содержат

венозно-специфических доменов (боль в конечности, отёк, судороги, изменение цвета кожи) и не позволяют оценить бремя антикоагулянтной терапии. VEINES-QoL/Sym и PEmb-QoL разработаны для неонкологических популяций и не учитывают специфические симптомы рака (устоляемость, тошноту, потерю аппетита) и взаимодействие с противоопухолевым лечением. Кроме того, ни один из существующих опросников не интегрирует в единую систему пациентскую оценку качества жизни и объективную врачебную оценку посттромботического синдрома по шкале Villalta, которая является «золотым стандартом» диагностики PTS [17,18].

В ответ на этот пробел нами был разработан комбинированный опросник **Onco-VTE-VeinQoL-28/Villalta**. Цель настоящей работы — представить этапы разработки опросника, описание его структуры, системы подсчёта индексов и протокол психометрической валидации, который в настоящее время реализуется в многоцентровом исследовании.

Методы разработки опросника

1. Теоретическая основа и отбор доменов

Разработка опросника проводилась в соответствии с рекомендациями по созданию и валидации инструментов измерения качества жизни, изложенными в руководствах DeVellis (2017) и Mokkink и соавт. (2010). На первом этапе был выполнен систематический обзор литературы, включающий публикации за 2015–2025 гг., посвящённые HRQoL при CAT и хронической венозной недостаточности. Основные домены, выделенные на основе обзора и качественных исследований (серия PELICAN, исследование EMPOWER и др.), включали:

- венозные симптомы (боль, тяжесть, отёк, судороги, парестезии, зуд, ухудшение к концу дня и после нагрузки);
- функциональные ограничения (ходьба, подъём по лестнице, домашние дела, самообслуживание, работа, физические упражнения);
- соматические симптомы, связанные с раком и терапией (одышка, усталость, нарушение сна, побочные эффекты, снижение аппетита/веса);
- психологический и социальный дистресс (тревога рецидива, депрессия, ограничение социальных контактов, общее ухудшение качества жизни).

Эти домены были сопоставлены с существующими опросниками: VEINES-QoL/Sym (венозные симптомы и ограничения) [12], PEmb-QoL (одышка, усталость, эмоциональные жалобы) [13,14], EORTC QLQ-C30 (функциональные шкалы, усталость, тошнота, боль, финансы) [15], SF-36 (общее здоровье, социальное функционирование) [16]. Также были включены два глобальных вопроса (общая оценка качества жизни и самочувствие ноги по 0–10) и вопрос о динамике за 4 недели.

2. Формирование исходного пула вопросов и выбор шкалы ответов

На основе доменов был сформирован исходный пул из 35 вопросов. После экспертной оценки (3 онколога, 2 гематолога, 2 флеболога) и когнитивных интервью с 10 хроническими онкологическими больными, перенёвшими CAT, количество вопросов было сокращено до 28. Критериями исключения были: дублирование содержания, низкая релевантность для целевой популяции, трудности в понимании. Все вопросы формулировались в виде простых, однозначных утверждений о состоянии за **последние 7 дней**, что соответствует периоду воспоминания, принятому в EORTC QLQ-C30 и удобному для клинического мониторинга [15].

Шкала ответов для вопросов 1–28 — пятибалльная шкала Лайкерта: 0 — «совсем нет или отсутствует», 1 — «слегка», 2 — «умеренно», 3 — «довольно сильно», 4 — «очень сильно». Такая шкала обеспечивает достаточную чувствительность и стандартизирована для всех доменов, что упрощает заполнение и расчёт суммарных индексов.

3. Врачебный модуль: шкала Villalta

В дополнение к самоотчёту пациента опросник включает врачебный модуль на основе шкалы Villalta, которая рекомендована для оценки посттромботического синдрома [17,18]. Модуль содержит 5 симптомов (боль, судороги, тяжесть, парестезии, зуд), оцениваемых пациентом, и 5–6 признаков (отёк, гиперпигментация/краснота, индурация/инфильтрация, расширение поверхностных вен, болезненность при сдавлении икры, а также отдельно — наличие язвы), оцениваемых врачом при осмотре. Каждый пункт оценивается от 0 («нет») до 3 («выраженный»). Суммарный балл Villalta (0–33 без учёта язвы) интерпретируется следующим образом: 0–4 — нет PTS, 5–9 — лёгкий, 10–14 — умеренный, ≥15 или наличие язвы — тяжёлый PTS [18].

4. Формирование индексов

На основе 28 вопросов самоотчёта рассчитываются четыре специфических индекса и один сводный индекс:

- **IVS (Index of Venous Symptoms)** — сумма ответов на вопросы 1–10 (диапазон 0–40), отражает выраженность венозной симптоматики.
- **IFO (Index of Functional Obstacles)** — сумма ответов на вопросы 11–18 (0–32), оценивает функциональные ограничения.
- **IOSN (Index of Other Somatic and Nonspecific Symptoms)** — сумма ответов на вопросы 19–24 (0–24), характеризует соматические жалобы, связанные с раком и терапией.
- **IPD (Index of Psychological Distress)** — сумма ответов на вопросы 25–28 (0–16), отражает психологический и социальный дистресс.

- Сводный индекс качества жизни — сумма всех 28 вопросов (0–112), интегральная оценка.

Предложены ориентировочные градации тяжести для каждого индекса (например, для IVS: 0–9 — минимальные симптомы, 10–19 — лёгкие, 20–29 — умеренные, 30–40 — выраженные), которые в дальнейшем будут уточнены по результатам валидационного исследования.

Протокол валидационного исследования

Валидация опросника Onco-VTE-VeinQoL-28/Villalta проводится в соответствии с международными стандартами COSMIN (COnsensus-based Standards for the selection of health Measurement INstruments). Дизайн — многоцентровое проспективное обсервационное исследование.

1. Дизайн и популяция

Планируется включить 200 пациентов из 4 онкологических центров (Россия). Критерии включения: возраст ≥ 18 лет; гистологически подтверждённое злокачественное новообразование любой локализации (включая гематологические опухоли); перенесённый в анамнезе симптомный или инцидентальный ТГВ и/или ТЭЛА (диагноз подтверждён инструментально) не менее чем за 3 месяца до включения; наличие признаков посттромботического синдрома (сумма по Villalta ≥ 5) или их отсутствие; стабильное состояние (отсутствие острого рецидива ВТЭО или кровотечения в последние 30 дней); подписанное информированное согласие.

Критерии исключения: пациенты с активным кровотечением или высоким риском кровотечения (тромбоциты $< 50 \times 10^9/\text{л}$, неконтролируемая артериальная гипертензия, недавнее внутричерепное кровоизлияние); тяжёлые когнитивные нарушения, препятствующие заполнению опросников; ожидаемая продолжительность жизни менее 3 месяцев.

2. Этапы валидации и используемые инструменты

2.1. *Внутренняя согласованность* будет оцениваться с помощью коэффициента α Кронбаха для каждого индекса (IVS, IFO, IOSN, IPD) и сводного индекса. Значение $\alpha \geq 0,7$ считается приемлемым, $\alpha \geq 0,8$ — хорошим.

2.2. *Ретестовая надёжность* (стабильность во времени) будет оцениваться у подгруппы из 50 пациентов, которые заполняют опросник дважды с интервалом 7–10 дней (в стабильном клиническом состоянии, без изменения терапии). Будет рассчитан внутриклассовый коэффициент корреляции (ICC) для каждого индекса. Значение ICC $\geq 0,7$ считается удовлетворительным, $\geq 0,8$ — хорошим.

2.3. *Конвергентная валидность* — оценка корреляции между индексами Onco-VTE-VeinQoL-28 и существующими валидированными опросниками. Используются:

- **VEINES-QOL/Sym** [12] — для оценки венозных симптомов и качества жизни (ожидается высокая корреляция с IVS и IFO, $r > 0,7$).
- **PEmb-QoL** [13,14] — для пациентов с перенесённой ТЭЛА (ожидается умеренная-высокая корреляция с IOSN и IPD, $r > 0,6$).
- **EORTC QLQ-C30** [15] — для оценки общего онкологического качества жизни (ожидается умеренная корреляция со сводным индексом QoL и IPD, $r = 0,5–0,7$).
- **Шкала Villalta** (врачебная оценка) — для конвергенции с IVS и IFO (ожидается $r > 0,6$).

2.4. *Дискриминантная валидность* (известных групп) будет оцениваться путём сравнения индексов между группами пациентов с разной степенью PTS (нет PTS, лёгкий, умеренный, тяжёлый) по шкале Villalta. Нулевая гипотеза: отсутствие различий между группами. Ожидается, что пациенты с тяжёлым PTS будут иметь значительно более высокие баллы IVS, IFO и сводного индекса по сравнению с группой без PTS ($p < 0,05$, ANOVA с поправкой).

2.5. *Факторная валидность* (конструктивная) будет оценена с помощью конфирматорного факторного анализа (CFA) для проверки четырёхфакторной модели (венозные симптомы, функциональные ограничения, соматические симптомы, психологический дистресс). Будут рассчитаны индексы согласия: $\chi^2/\text{df} < 3$, CFI $\geq 0,90$, RMSEA $\leq 0,08$, SRMR $\leq 0,08$.

2.6. *Чувствительность к изменениям* (способность detect клинически значимые изменения) будет оценена у пациентов, которые начинают новое лечение (например, компрессионную терапию, смену антикоагулянта). Опросник будет заполняться до и через 3 месяца после вмешательства. Будет рассчитан стандартизированный отклик (SRM = среднее изменение / стандартное отклонение изменения). Значение SRM $\geq 0,5$ считается умеренной чувствительностью, $\geq 0,8$ — высокой.

2.7. *Время заполнения и приёмлемость* будут оценены путём регистрации времени, затраченного пациентом на заполнение 28 вопросов, и опроса о лёгкости понимания (по шкале 1–5). Дополнительно будет оценен процент пропущенных ответов.

3. Этические аспекты

Исследование одобрено локальным этическим комитетом Института кластерной онкологии имени Л.Л. Левшина ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова» Минз-

драва России (Сеченовский Университет) (протокол № 12/2025 от 15.03.2025). Все пациенты подписывают информированное согласие. Данные деидентифицируются и обрабатываются в зашифрованном виде.

Результаты (предварительные данные пилотного тестирования)

На этапе пилотного тестирования ($n=30$) были получены следующие предварительные результаты, которые требуют подтверждения на полной выборке.

1. Распределение баллов и потолка/пола эффекты

Средний сводный индекс QoL составил $58,4 \pm 18,2$ (диапазон 24–89), что соответствует «умеренным» проблемам. Доля пациентов с максимальным баллом (112) — 0 %, с минимальным (0) — 0 %, что свидетельствует об отсутствии существенного потолка или пола эффекта. Средний балл IVS — $18,2 \pm 8,1$ (лёгкие–умеренные симптомы), IFO — $14,5 \pm 7,3$, IOSN — $10,1 \pm 5,2$, IPD — $7,8 \pm 3,9$.

2. Предварительная внутренняя согласованность

α Кронбаха составила: IVS — 0,87, IFO — 0,84, IOSN — 0,79, IPD — 0,82, сводный индекс — 0,91, что превышает порог 0,7 и указывает на хорошую согласованность.

3. Предварительная ретестовая надёжность ($n=15$)

ICC для сводного индекса составил 0,88 (95 % ДИ 0,72–0,95), для IVS — 0,85, IFO — 0,82, IOSN — 0,78, IPD — 0,80. Все значения выше 0,7, что подтверждает стабильность во времени.

4. Предварительная конвергентная валидность

Корреляция (коэффициент Спирмена) сводного индекса QoL с общим баллом EORTC QLQ-C30 (глобальное качество жизни) составила $r=0,72$ ($p < 0,001$); с VEINES-QOL — $r=0,68$ ($p < 0,001$). Корреляция IVS с суммарным баллом Villalta — $r=0,65$ ($p < 0,001$). Эти значения соответствуют ожидаемым и свидетельствуют о хорошей конвергенции.

5. Предварительная дискриминантная валидность

Пациенты с тяжёлым PTS (Villalta ≥ 15 , $n=8$) имели значительно более высокий сводный индекс QoL ($74,5 \pm 12,1$) по сравнению с пациентами без PTS (Villalta 0–4, $n=10$; $41,2 \pm 10,3$; $p < 0,001$). Различия также были значимы для IVS ($30,1 \pm 6,2$ vs $10,5 \pm 4,1$, $p < 0,001$) и IFO ($25,3 \pm 5,5$ vs $8,2 \pm 3,9$, $p < 0,001$).

6. Время заполнения и приёмлемость

Медиана времени заполнения 28 вопросов составила 8 минут (интерквартильный размах 6–11 минут). 96 %

пациентов оценили опросник как «лёгкий» или «очень лёгкий» для понимания. Пропущенных ответов не было (0 %).

Обсуждение

Разработанный опросник Onco-VTE-VeinQoL-28/Villalta представляет собой первый специализированный инструмент, объединяющий в себе оценку качества жизни, ориентированную на пациента (patient-reported outcome, PRO), и объективную врачебную оценку посттромботического синдрома у хронических онкологических больных, перенёсших CAT.

Сравнение с существующими инструментами.

В отличие от EORTC QLQ-C30 [15], который является «золотым стандартом» в онкологии, но не содержит венозно-специфических доменов, наш опросник включает 10 вопросов о венозных симптомах (боль, тяжесть, отёк, судороги, парестезии, зуд, ухудшение при нагрузке и к концу дня). Эти симптомы, как показано в обзоре Morales Arteaga и соавт. [6], являются основными драйверами снижения HRQoL при PTS. В отличие от VEINES-QOL/Sym [12], разработанного для неонкологических пациентов с ТГВ, наш опросник учитывает специфические для рака соматические жалобы (утомляемость, нарушение сна, побочные эффекты терапии, снижение аппетита/веса) и психологический дистресс, связанный со страхом рецидива тромбоза и кровотечения. Как подчёркивается в национальном опросе Carrier и соавт. (2025), 54,1 % пациентов с CAT прямо сообщают о негативном влиянии тромбоза на качество жизни, а низкая информированность о CAT усиливает тревогу [9]. Наш опросник включает отдельный вопрос о тревоге рецидива (Q25), что позволяет количественно оценить этот важный психосоциальный компонент.

Интеграция шкалы Villalta. Отличительной особенностью нашего опросника является комбинация PRO с врачебной шкалой Villalta [17,18]. Это позволяет не только оценить субъективное восприятие пациентом своего состояния, но и объективизировать степень PTS, что критически важно для принятия решений о компрессионной терапии, физической реабилитации и длительности антикоагуляции. Шкала Villalta рекомендована международными руководствами для диагностики PTS [18], но в рутинной практике онкологов она используется редко. Встроенный модуль в составе опросника повышает вероятность её систематического применения.

Клиническая применимость. Время заполнения опросника (медиана 8 минут) сопоставимо с EORTC QLQ-C30 (около 10 минут) и значительно меньше, чем суммарное заполнение нескольких опросников (EORTC QLQ-C30 + VEINES-QOL/Sym + Villalta). Простая 5-балльная шкала и унифицированный период воспоминания

(7 дней) облегчают заполнение даже для ослабленных пациентов. Высокая приёмлемость (96 % пациентов оценили опросник как лёгкий) и отсутствие пропущенных ответов в пилотном исследовании свидетельствуют о хорошей понятности и релевантности вопросов.

Потенциальные области использования. После завершения полной валидации опросник может быть рекомендован для:

- рутинного скрининга нарушений качества жизни и PTS в онкологических амбулаториях;
- выбора между различными режимами антикоагуляции (например, пероральные ПОАК vs инъекции НМГ) с учётом бремени лечения;
- мониторинга эффективности реабилитационных вмешательств (компрессионный трикотаж, лечебная физкультура, психоонкологическая поддержка);
- использования в качестве конечной точки в клинических исследованиях новых антикоагулянтов или методов профилактики PTS у онкологических больных.

Ограничения исследования и опросника. Настоящая работа представляет протокол валидации и предварительные данные пилотного этапа. Полная валидация будет завершена после набора 200 пациентов и анализа всех психометрических свойств. К потенциальным ограничениям опросника можно отнести:

- Отсутствие модуля для оценки качества жизни при катетер-ассоциированных тромбозах (вопросы ориентированы на нижние конечности, тогда как тромбозы могут возникать в верхних конечностях и системе верхней полой вены). В будущем возможно создание дополнительного модуля.

- Шкала Villalta валидирована для нижних конечностей; для тромбозов верхних конечностей требуется отдельная врачебная шкала.
- Опросник не включает специфических вопросов о сексуальной функции и финансовых трудностях, которые могут быть актуальны для некоторых пациентов (хотя EORTC QLQ-C30 содержит вопрос о финансовых трудностях [15]).
- Период воспоминания 7 дней может не отражать хронические изменения, которые развиваются медленно; для некоторых целей может потребоваться период 4 недели (как в VEINES-QOL/Sym [12] или SF-36 [16]).

Тем не менее, на наш взгляд, преимущества специализированного и одновременно комплексного подхода перевешивают эти ограничения.

Заключение

Onco VTE VeinQoL-28/Villalta является новым, многообещающим инструментом для оценки влияния онкоассоциированной венозной патологии на качество жизни и тяжесть посттромботического синдрома у хронических онкологических больных. Предварительные данные пилотного исследования свидетельствуют о хорошей внутренней согласованности, ретестовой надёжности, конвергентной и дискриминантной валидности. После завершения полной валидации (план которой представлен в данной статье) опросник может быть рекомендован для использования в клинической практике и научных исследованиях. Дальнейшие работы будут направлены на подтверждение факторной структуры, чувствительности к изменениям и разработку минимального клинически важного различия (MCID).

ЛИТЕРАТУРА

1. Сомонова О.В., Антух Э.А., Варданян А.В., Громова Е.Г., Долгушин Б.И., Елизарова А.Л., Сакаева Д.Д., Сельчук В.Ю., Трякин А.А., Черкасов В.А. Тромбоэмболические осложнения. Практические рекомендации RUSSCO, часть 2. Злокачественные опухоли. 2024;14(3s2):202–215. DOI: 10.18027/2224–5057-2024-14-3s2-2–12.
2. Falanga A., Ay C., Di Nisio M., Gerotziakas G., Langer F., Lecumberri R., Mandala M., Maraveyas A., Pabinger I., Jara-Palomares L., Sinn M., Syrigos K., Young A., Jordan K.; ESMO Guidelines Committee. Venous thromboembolism in cancer patients: ESMO Clinical Practice Guideline. Annals of Oncology. 2023;34(5):452–467. DOI: 10.1016/j.annonc.2022.12.014.
3. Farge D., Frere C., Connors J.M., Khorana A.A., Kakkar A., Ay C., Muñoz A., Brenner B., et al; International Initiative on Thrombosis and Cancer (ITAC) advisory panel. 2022 international clinical practice guidelines for the treatment and prophylaxis of venous thromboembolism in patients with cancer, including patients with COVID-19. The Lancet Oncology. 2022;23(7): e334–e347. DOI: 10.1016/S1470-2045(22)00160-7.
4. Key N.S., Khorana A.A., Kuderer N.M., Bohlke K., Lee A.Y.Y., Arcelus J.I., Wong S.L., Balaban E.P., Flowers C.R., Gates L.E., Kakkar A.K., Tempero M.A., Gupta S., Lyman G.H., Falanga A. Venous Thromboembolism Prophylaxis and Treatment in Patients with Cancer: ASCO Guideline Update. Journal of Clinical Oncology. 2023;41(16):3063–3071. DOI: 10.1200/JCO.23.00294.
5. Lyman G.H., Carrier M., Ay C., Di Nisio M., Hicks L.K., Khorana A.A., et al. American Society of Hematology 2021 guidelines for management of venous thromboembolism: prevention and treatment in patients with cancer. Blood Advances. 2021; 5:927–974. DOI: 10.1182/bloodadvances.2020003442.
6. Morales Arteaga A.J., Font C., Rojas-Hernandez C.M. Quality of life in oncological patients with venous thromboembolic disease. Research and Practice in Thrombosis and Haemostasis. 2024;8(5):102510. DOI: 10.1016/j.rpth.2024.102510.
7. Kahn S.R., Comerota A.J., Cushman M., Evans N.S., Ginsberg J.S., Goldenberg N.A., et al. The postthrombotic syndrome: evidence-based prevention, diagnosis, and treatment strategies. Circulation. 2014;130(18):1636–1661. DOI: 10.1161/CIR.0000000000000130.

8. Klok F.A., van der Hulle T., den Exter P.L., Lankeit M., Huisman M.V., Konstantinides S. The post-PE syndrome: a new concept for chronic complications of pulmonary embolism. *Blood Reviews*. 2014;28(6):221–226. DOI: 10.1016/j.blre.2014.07.003.
9. Carrier M., et al. Patient's Awareness of Cancer-Associated Thrombosis: A Canadian Nationwide Survey. *TH Open*. 2025;9: a26359296. DOI: 10.1055/a-2635-9296.
10. Font C., Gomez-Mesa J.E., López-Núñez J.J.J., Calderón C., Galindo-Coral S., Wu C.C., Ma J., Kroll M.H., Rojas-Hernandez C.M. Measurement of adherence and health-related quality of life during anticoagulation therapy in cancer-associated venous thromboembolism (VTE): a multicenter quantitative study. *Supportive Care in Cancer*. 2023;31(10):615. DOI: 10.1007/s00520-023-08073-y.
11. Baddeley E., Torrens-Burton A., Newman A., Nelson A., Pease N., Nelson R., et al. A mixed-methods study to evaluate a patient-designed tool to reduce harm from cancer-associated thrombosis: The EMPOWER study. *Research and Practice in Thrombosis and Haemostasis*. 2021;5: e12545. DOI: 10.1002/rth2.12545.
12. Kahn S.R., Lamping D.L., Ducruet T., Arsenaault L., Miron M.J., Roussin A., et al. VEINES-QOL/Sym questionnaire was a reliable and valid disease-specific quality of life measure for deep venous thrombosis. *Journal of Clinical Epidemiology*. 2006; 59:1049–1056. DOI: 10.1016/j.jclinepi.2005.10.016.
13. Cohn D.M., Nelis E.A., Busweiler L.A., Kaptein A.A., Middeldorp S. Quality of life after pulmonary embolism: the development of the PEmb-QoL questionnaire. *Journal of Thrombosis and Haemostasis*. 2009; 7:1044–1046. DOI: 10.1111/j.1538-7836.2009.03341.x.
14. Klok F.A., Cohn D.M., Middeldorp S., Scharloo M., Büller H.R., van Kralingen K.W., et al. Quality of life after pulmonary embolism: validation of the PEmb-QoL questionnaire. *Journal of Thrombosis and Haemostasis*. 2010; 8:523–532. DOI: 10.1111/j.1538-7836.2009.03726.x.
15. Aaronson N.K., Ahmedzai S., Bergman B., Bullinger M., Cull A., Duez N.J., et al. The European Organization for Research and Treatment of Cancer QLQ-C30: a quality-of-life instrument for use in international clinical trials in oncology. *Journal of the National Cancer Institute*. 1993;85(5):365–376. DOI: 10.1093/jnci/85.5.365.
16. Ware J.E. Jr, Sherbourne C.D. The MOS 36-item short-form health survey (SF-36). I. Conceptual framework and item selection. *Medical Care*. 1992;30(6):473–483.
17. Villalta S., Bagatella P., Piccioli A., Lensing A.W., Prins M.H., Prandoni P. Assessment of validity and reproducibility of a clinical scale for the post-thrombotic syndrome. *Haemostasis*. 1994;24(Suppl 1):158a.
18. Kahn S.R., Partsch H., Vedantham S., Prandoni P., Kearon C. Definition of post-thrombotic syndrome of the leg for use in clinical investigations: a recommendation for standardization. *Journal of Thrombosis and Haemostasis*. 2009;7(5):879–883. DOI: 10.1111/j.1538-7836.2009.03294.x.

© Матвеев Дмитрий Валентинович (dvmatveev@mail.ru); Кузнецов Максим Робертович (mrkuznetsov@mail.ru);

Долидзе Давид Джонович (ddolidzed@mail.ru); Лебедев Сергей Сергеевич (lebedevssd@yandex.ru);

Чебан Сергей Валерьевич (tchebansergiy@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОПЫТ ЭНУКЛЕАЦИИ ПРИ РАДИКУЛЯРНЫХ КИСТАХ ЧЕЛЮСТНЫХ КОСТЕЙ С МАКСИМАЛЬНЫМ СОХРАНЕНИЕМ ОБЪЁМА КОСТНОЙ ТКАНИ

EXPERIENCE IN ENUCLEATION OF RADICULAR CYSTS OF THE JAWS WITH MAXIMUM PRESERVATION OF BONE VOLUME

**A. Piotrovich
Yu. Pavlyenko**

Summary. Radicular cysts are localized bone reactions around the tooth apex that occur following pulp necrosis. The ultimate goal of reconstructive surgical treatments for the resulting intraosseous defects is the regeneration of lost bone tissue.

The objective of this study was to evaluate the clinical and radiological outcomes after the removal of two large periapical lesions of approximately equal size, located in the mental region of the mandible, using a natural biological substrate [platelet-rich fibrin (PRF)]. In the first case, a wide bone access was created, allowing visualization of the entire vestibular surface of the cyst lining. In the second case, access was achieved through two perforations, the diameters of which were significantly smaller than in the first case, yet sufficient for clear visualization of the surgical field. The postoperative follow-up period was 12 months. Subsequent tomographic examinations revealed significant periapical recovery with nearly adequate bone formation, though differences in the volume of bone restoration were observed.

Keywords: bone regeneration, radicular cyst, platelet-rich fibrin.

Пiotрович Альбина Викторовна

кандидат медицинских наук, доцент, Федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования Южно-Уральский
государственный медицинский университет
pialvik@mail.ru

Павлиенко Юлия Викторовна

кандидат медицинских наук, доцент, Федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования Южно-Уральский
государственный медицинский университет
pavlienko74@mail.ru

Аннотация. Радикулярные кисты представляют собой локальные костные реакции вокруг верхушки корня зуба, возникающие после некроза пульпы. Конечная цель хирургических методов лечения образовавшихся внутрикостных дефектов — регенерация утраченной костной ткани.

Целью данной работы было оценить клинические и рентгенологические результаты лечения после удаления двух больших периапикальных поражений, расположенных в ментальном отделе нижней челюсти, с применением натурального биологического субстрата [обогащенного тромбоцитами фибрина (PRF)]. В первом случае создавали широкий костный доступ, позволяющий видеть всю вестибулярную поверхность оболочки кисты, во втором случае доступ осуществлялся через два перфорационных отверстия, диаметр которых был значительно меньше, чем в первом случае, однако достаточным для хорошей визуализации операционного поля. Период послеоперационного наблюдения составил 12 месяцев, по истечении которых на проведенных томографических исследованиях было отмечено периапикальное восстановление с почти адекватным формированием костной ткани, но с отличием восстановления её по объему в представленных случаях.

Ключевые слова: костная регенерация, радикулярная киста, фибрин, обогащённый тромбоцитами.

Введение

Наиболее распространенной формой кистозных образований челюстных костей являются радикулярные кисты (РК). Частота встречаемости колеблется от 35–87 % всех одонтогенных кист, из них до 5 % являются остаточными кистами [1]. Развитие РК является заключительной фазой длительного воспалительного процесса в ответ на апикальное инфицирование [2]. Как правило, они диагностируются в поздние сроки, порой случайно во время стоматологического или рентгенологического исследования ЧЛЮ, на котором визуализируется прогрессирующее увеличение размера поражения кости [3].

Распространенными методами лечения радикулярных кист являются цистотомия и цистэктомия. Выбор всегда зависит от размера деструктивного очага, его расположения относительно важных анатомических структур, но приоритет сохраняется за периапикальной хирургией — энуклеацией с последующей апиэктомией [4]. Реконструкция остаточной костной полости после энуклеации радикулярной кисты в значительной степени зависит от успешности процесса регенерации тканей. Sabbagh M и др. (2025) высказали мнение, что скорость заживления костной полости без использования костнозамещающего материала в основном остаётся относительно постоянной независимо от локализации формы

и размера поражения, а также возраста и пола пациента [5]. Известно, что спонтанная костная регенерация остаточной полости в челюсти имеет биологическую основу и является генетически предрасположенным процессом. Это связано с физиологией ремоделирования, постоянной резорбцией и аппозицией кости [6]. Сохранившиеся костные стенки обеспечивают достаточное количество остеопрогениторных клеток для дальнейшего образования кости. Согласно Клиническим рекомендациям, во время проведения хирургической операции следует удалять весь кортикальный слой кости в проекции верхушки причинного зуба (зубов) над кистой по периметру костного дефекта, обнажая стенку кисты [7]. По мнению А.А. Кулакова (2018 г.), Rațiu CA (2020) для обеспечения быстрой репарации костной полости размер сформированного костного дефекта в операционной зоне должен быть минимальным, поэтому хирургическая техника должна быть менее агрессивной [8]. Оставшиеся стенки костной полости, даже если они истонченные, позволяют сохранить кровяной сгусток внутри образовавшегося дефекта костной ткани, потому что главной причиной осложнений считается отслоение тромба от стенок костной раны, приводящее к инфицированию [9]. Многообещающие результаты были представлены по применению в хирургии полости рта богатого тромбоцитами фибрина (PRF) [10]. По мнению Chou T-M. (2020) ключевым фактором стабилизации тромба служит применяемый фибриновый сгусток. За счет содержания лейкоцитов он способен ограничивать воспалительный процесс, снижать вероятность инфицирования тканей от десеминации микроорганизмов и действия фагоцитарных лизосомальных ферментов [11, 12]. Его фибриновая матрица обладает механической прочностью, поддерживая клетки на начальной стадии заживления: с материалом возможно обращаться, как с настоящим твердым трансплантатом, что и создает стабилизацию кровяного тромба и герметизирующее состояние в костной полости [9]. Из фибринового трансплантата в период от 3 до 10 дней с момента операции происходит высвобождение таких факторов роста, как тромбоцитарный фактор роста (PDGF), трансформирующий фактор роста $\beta 1$ (TGF $\beta 1$), инсулиноподобный фактор роста (IGF) и др., оказывающих влияние на миграцию, пролиферацию и дифференцировку клеток [13]. Приготовление PRF непосредственно в хирургическом стоматологическом кабинете является достаточно простым и экономически эффективным процессом, позволяющим получить качественный сгусток фибринового геля.

Немаловажной задачей хирургического лечения РК является сохранение функциональности причинных зубов после проведенной цистэктомии [14]. Известно, что потеря зуба влечет за собой нерегулируемую атрофию костной ткани. При одновременном с энуклеацией удалении причинных зубов объем альвеолярной кости неминуемо снижается, в то же время сохранение ранее

девителизированных зубов, приведших к образованию кисты, до сих пор является предметом споров и полемики среди стоматологов-хирургов. Как правило, такие зубы часто сохраняются, и многие авторы рекомендуют ретроградно obturировать резецированный участок корневого канала зуба, во время проведения операции, однако единого мнения насчет обязательного выполнения этой манипуляции нет. [15]. Ку J.K. и др. (2024) после проведения собственного исследования сделали вывод, что независимо от использования ретроградной пломбировки после апикозектомии, успех сохранности зубов в течение 3,5 лет, не подвергавшихся ретроградной пломбировке, составил 99,2 % (включая случаи радикулярных кист). Значит, резецирование верхушки корня само по себе является эффективным методом лечения зубов [16].

Цель исследования: анализ заживления костных полостей после проведенной энуклеации при радикулярных кистах челюстей с различным объемом оперативного доступа при применении PRF в чистом виде и сохранении причинных зубов.

Материалы и методы

В исследовании на основании клинических и рентгенологических данных оценивалось восстановление кистозных дефектов челюсти у двух пациентов после проведения энуклеации с широким и локальным костным доступом. Пациенты сопоставимы по возрасту, локализации очагов патологического процесса, сопутствующей патологии нет, анамнез не отягощен.

Хирургическое лечение проводилось в плановом порядке. Выполнялись разрезы вдоль маргинального десневого края и дополнительно вертикальные, что обеспечило оптимальную конструкцию слизисто-надкостничного лоскута после его отслоения. Удаление кистозной ткани проводилось с использованием специальных curettes для аугментации синуса. После апикозектомии ретроградное пломбирование культи корней сохранившихся зубов не выполнялось. В качестве наполнителя остаточной костной полости применялся сгусток PRF, заполняющий весь костный дефект. С вестибулярной стороны костное окно перекрывалось резорбируемой коллагеновой мембраной «Остеопласт» для предотвращения погружения мягких тканей внутрь полости [17]. В послеоперационном периоде пациенты получали перорально антибиотики широкого спектра действия (875 мг амоксициллина и 125 мг клавулановой кислоты) совместно с НПВС (ибупрофен) в течение 6 дней. В раннем послеоперационном периоде у обоих пациентов отсутствовали признаки инфицирования, не определялось расхождения краев раны, швы удалялись на 10 суток наблюдения.

Клинический случай 1

Пациент 35 лет с жалобами на постоянный дискомфорт в ментальном отделе нижней челюсти. Ранее была проведена зубо-сохраняющая операция (РВК) на 4.1 и 3.1 зубах, но по причине осложненного послеоперационного заживления зубы были удалены. Клинический осмотр выявил наличие мостовидной конструкции с опорой на 4.2 и 3.2 зубы, с вестибулярной стороны на уровне альвеолярной части между зубами определялось безболезненное выбухание на фоне бледно-розовой слизистой оболочки, перкуссия зубов 4.2 и 3.2 безболезненная. На слизистой оболочке в ментальной области. Имеются рубцовые изменения, сформировавшиеся после ранее проведенного вмешательства (рис. 1).

Предоперационная рентгенограмма (рис. 2) показала наличие участка просветления костной ткани округлой формы с четко очерченной границей, занимающего всю ментальную часть от 4.2 до 3.2 зубов, с полным отсутствием наружной кортикальной пластинки размером 15,0×9,72 мм, указанные зубы ранее подвергались эндо-

донтическому лечению. Предварительный диагноз — радикулярная киста нижней челюсти (K04.8). Запланировано хирургическое лечение с апиэктомией зубов 4.2 и 3.2 без повторного вмешательства в корневые каналы. Этапы операции представлены на рисунках. Во время проведения операции после отслоения слизисто-надкостного лоскута сразу был визуализирован костный дефект округлой формы и обнаженная кистозная оболочка (рис. 3). Для проведения дальнейших манипуляций объем костного дефекта не был увеличен, поскольку оказался достаточным для осмотра корневой части причинных зубов. Адаптированные мягкие ткани зажили первичным натяжением (рис. 4).

Клинический случай 2

Пациент 30 лет обратился в клинику с жалобами на наличие отека в области передней группы зубов нижней челюсти, боль, гноетечение из-под десневого края 3.1 и 3.2 зубов, их подвижность. Из анамнеза — появление отека отмечено впервые, в детстве получил травму вследствие удара в подбородок. Во время клинического



Рис. 1. Ментальный отдел до операции

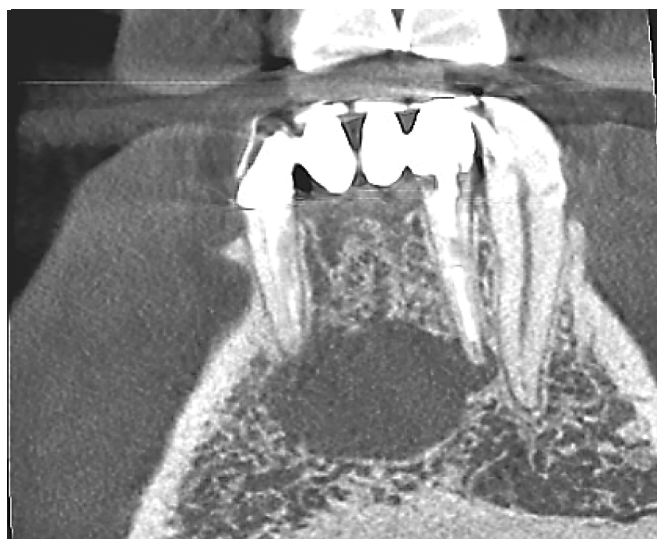


Рис. 2. Реформатор КЛКТ — корональная проекция



Рис. 3. Костная полость после энуклеации



Рис. 4. 12 месяцев после проведения операции

осмотра обнаружены скученно расположенные витальные зубы 4.2, 4.1, 3.1 и 3.2, слизистая оболочка в проекции корней зубов с вестибулярной стороны отечна, при пальпации определяется болезненность, целостность костной структуры сохранена, подвижность 3.1 и 3.2 зубов II–III степени. ЭОД 4.2, 4.1, 3.1 и 3.2 — более 60 мкА. КЛКТ исследование выявило наличие внутрикостного очага просветления костной ткани округлой

формы с четким контуром размером 9,14×9,93 мм без вовлечения наружной кортикальной пластинки (рис. 5). В область очага выстояли апексы корней 3.1 и 3.2 зубов, на протяжении всей длины корней зубов определялся истонченный кортикальный слой кости, не прилегающий к их поверхности (рис. 6). Вершины корней 4.1 и 4.2 зубов расположены на границе поражения, но не находятся в полости. Предварительный диагноз — ра-

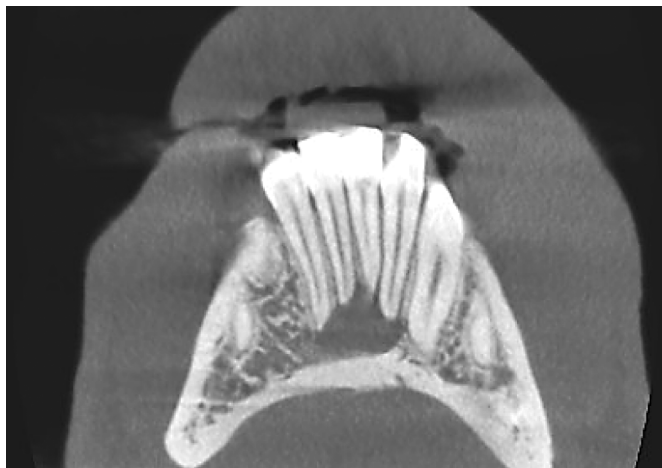


Рис. 5. Реформатор КЛКТ — корональная проекция



Рис. 6. Реформатор КЛКТ — сагитальная проекция

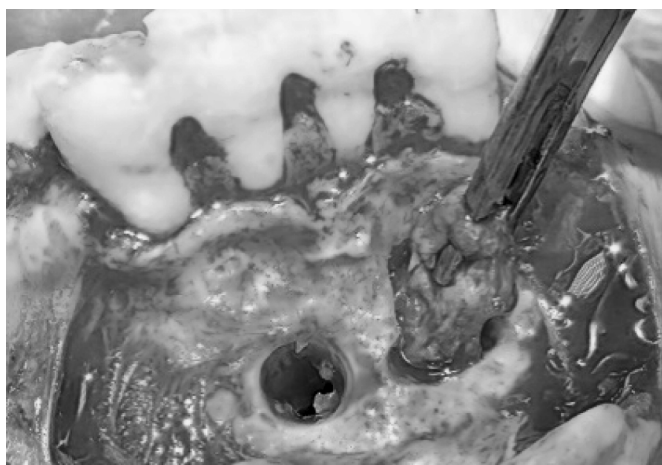


Рис. 7. Энуклеация кистозной оболочки



Рис. 8. Применение коллагеновой мембраны

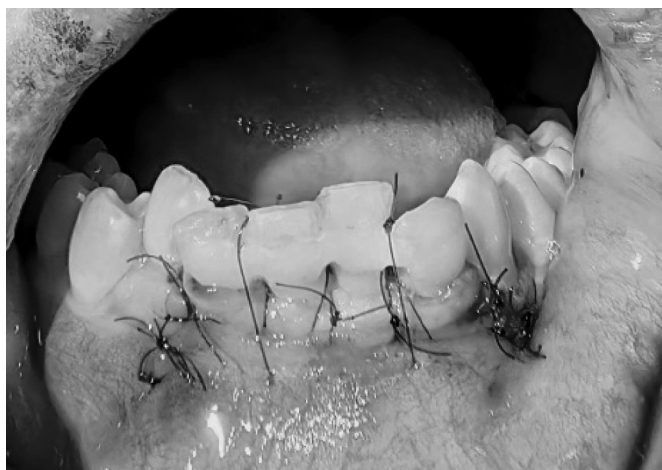


Рис. 9. Фиксация слизистой над костной раной



Рис. 10. 12 месяцев после проведения операции

дикулярная киста нижней челюсти (K04.8). План лечения включал проведение энуклеации с апиэкзомией зубов 3.1 и 3.2 с предварительным эндодонтическим лечением. В ходе проведения хирургической манипуляции в области проекции кистозного образования было сформировано два костных окна до 5 мм в диаметре, обеспечивающих удовлетворительную визуализацию для полного удаления кисты и резецирование апексов зубов (рис. 7). Костная раневая поверхность была перекрыта резорбируемой коллагеновой мембраной

(рис. 8). Мягкие ткани эпителизовались первичным натяжением (рис. 9, 10).

Результаты и обсуждение

Оценку процесса регенерации кости после энуклеации кисты челюсти осуществляли с помощью 3D-объемного анализа. Сравнительное наблюдение плотности кости проводилось с использованием гистограммы в оттенках серого в условных единицах (у.е.), программное обеспечение «Orthopantomograph TM OP

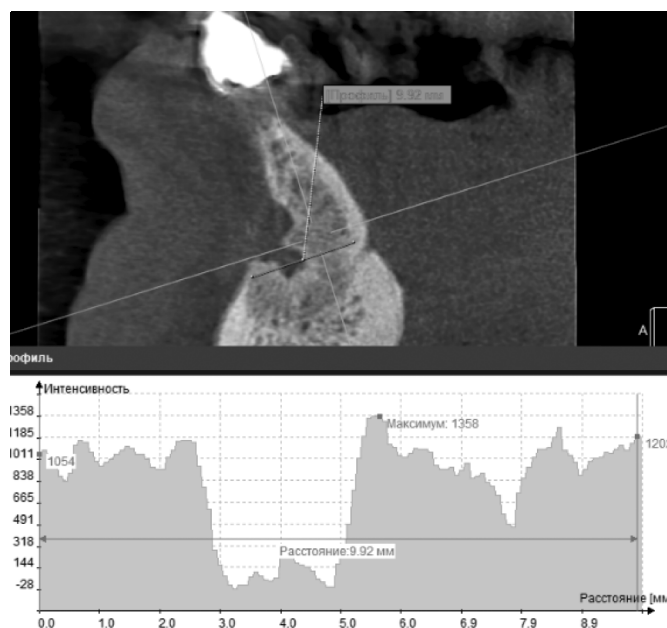
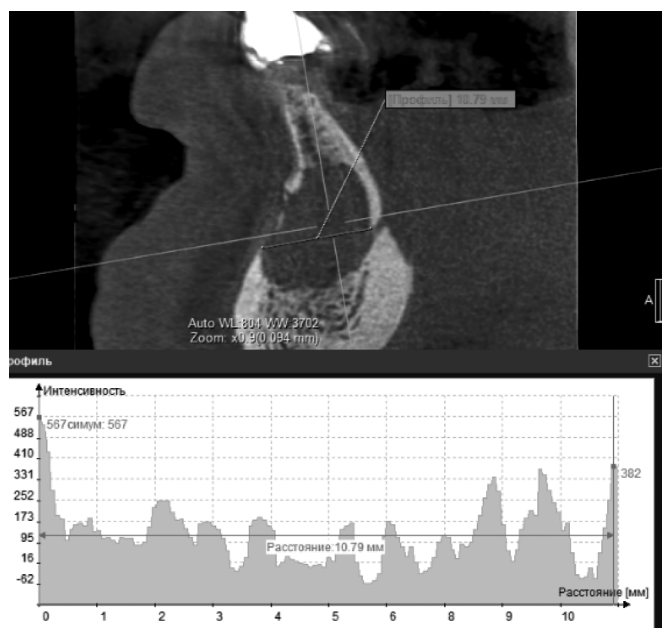


Рис. 11. Динамика репарации костной ткани (реформатор КЛКТ сагиттальная проекция)

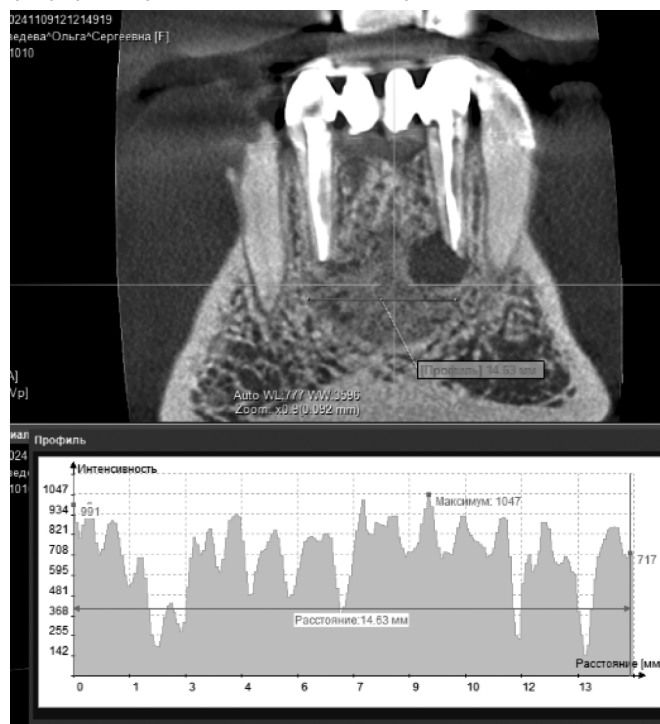
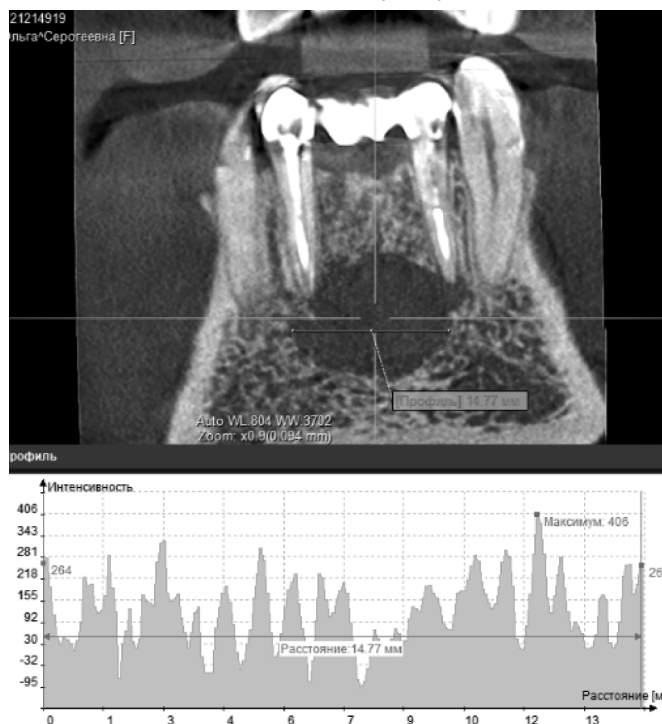


Рис. 12. Динамика репарации костной ткани (реформатор КЛКТ корональная проекция)

3D Pro KAVO». Для профиля захвата исследуемой площади были использованы оси ординат (рис. 11, 12, 13, 14). Определялись начальные показатели плотности тканей и их изменение спустя 12 месяцев наблюдения после энуклеации.

Согласно результатам, плотность кости в 1-м клиническом примере составляла в пределе 1047–1358 у.е., что свидетельствует о тенденции к восстановлению кости в зоне оперативного вмешательства (табл. 1).

Во 2-м клиническом примере показатели плотности варьировали от 877 до 1814 у.е., что существенно выше, чем в первом случае (табл. 2).

Известно, что восстановление костной полости происходит со стороны её сохранившихся стенок к центру, т.е. концентрически [18]. В 1-м клиническом случае был отмечен значительный прирост кости по периферии без восстановления кости в области нарушенной кортикальной пластинки (рис. 11). Во 2-м — в центральной части восстанавливаемого дефекта визуализировались редкие костные трабекулы без признаков органотипичности в апикальной части 3.1 зуба (рис. 13). По периферии отмечалось полное восстановление кортикальной кости на уровне обоих причинных зубов (рис. 13, 14).

Процесс регенерации костной ткани представляет собой сложный физиологический трехэтапный процесс,

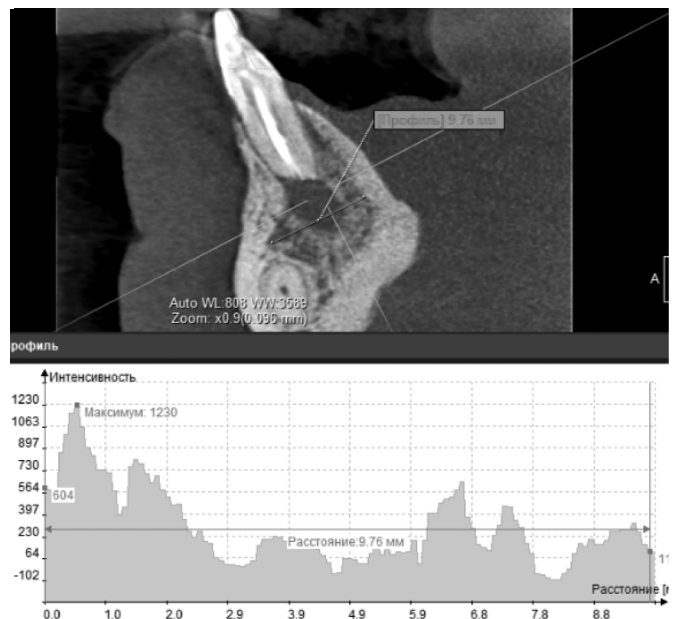
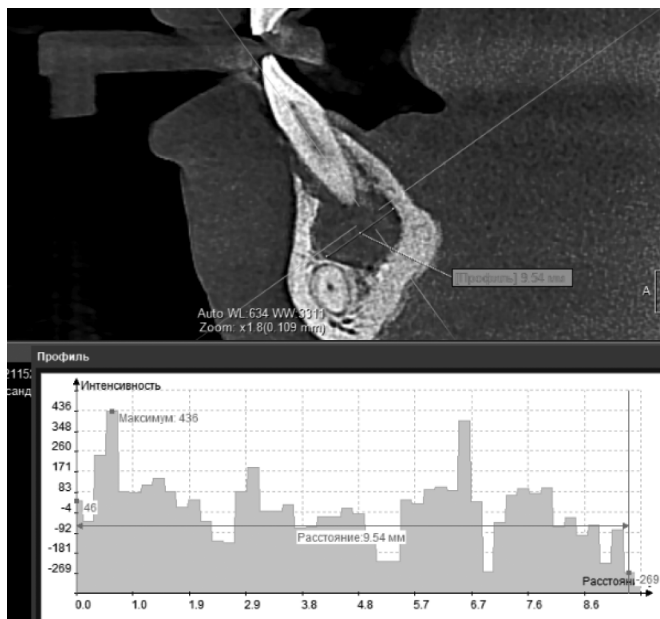


Рис. 13. Динамика репарации костной ткани в области 3.1 зуба (реформатор КЛКТ сагитальная проекция)

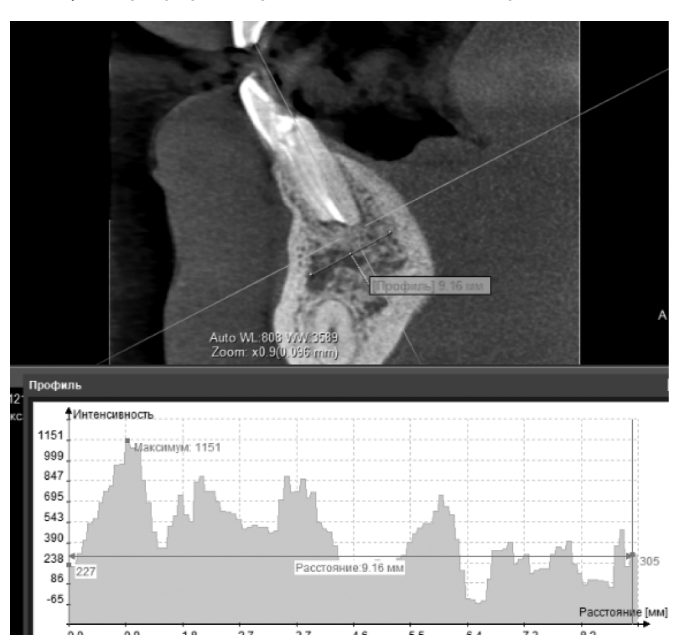
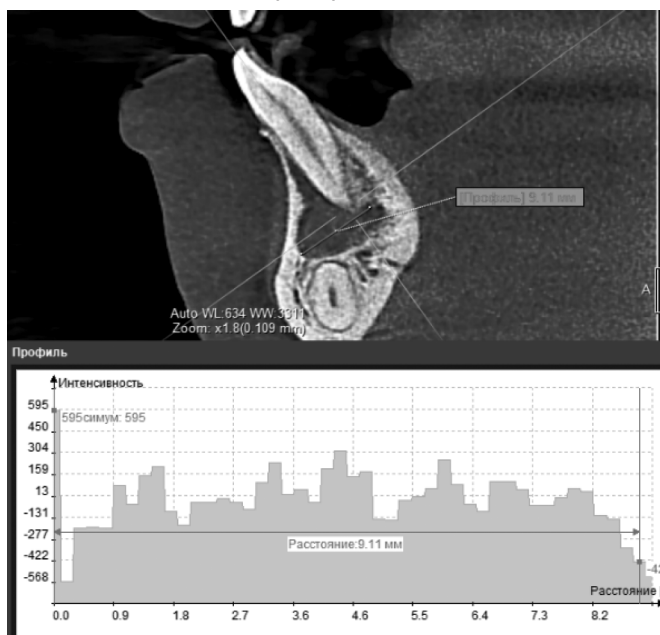


Рис. 14. Динамика репарации костной ткани в области 3.2 зуба (реформатор КЛКТ сагитальная проекция)

Таблица №1.

Показатели плотности костной ткани (у.е.)
первого пациента

Область исследования	Период наблюдения	Корональная проекция	Сагитальная проекция	Аксиальная проекция
Срединная часть	до	406	567	472
	12 мес.	1047	1358	1358
Профиль захвата (мм)		14,63–14,77	9,92–10,79	16,28–16,84

Таблица №2.

Показатели плотности костной ткани (у.е.)
второго пациента

Область исследования	Период наблюдения	Корональная проекция	Сагитальная проекция	Аксиальная проекция
31 зуб	до	549	436	374
	12 мес.	877	1230	1814
Профиль захвата (мм)		8,08–8,38	9,54–9,76	13,37–13,27
32 зуб	до	290	595	105
	12 мес.	1108	1151	1190
Профиль захвата (мм)		5,25–5,29	9,11–9,14	12,23–12,27

которые частично пересекаются. После повреждения кости начинается воспаление и длится несколько дней. На этапе его завершения запускается механизм костеобразования, который поддерживается многими факторами, одними из которых выступают кровяной сгусток, сохраненный за счет PRF, выделяемые провоспалительные цитокины и наличием неповрежденного эндо-

ста за счет максимального количества сохранившихся костных стенок без использования каких-либо костных трансплантатов. Как правило, костные дефекты ментальной части нижней челюсти имеют меньший потенциал для спонтанного заживления, что обусловлено скудной васкуляризацией [19]. Создавая меньший по размеру костный дефект кортикальной кости, мы улучшили естественные условия для спонтанной регенерации и ремоделирования кости, а в последствие и поддержания мягких тканей. Это наглядно подтвердило наше клиническое наблюдение. В каждом случае могут и должны применяться индивидуальные хирургические подходы [20].

Заключение

Спонтанная регенерация костной ткани может происходить после хирургического удаления кист челюсти без использования каких-либо костно-замещающих материалов, что уменьшает риск послеоперационных осложнений, связанных с трансплантацией, сокращает и облегчает период послеоперационного восстановления пациента, обеспечивая стабильный удовлетворительный результат лечения. В случаях, когда наружная кортикальная пластинка челюсти не подверглась процессу деструкции в процессе формирования и роста РК, целесообразно проводить хирургическое вмешательство с максимальным её сохранением, обеспечивая минимальный, но достаточный для качественного удаления оболочки кисты, доступ. Для подтверждения эффективности, безопасности и долгосрочных результатов описанного хирургического подхода необходимы дальнейшие обсервационные и рандомизированные контролируемые клинические исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tekin G., Kosar Y.C., Saruhan Kose N., Dereci O., Ozkiris S., Incebeyaz B. Comparison of decompression vs enucleation using fractal analysis with panoramic radiography for odontogenic cysts. — Med Sci Monit. — 2025; 31: e947910. PMID: 40025719/.
2. Gurav T., Sontakke P., Thakare A., Reche A., Solanki D. The surgical management of a radicular cyst in the maxillary anterior region — a case report. — Cureus. — 2024; 16(4): e59216. PMID: 38807828.
3. Govindaraju L., Antony D.P., S P. Surgical management of radicular cyst with the application of a natural platelet concentrate: a case report. — Cureus. — 2023; 20;15(1): e33992. PMID: 36811049.
4. Agrawal P., Nikhade P., Patel A., Sedani S., Bhopatkar J. Management of discoloured anterior teeth with radicular cyst: a case report. — Cureus. — 2023; 19;15(9): e45536. PMID: 37868572.
5. Sabbagh M., Khairallah C.M., Saleh A., Chaanine C. Volumetric Radiological analysis of bone regeneration after jaw cyst enucleation without grafting material: a retrospective pilot study. — Cureus. 2025; 17(10): e93636. PMID: 41181751.
6. Rațiu C.A., Rațiu I.A., Cavalu S., Boșca A.B., Ciavoi G. Successful management of spontaneous bone regeneration after jaws cystectomy using PRGF approach; case series. — Rom J Morphol Embryol. — 2020; 61(3): 833–840 PMID: 33817724.
7. Клинические рекомендации. Корневые (радикулярные) кисты челюстей и остаточные (резидуальные) кисты челюстей (K04.80; K04.81): утверждены Постановлением №1 Совета Ассоц. обществен. объединений «Стоматолог. Ассоц. России» от 20 дек. 2024 г. Официальный сайт Стоматологической Ассоциации России.
8. Кулаков А.А., Бадалян В.А., Степанян З.М. Повышение эффективности лечения пациентов с апикальным периодонтитом и одонтогенными кистами моляров нижней челюсти. — Стоматология. — 2018; 97(1): 33–36. eLIBRARY ID:32449466.
9. Xu J., Gou L., Zhang P., Li H., Qiu S. Platelet-rich plasma, and regenerative dentistry. — Aust Dent J. — 2020; 65(2):131-142. PMID: 32145082.
10. Egierska D., Perszke M., Mazur M., Duś-Ilńska I. Platelet-rich plasma, and platelet-rich fibrin in oral surgery: A narrative review. — Dent Med Probl. — 2023;60(1):177–186. PMID: 37023345.

11. Chou T.M., Chang H.P., Wang J.C. Autologous platelet concentrates in maxillofacial regenerative therapy. — Kaohsiung J Med Sci. — 2020;36(5):305–310. PMID: 32052598.
12. Майбородин И.В., Колесников И.С., Козодий Д.М., Выборнов М.С., Шевела А.И., Шевела А.А., Шеплев Б.В., Дровосеков М.Н., Колмакова И.А., Тодер М.С. Возможность ускорения репаративных процессов в костных тканях в результате применения фибрина. — Фундаментальные исследования. — 2011; 2:98–105. eLIBRARY ID:15568040
13. Arshad S., Tehreem F., Rehab Khan M., Ahmed F., Marya A., Karobari M.I. Platelet-rich fibrin used in regenerative endodontics and dentistry: current uses, limitations, and future recommendations for application. — Int J Dent. 2021; 15:4514598. PMID: 34956367.
14. Пиотрович А.В., Гарбузенко Д.В. Случай успешного применения обогащенного тромбоцитами фибрина для ликвидации большой остаточной полости после энуклеации радикулярной кисты. — Стоматология. — 2025;104(4):103–106. <https://doi.org/10.17116/stomat2025104041103>
15. Гребнев Г.А., Иванов А.С., Авсюков Е.В. Анализ осложнений хирургического лечения периапикальных очагов инфекции. — Клиническая стоматология. — 2021; 3: 41–43. eLIBRARY ID:46652197
16. Ku J.K., Jeon W.Y., Ko S.O., Yoon J.Y. Assessing the efficacy of apicoectomy without retrograde filling in treating periapical inflammatory cysts. — J Korean Assoc Oral Maxillofac Surg. — 2024;50(3):140–145. PMID: 38940650/.
17. Chaushu G., Reiser V., Rosenfeld E., Masri D., Chaushu L., Čandrlić M., Rider P., Perić Kačarević Ž. Use of a resorbable magnesium membrane for bone regeneration after large radicular cyst removal: a clinical case report. — Healthcare (Basel). — 2025;13(9):1068. PMID: 40361846/.
18. Rubio E.D., Mombrú C.M. Spontaneous bone healing after cysts enucleation without bone grafting materials: a randomized clinical study. — Craniomaxillofac Trauma Reconstr. — 2015;1(212):14–22. PMID: 25709749.
19. Dhamija R., Tewari S., Sangwan P., Duhan J., Mittal S. Impact of platelet-rich plasma in the healing of through-and-through periapical lesions using 2-dimensional and 3-dimensional evaluation: a randomized controlled trial. — J Endod. — 2020;46(9):1167–1184. PMID: 32553878.
20. Wang S., Zhang Y., Zhong Y., Guan J., Zhao C., Wang P. A rare case report: calcifying odontogenic cyst mimicking lateral periodontal cyst with 1-year follow-up. — BMC Oral Health. — 2025;25(1):1592. PMID: 41073939/.

© Пиотрович Альбина Викторовна (pialvik@mail.ru); Павлиенко Юлия Викторовна (pavlienko74@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВЛИЯНИЕ САХАРНОГО ДИАБЕТА НА ТЕЧЕНИЕ И ИСХОДЫ ХРОНИЧЕСКОЙ СЕРДЕЧНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТИ: РЕЗУЛЬТАТЫ ОДНОЦЕНТРОВОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗА 300 АМБУЛАТОРНЫМИ ПАЦИЕНТАМИ

THE INFLUENCE OF DIABETES MELLITUS ON THE COURSE AND OUTCOMES OF CHRONIC HEART FAILURE: RESULTS OF A SINGLE-CENTRE OBSERVATIONAL STUDY OF 300 OUTPATIENTS

D. Ponomarev

Summary. Diabetes mellitus and chronic heart failure form a bidirectional clinical continuum: each pathology acts both as a risk factor and as a prognostic modifier for the other. The aim of this study was to assess clinical features, glycaemic control, and twelve-month outcomes in chronic heart failure patients with and without diabetes mellitus in real-world outpatient cardiology practice. The cohort included 300 patients with verified chronic heart failure followed at the Tambov branch of Medtorgservice LLC; 11 patients with diagnosed prediabetes were excluded from the initial sample of 311. Patients with diabetes demonstrated longer heart failure duration, higher prevalence of chronic kidney disease (92 % in the type 1 diabetes subgroup), arterial hypertension and obesity, more frequent hospitalisations and adverse twelve-month outcomes. The diagnosis of diabetes in chronic heart failure patients requires individualised therapy with mandatory HbA1c monitoring, renal function assessment and reasoned inclusion of SGLT2 inhibitors regardless of left ventricular ejection fraction.

Keywords: chronic heart failure, diabetes mellitus, glycated haemoglobin, diabetic cardiomyopathy, sodium-glucose cotransporter 2 inhibitors, prognosis.

Пономарев Денис Сергеевич

Кандидат медицинских наук, врач-кардиолог,
Филиал Общества с ограниченной ответственностью
«Медторгсервис», г. Тамбов
den.tamb@mail.ru

Аннотация. Сахарный диабет и хроническая сердечная недостаточность образуют двунаправленный клинический континуум: каждая из патологий выступает фактором риска и одновременно прогностическим модификатором течения второй. Актуальность темы обусловлена ростом распространенности обоих состояний — по данным IDF Diabetes Atlas 11-го издания, к 2024 году в мире насчитывалось 589 млн взрослых с диабетом, а к 2050 году прогнозируется 853 млн, — а также данными регистра ESC-HFA, согласно которым частота сахарного диабета среди амбулаторных пациентов с ХСН достигает 36,5 %. Цель работы — оценить особенности клинического течения, гликемического контроля и 12-месячных исходов у пациентов с ХСН в зависимости от наличия сахарного диабета любого типа в условиях реальной амбулаторной практики. Материал — 300 пациентов с верифицированным диагнозом ХСН, наблюдавшихся на базе филиала ООО «Медторгсервис» (г. Тамбов); из исходной выборки 311 человек исключены 11 пациентов с предиабетом. Методы — ретроспективный анализ электронных медицинских карт с оценкой уровня HbA1c, спектра коморбидной патологии, схем сахароснижающей и сердечно-сосудистой терапии, частоты госпитализаций по любой причине и сердечно-сосудистой смертности за 12 месяцев. Результаты — у пациентов с СД при ХСН отмечались большая длительность сердечной недостаточности, более высокая распространенность ХБП (92 % в подгруппе СД1), артериальной гипертензии и ожирения, более частые госпитализации и неблагоприятный 12-месячный прогноз. Среди пациентов без установленного диагноза СД у 75 % уровень HbA1c превышал 6,5 %; при дообследовании впервые выявленный СД2 диагностирован у 18,7 % из них. Заключение — диагноз СД при ХСН требует индивидуализированного подбора терапии с обязательным контролем HbA1c, оценкой функции почек и обоснованным включением ингибиторов натрий-глюкозного котранспортера 2-го типа независимо от фракции выброса.

Ключевые слова: хроническая сердечная недостаточность, сахарный диабет, гликированный гемоглобин, диабетическая кардиомиопатия, ингибиторы натрий-глюкозного котранспортера 2-го типа, прогноз.

Хроническая сердечная недостаточность давно перестала быть исключительно «возрастной» проблемой. По данным регистра ЭПОХА-ХСН, распространённость синдрома в российской популяции выросла с 6,1 до 8,2 % за двадцать лет наблюдения [1]. Прогноз остаётся серьёзным: после постановки диагноза в течение пяти лет умирает около половины больных, через десять — лишь каждый десятый сохраняет жизнь. Параллельно разворачивается вторая эпидемия — сахарного диабета. По данным IDF Diabetes Atlas 11-го издания, в 2024 году в мире насчитывалось 589 млн взрослых пациентов с диабетом, а к 2050 году эта цифра, по прогнозам, достигнет 853 млн [2]. Глобальный анализ GBD 2021 даёт ещё более тревожную перспективу: более 1,31 млрд человек с СД к середине века, с особенно резким ростом в Российской Федерации — до 5568,3 случая на 100 тыс. населения и приростом 40,8 % относительно 2021 года [3].

Связи между этими двумя заболеваниями взаимоусиливающие. Сахарный диабет увеличивает риск развития ХСН в 1,8–2 раза у мужчин и в 2,5–5 раз у женщин даже после поправки на классические факторы [4, 5]. Сама сердечная недостаточность, в свою очередь, ассоциирована с инсулинорезистентностью и существенно повышает вероятность развития нового СД — около 2 % в год после первой госпитализации [6]. По данным европейского регистра ESC-HFA, частота СД среди амбулаторных пациентов с ХСН составляет 36,5 % и сопровождается ростом годичной смертности и частоты госпитализаций [7]. Патофизиологический фундамент этой связи — диабетическая кардиомиопатия: гиперинсулинемия, инсулинорезистентность, накопление конечных продуктов гликирования и хроническое воспаление запускают каскад, ведущий к интерстициальному фиброзу, диастолической, а затем и систолической дисфункции [8, 9]. Российские клинические рекомендации по ХСН 2024 года признают сахарный диабет одним из ключевых факторов прогрессирования синдрома [10].

Цель — оценить, как сочетание сахарного диабета любого типа меняет клиническую картину, структуру коморбидности, гликемический контроль и 12-месячные исходы у амбулаторных пациентов с ХСН в условиях реальной кардиологической практики регионального центра.

Проведён ретроспективный анализ данных 300 пациентов с верифицированным диагнозом ХСН, наблюдавшихся на базе филиала ООО «Медторгсервис» в Тамбове. Из исходной выборки 311 человек исключены 11 пациентов с диагнозом «предиабет». Диагноз ХСН устанавливался согласно Российским клиническим рекомендациям 2024 года [10]: симптоматика (одышка, утомляемость, отёки), эхокардиография с расчётом ФВ ЛЖ методом Симпсона, уровень NT-proBNP. Диагноз СД устанавливал-

ся по критериям ВОЗ — HbA1c $\geq 6,5$ % и/или гликемия натощак $\geq 7,0$ ммоль/л при двукратном подтверждении.

Источником данных служили электронные медицинские карты, журналы амбулаторных приёмов и выписные эпикризы за период наблюдения 12 месяцев. Анализировались демографические показатели, длительность ХСН, ФВ ЛЖ, NT-proBNP, уровень HbA1c, спектр коморбидной патологии (ХБП по СКФ согласно CKD-EPI, артериальная гипертензия, ожирение, анемия, ОНМК в анамнезе), характер сахароснижающей и сердечно-сосудистой терапии и её динамика, частота госпитализаций и сердечно-сосудистой смертности. Сравнивались две группы — пациенты с установленным СД любого типа и пациенты без СД; внутри группы СД дополнительно выделены подгруппы СД1 и СД2. Достоверность межгрупповых различий оценивалась с использованием критерия χ^2 Пирсона для качественных и t-критерия Стьюдента для количественных признаков при $p < 0,05$.

Из 300 пациентов с ХСН диагноз СД установлен у 109 человек (36,3 %), что соответствует средним показателям многоцентровых регистров [7]. Распределение по типу диабета: СД1 — у 12 пациентов (4,0 %), СД2 — у 97 (32,3 %). Группу сравнения составил 191 пациент без диабета (63,7 %). Средний возраст в группе с СД достоверно превышал показатель в группе сравнения ($68,4 \pm 7,8$ против $64,2 \pm 9,1$ года; $p < 0,01$), длительность ХСН — $5,7 \pm 2,9$ против $3,8 \pm 2,4$ года.

Особое внимание привлекает гипогликемический статус группы «без диабета». HbA1c определялся у 100 % пациентов с СД и лишь у 85,2 % больных без него — налицо клиническая инерция, при которой скрининг гликемии проводится непоследовательно. Из обследованных в подгруппе без СД у 75 % уровень оказался $\geq 6,5$ %, и при углублённом дообследовании впервые выявленный СД2 диагностирован у 18,7 % этих пациентов. Эти данные согласуются с глобальной статистикой IDF Diabetes Atlas, согласно которой 252 млн взрослых в мире с диабетом не подозревают о своём диагнозе [2].

Таблица 1.
Демографические и клинические характеристики групп

Параметр	СД (n = 109)	Без СД (n = 191)	p
Средний возраст, годы	$68,4 \pm 7,8$	$64,2 \pm 9,1$	$<0,01$
Женщины, %	58,7	51,3	$> 0,05$
Длительность ХСН, годы	$5,7 \pm 2,9$	$3,8 \pm 2,4$	$<0,001$
ХСНнФВ (ФВ ≤ 40 %), %	38,5	35,1	$> 0,05$
ХСНунФВ (ФВ 41–49 %), %	18,3	14,7	$> 0,05$
ХСНсФВ (ФВ ≥ 50 %), %	43,2	50,2	$> 0,05$
NT-proBNP, пг/мл (медиана)	1980	1260	$<0,01$

Преобладание ХСН с сохранной ФВ в обеих группах характерно для амбулаторного контингента старшей возрастной категории. У пациентов с СД медиана NT-proBNP оказалась выше — что отражает большую тяжесть застойных явлений и согласуется с концепцией диабетической кардиомиопатии как преимущественно субстрата ХСНсФВ [9, 11].

Коморбидная нагрузка в группе с СД оказалась существенно выше — и не сводится к простому возрастному эффекту. ХБП диагностирована у 92 % пациентов с СД1 — показатель, сложно переоценимый с практической точки зрения: он диктует крайнюю осторожность в выборе сахароснижающих и кардиотропных препаратов и ограничивает возможности диуретической терапии. У пациентов с СД2 распространённость ХБП также высока — 64 % против 32 % в группе без диабета. Артериальная гипертензия зарегистрирована у 91,7 % пациентов с СД и 78,5 % больных без СД; ожирение (ИМТ ≥ 30 кг/м²) — у 56,9 % и 31,9 % соответственно. Анемия лёгкой и средней степени тяжести встречалась почти вдвое чаще в группе с диабетом (38,5 % против 19,4 %).

Таблица 2.

Структура коморбидной патологии в группах

Сопутствующее заболевание	СД1 (n = 12)	СД2 (n = 97)	Без СД (n = 191)
ХБП С3а и выше, %	92	64	32
Артериальная гипертензия, %	83,3	92,8	78,5
Ожирение (ИМТ ≥ 30 кг/м ²), %	33,3	60,0	31,9
Анемия, %	50,0	37,1	19,4
ОНМК в анамнезе, %	16,7	17,5	8,9
ИБС, постинфарктный кардиосклероз, %	41,7	58,8	39,3

Большая распространённость постинфарктного кардиосклероза при СД2 согласуется с данными мета-анализа 19 когортных исследований из 60 451 пациента, перенёсших острый инфаркт миокарда: у больных с диабетом риск развития новой ХСН выше в 1,78 раза, а общей смертности — в 2,09 раза [12].

Распределение пациентов с СД по уровню HbA1c показало неоднородную картину. Ниже 8,4 % находились 45,0 % пациентов; диапазон 8,5–9,9 % зафиксирован у 11,0 %; HbA1c ≥ 10 % — у 44,0 %. Иначе говоря, почти половина пациентов имела выраженно неадекватный контроль гликемии — несмотря на установленный диагноз и регулярное наблюдение.

Связь уровня HbA1c с прогнозом у пациентов с ХСН сложнее, чем кажется на первый взгляд. Классическое исследование на 5815 ветеранах с ХСН и СД продемон-

стрировало U-образную зависимость общей смертности от HbA1c: минимальный риск при значениях 7,1–7,8 %, повышение — как при более жёстком контроле, так и при HbA1c $> 9,0$ % [13]. В нашей когорте 44 % пациентов имели HbA1c ≥ 10 %, что в соответствии с многоцентровыми данными ассоциировано с увеличением риска госпитализации в связи с ХСН примерно на треть и значимым ростом общей смертности [14]. Дополнительные сложности создаёт вариабельность HbA1c во времени: проспективное когортное исследование 902 пациентов с ХСН и СД2 показало, что высокая вариабельность гликемического контроля независимо ассоциирована с повышенным риском общей смертности [15]. У пациентов с СД2 в течение 12 месяцев интенсификация сахароснижающей терапии — добавление нового препарата или перевод на инсулин — потребовалась у 48 % больных.

Двенадцатимесечное наблюдение подтвердило более тяжёлое течение ХСН при СД. Сердечно-сосудистая смертность в группе с диабетом составила 11,9 % против 5,8 % в группе сравнения; общая смертность — 14,7 % против 7,3 %; госпитализация по любой причине — у 38,5 % пациентов с СД и 21,5 % без диабета; госпитализация в связи с декомпенсацией ХСН — у 27,5 % и 13,1 % соответственно. После поправки на возраст, ФВ и функцию почек диабет сохранял независимое влияние на прогноз. Похожая картина описана в международной мета-аналитической литературе: сахарный диабет ассоциирован с повышением общей смертности на 28 % и риска сердечно-сосудистой смерти и госпитализаций примерно на 35 % за трёхлетний период [16].

Таблица 3.

Двенадцатимесечные исходы в группах

Исход	СД (n = 109)	Без СД (n = 191)	p
Сердечно-сосудистая смертность, %	11,9	5,8	<0,05
Общая смертность, %	14,7	7,3	<0,05
Госпитализация по любой причине, %	38,5	21,5	<0,001
Госпитализация в связи с декомпенсацией ХСН, %	27,5	13,1	<0,001
Повторная госпитализация (≥ 2 за год), %	14,7	5,2	<0,01

В подгруппе пациентов с HbA1c ≥ 10 % сердечно-сосудистая смертность достигала 18,8 %, при HbA1c 6,5–7,9 % — 4,8 %. Эти результаты согласуются с систематическим обзором по СД1 и риску ХСН: при уровне HbA1c $\geq 10,5$ % относительный риск сердечно-сосудистой смерти и госпитализаций по поводу ХСН возрастает более чем в десять раз, причём эффект усиливается с возрастом и длительностью заболевания [17].

За последние пять-семь лет терапевтический ландшафт ХСН при СД кардинально изменился. В исследова-

нии DAPA-HF дапаглифлозин снизил частоту первичной комбинированной конечной точки на 26 % у пациентов с ХСН и ФВ ≤ 40 %, причём эффект сохранялся как у пациентов с диабетом, так и без него [18]. Исследование DELIVER на 6263 пациентах с ХСН и ФВ > 40 % подтвердило эти результаты на всём спектре ФВ ЛЖ: первичная конечная точка возникла у 16,4 % в группе дапаглифлозина против 19,5 % в группе плацебо (HR 0,82; 95 % ДИ 0,73–0,92) [19]. Научное заявление HFA 2025 года прямо рекомендует включать иНГЛТ-2 в стандартную терапию ХСН на всём спектре фракции выброса и независимо от наличия СД [20].

Таблица 4.

Структура сердечно-сосудистой
и сахароснижающей терапии в группе с СД

Класс препаратов	На момент включения, %	Через 12 мес., %
иАПФ/АРНИ	78,9	84,4
Бета-адреноблокаторы	88,1	89,9
Антагонисты минералокортикоидных рецепторов	60,6	67,9
Петлевые диуретики	71,6	75,2
иНГЛТ-2 (дапаглифлозин/эмпаглифлозин)	31,2	58,7
Метформин	64,2	61,5
Препараты сульфонилмочевины	28,4	21,1
Инсулиноterapia	22,9	31,2

В нашей когорте пациентов с СД иНГЛТ-2 на момент включения получали лишь 31,2 % больных — что отражает разрыв между обновлёнными рекомендациями и практикой регионального амбулаторного звена. К концу 12-месячного наблюдения этот показатель удалось довести до 58,7 %, и в этой подгруппе частота госпитализаций по поводу декомпенсации ХСН оказалась достоверно ниже (19,4 % против 33,8 %; $p < 0,01$). Современные носимые устройства и системы непрерывного мониторинга глюкозы открывают перспективу упрежда-

ющей коррекции терапии без госпитализации; систематический обзор показал, что подобные технологии способны выявлять ранние признаки декомпенсации ХСН, хотя строгая клиническая интеграция пока ограничена малым числом РКИ [21].

Полученные данные подтверждают и количественно уточняют известное положение: сахарный диабет любого типа существенно утяжеляет течение ХСН и ухудшает её прогноз. У 36,3 % амбулаторных пациентов с ХСН верифицирован сахарный диабет, что соответствует данным крупных международных регистров. Среди пациентов без установленного диагноза СД скрытые гликемические нарушения встречаются у трёх четвертей при выборочной оценке HbA1c — серьёзный аргумент в пользу обязательного рутинного скрининга у каждого больного с ХСН.

Структура коморбидности в группе с СД радикально отличается от таковой в группе сравнения: ХБП у 92 % пациентов с СД1 и у 64 % — с СД2; высокая распространённость артериальной гипертензии, ожирения, анемии и постинфарктного кардиосклероза. Эта коморбидная нагрузка не только повышает риск неблагоприятных исходов, но и ограничивает терапевтические возможности. Анализ исходов за 12 месяцев показал, что сердечно-сосудистая смертность в группе с СД вдвое превышает таковую в группе сравнения; неконтролируемый диабет ($HbA1c \geq 10$ %), наблюдавшийся у 44 % пациентов нашей когорты, ассоциирован с резким ростом риска неблагоприятных событий. При этом установка «чем ниже HbA1c — тем лучше» неприменима: связь HbA1c и исходов имеет U-образный характер, и стремление к жёсткому контролю на фоне сердечной недостаточности и пожилого возраста сопряжено с увеличением риска гипогликемий. Современная фармакотерапия ХСН с СД должна включать иНГЛТ-2 как препарат первой линии независимо от ФВ; целевые значения гликемии — индивидуализироваться. Стремление к показателю «лечение — персональное, а не одинаковое» — единственный реалистичный путь улучшения исходов у этой сложнейшей категории пациентов [22].

ЛИТЕРАТУРА

1. Поляков Д.С., Фомин И.В., Беленков Ю.Н., Мареев В.Ю., Агеев Ф.Т., Артемьева Е.Г., Бадин Ю.В., Виноградова Н.Г., Галявич А.С., Тарловская Е.И., Щербинина Е.В., Якушин С.С. Хроническая сердечная недостаточность в Российской Федерации: что изменилось за 20 лет наблюдения? Результаты исследования ЭПОХА-ХСН // Кардиология. — 2021. — Т. 61, № 4. — С. 4–14. — DOI: 10.18087/cardio.2021.4. n1628.
2. Magliano D.J., Boyko E.J. IDF Diabetes Atlas. 11th edition. — Brussels: International Diabetes Federation, 2025. — URL: <https://diabetesatlas.org/resources/idf-diabetes-atlas-2025/>.
3. GBD 2021 Diabetes Collaborators. Global, regional, and national burden of diabetes from 1990 to 2021, with projections of prevalence to 2050: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021 // Lancet. — 2023. — Vol. 402, No. 10397. — P. 203–234. — DOI: 10.1016/S0140-6736(23)01301-6.
4. Ohkuma T., Komorita Y., Peters S.A.E., Woodward M. Diabetes as a risk factor for heart failure in women and men: a systematic review and meta-analysis of 47 cohorts including 12 million individuals // Diabetologia. — 2019. — Vol. 62, No. 9. — P. 1550–1560. — DOI: 10.1007/s00125-019-4926-x.

5. Pop-Busui R., Januzzi J.L., Bruemmer D., Butalia S., Green J.B., Horton W.B., Knight C., Levi M., Rasouli N., Richardson C.R. Heart failure: an underappreciated complication of diabetes. A consensus report of the American Diabetes Association // *Diabetes Care*. — 2022. — Vol. 45, No. 7. — P. 1670–1690. — DOI: 10.2337/dci22-0014.
6. Zareini B., Rørth R., Holt A., Mogensen U.M., Selmer C., Gislason G., Schou M., Køber L., Torp-Pedersen C., Lamberts M., Kristensen S. L. Heart failure and the prognostic impact and incidence of new-onset of diabetes mellitus: a nationwide cohort study // *Cardiovascular Diabetology*. — 2019. — Vol. 18. — Art. 79. — DOI: 10.1186/s12933-019-0883-4.
7. Dauriz M., Targher G., Laroche C., Temporelli P.L., Ferrari R., Anker S., Coats A., Filippatos G., Crespo-Leiro M., Mebazaa A., Piepoli M.F., Maggioni A.P., Tavazzi L. Association between diabetes and 1-year adverse clinical outcomes in a multinational cohort of ambulatory patients with chronic heart failure: results from the ESC-HFA Heart Failure Long-Term Registry // *Diabetes Care*. — 2017. — Vol. 40, No. 5. — P. 671–678. — DOI: 10.2337/dc16-2016.
8. Jia G., Hill M.A., Sowers J.R. Diabetic cardiomyopathy: an update of mechanisms contributing to this clinical entity // *Circulation Research*. — 2018. — Vol. 122, No. 4. — P. 624–638. — DOI: 10.1161/CIRCRESAHA.117.311586.
9. Pan K.L., Hsu Y.C., Chang S.T., Chung C.M., Lin C.L. The role of cardiac fibrosis in diabetic cardiomyopathy: from pathophysiology to clinical diagnostic tools // *International Journal of Molecular Sciences*. — 2023. — Vol. 24, No. 10. — Art. 8604. — DOI: 10.3390/ijms24108604.
10. Галявич А.С., Терещенко С.Н., Ускач Т.М., Агеев Ф.Т., Арутюнов Г.П., Беграмбекова Ю.Л., Беленков Ю.Н., Виноградова Н.Г., Гарганеева А.А., Кобалава Ж.Д., Козиолова Н.А., Лопатин Ю.М., Мареев В.Ю., Орлова Я.А., Тарловская Е.И., Чесникова А.И., Шляхто Е.В. Хроническая сердечная недостаточность. Клинические рекомендации 2024 // *Российский кардиологический журнал*. — 2024. — Т. 29, № 11. — С. 6162. — DOI: 10.15829/1560-4071-2024-6162.
11. Julián M.T., Pérez-Montes de Oca A., Julve J., Alonso N. The double burden: type 1 diabetes and heart failure — a comprehensive review // *Cardiovascular Diabetology*. — 2024. — Vol. 23, No. 1. — Art. 65. — DOI: 10.1186/s12933-024-02136-y.
12. Chamberg-Michiliet, Diego & Cabanillas-Lazo, Miguel & Castro, Luis & Pascual-Guevara, Milagros & Arriola-Montenegro, Jose. (2024). Diabetes and the Risk of Heart Failure Among More Than 60,000 Acute Myocardial Infarction Survivors: A Systematic Review and Meta-Analysis. *American Heart Journal*. 267. 116. 10.1016/j.ahj.2023.08.015.
13. Aguilar D., Bozkurt B., Ramasubbu K., Deswal A. Relationship of hemoglobin A1C and mortality in heart failure patients with diabetes // *Journal of the American College of Cardiology*. — 2009. — Vol. 54, No. 5. — P. 422–428. — DOI: 10.1016/j.jacc.2009.04.049.
14. Tang X.F., Li Q.X., Han Y.L., Yang Y., Yao Y., Xu B., Yang Y.J., Yuan J.Q. Implications of baseline glycemic control by plasma glycated hemoglobin A1c on adverse outcomes in patients with coronary heart disease and type 2 diabetes mellitus: results from the PROMISE study // *Heliyon*. — 2024. — Vol. 10, No. 22. — Art. e39748. — DOI: 10.1016/j.heliyon. 2024.e39748.
15. Xu X., Ren Q.W., Chandramouli C., Mao M.C., Tromp J., Huang J.Y., Wu M.Z., Yu S.Y., Tse H.F., Lam C.S.P., Yiu K.H. Glycated hemoglobin variability is associated with adverse outcomes in patients with heart failure irrespective of diabetic status // *Journal of the American Heart Association*. — 2024. — Vol. 13, No. 9. — Art. e034109. — DOI: 10.1161/JAHA.123.034109.
16. Kong M.G., Jang S.Y., Jang J., Cho H.J., Lee S., Lee S. E., Kim K. H., Yoo B.S., Kang S.M., Baek S.H., Jeon E.S., Kim J.J., Cho M.C., Chae S.C., Oh B.H., Choi D.J. Impact of diabetes mellitus on mortality in patients with acute heart failure: a prospective cohort study // *Cardiovascular Diabetology*. — 2020. — Vol. 19. — Art. 49. — DOI: 10.1186/s12933-020-01026-3.
17. Echouffo-Tcheugui J.B., Hassan M.O., Kamoun M., Tang O., Mathioudakis N., Selvin E. Type 1 diabetes and risk of heart failure: a systematic review and meta-analysis // *Diabetes Research and Clinical Practice*. — 2023. — Vol. 202. — Art. 110805. — DOI: 10.1016/j.diabres.2023.110805.
18. McMurray J.J.V., Solomon S.D., Inzucchi S.E., Køber L., Kosiborod M.N., Martinez F.A., Ponikowski P., Sabatine M.S., Anand I.S., Bělohávek J., Böhm M., Chiang C.E., Chopra V.K., de Boer R.A., Desai A.S., Diez M., Drozd J., Dukát A., Ge J., Howlett J.G., Tereshchenko S., Verma S., Held C., DeMets D.L., Docherty K.F., Jhund P.S., Bengtsson O., Sjöstrand M., Langkilde A.M. Dapagliflozin in patients with heart failure and reduced ejection fraction // *New England Journal of Medicine*. — 2019. — Vol. 381, No. 21. — P. 1995–2008. — DOI: 10.1056/NEJMoa1911303.
19. Solomon S.D., McMurray J.J.V., Claggett B., de Boer R.A., DeMets D., Hernandez A.F., Inzucchi S.E., Kosiborod M.N., Lam C.S.P., Martinez F., Shah S.J., Desai A.S., Jhund P.S., Belohlavek J., Chiang C.E., Tereshchenko S.N., Vaduganathan M., Vardeny O., Verma S., Pham V.N., Bachus E., Lindholm D., Petersson M., Langkilde A.M. Dapagliflozin in heart failure with mildly reduced or preserved ejection fraction // *New England Journal of Medicine*. — 2022. — Vol. 387, No. 12. — P. 1089–1098. — DOI: 10.1056/NEJMoa2206286.
20. Metra M., Tomasoni D., Adamo M., Bayes-Genis A., Filippatos G., Abdelhamid M., Adamopoulos S., Anker S.D., Böhm M., Butler J., Cleland J.G.F., Coats A.J.S., Lund L.H., McDonagh T., Ponikowski P., Rosano G.M.C., Savarese G., Seferovic P., Volterrani M., von Haehling S. SGLT2 inhibitors for the prevention and treatment of heart failure: a scientific statement of the Heart Failure Association of the European Society of Cardiology // *ESC Heart Failure*. — 2025. — Vol. 12, No. 4. — P. 2295–2343. — DOI: 10.1002/ehf2.15408.
21. Scholte N.T.B., van Ravensberg A.E., Shakoar A., Boersma E., Ronner E., de Boer R.A., Brugts J.J., Bruning T., van der Boon R.M.A. A scoping review on advancements in noninvasive wearable technology for heart failure management // *npj Digital Medicine*. — 2024. — Vol. 7, No. 1. — Art. 279. — DOI: 10.1038/s41746-024-01268-5.
22. Pop-Busui R., Patel A., Aroda V.R., Buse J.B., Cannon C.P., Heerspink H.J.L., Inzucchi S.E., Lingvay I., McGuire D.K., Mosenzon O., Pratley R.E., Sattar N., Tuttle K.R., Wexler D.J., Verma S., Cherney D.Z.I. Cardiovascular and kidney outcomes among patients with type 2 diabetes mellitus and heart failure: a 2024 update for the practicing clinician // *Circulation*. — 2024. — Vol. 150, No. 14. — P. 1106–1124. — DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.124.067961.

© Пономарев Денис Сергеевич (den.tamb@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРОВОСПАЛИТЕЛЬНЫЕ ЦИТОКИНЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ИЗМЕНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕМОСТАЗА У БОЛЬНЫХ РЕВМАТОИДНЫМ АРТРИТОМ С АНТИФОСФОЛИПИДНЫМ СИНДРОМОМ И БЕЗ НЕГО В СРАВНИТЕЛЬНОМ АСПЕКТЕ

PRO-INFLAMMATORY CYTOKINES
AND THEIR EFFECT ON CHANGES
IN THE BASIC PARAMETERS
OF HEMOSTASIS IN RHEUMATOID
ARTHRITIS PATIENTS
WITH ANTIPHOSPHOLIPID SYNDROME
AND WITHOUT IT IN A COMPARATIVE
ASPECT

**Yu. Sarycheva
T. Chernysheva**

Summary. In some cases, the dysregulation of the «cytokine cascade» results in significant changes in the coagulation system, platelet activation, alterations in the vascular wall, and the formation of thrombi in vessels of various calibers. The aim of this study was to investigate the relationship between pro-inflammatory cytokines and changes in the main parameters of hemostasis in patients with rheumatoid arthritis and antiphospholipid syndrome and without it in the comparative aspect. 120 patients aged 22 to 65 years with a diagnosis of rheumatoid arthritis were examined in the period from 2024 to 2025. Antiphospholipid syndrome was diagnosed in 32 (26.7 %) patients. There was a direct correlation between increased levels of pro-inflammatory cytokines and an increase in platelet count, prothrombin index, fibrinogen, D-dimer and endothelin-1; and an inverse correlation with values of activated partial thromboplastin time. It has been established that an increase in the concentration of interleukin-6, interleukin-18, and tumor necrosis factor- α is associated with an increased hypercoagulable state, increased markers of endothelial dysfunction and thrombosis, which undoubtedly worsens the course of the underlying disease.

Keywords: rheumatoid arthritis, antiphospholipid syndrome, hemostasis, pro-inflammatory cytokines, interleukin-6, interleukin-18, tumor necrosis factor- α .

Сарычева Юлия Александровна

Кандидат медицинских наук, доцент,
ФГБОУ ВО Оренбургский государственный
медицинский университет
yualsarycheva@mail.ru

Чернышева Татьяна Викторовна

Доктор медицинских наук, профессор,
ФГБОУ ВО Оренбургский государственный
медицинский университет
yualsarycheva@mail.ru

Аннотация. В ряде случаев нарушение регуляции «цитокинового каскада» приводит к значимым изменениям со стороны системы свертывания крови, активации тромбоцитов, изменениям со стороны сосудистой стенки и формированию тромбов в сосудах различного калибра. Целью настоящего исследования было изучение взаимосвязи между провоспалительными цитокинами и изменениями основных параметров гемостаза у больных ревматоидным артритом с антифосфолипидным синдромом и без него в сравнительном аспекте. В период с 2024 по 2025 гг. обследовано 120 пациентов в возрасте от 22 до 65 лет с установленным диагнозом ревматоидный артрит. У 32 (26,7 %) больных выявлен антифосфолипидный синдром. Наблюдалась прямая корреляционная зависимость между повышением уровней провоспалительных цитокинов и увеличением количества тромбоцитов, протромбинового индекса, фибриногена, Д-димера и эндотелина-1; и обратная корреляционная зависимость со значениями активированного частичного тромбопластинового времени. Установлено, что повышение концентрации интерлейкина-6, интерлейкина-18 и фактора некроза опухоли- α ассоциировано с усилением гиперкоагуляционного состояния, повышением маркеров эндотелиальной дисфункции и тромбообразования, что, несомненно, ухудшает течение основного заболевания.

Ключевые слова: ревматоидный артрит, антифосфолипидный синдром, гемостаз, провоспалительные цитокины, интерлейкин-6, интерлейкин-18, фактор некроза опухоли- α .

Введение

Ревматоидный артрит (РА) — аутоиммунное заболевание неизвестной этиологии, характеризующееся продолжительным деструктивным воспалением суставов, системными нарушениями в работе внутренних органов, коморбидной патологией, приводящими к пре-

ждевременной потере трудоспособности [1,2]. В актуальных научных публикациях РА характеризуется как аутоиммунное заболевание, для которого свойственно хроническое воспаление, и ключевым аспектом его патогенеза выступает нарушение цитокинового баланса. Цитокины представляют собой важную и универсальную группу факторов иммунной системы. Это белковые

или полипептидные вещества, вырабатываемые преимущественно активированными клетками кроветворной и иммунной систем. Их ключевая роль заключается в выполнении функции медиаторов межклеточных взаимодействий, а также в регуляции иммунных реакций и воспаления [3]. На различных этапах патогенеза РА можно наблюдать активацию как клеточных, так и гуморальных звеньев врождённого и приобретённого иммунитета с нарушением равновесия между противовоспалительными и провоспалительными цитокинами [4,5]. Гиперпродукция последних влечет за собой значительные воспалительные реакции и выработку белков острой фазы, ревматоидного фактора, антител к циклическому цитруллинированному пептиду (АЦЦП) и др. Считается, что провоспалительные цитокины играют значимую роль в патогенезе РА, определяя развитие клинических симптомов и лабораторных изменений на начальных стадиях заболевания. В то же время их влияние на развёрнутой стадии болезни остается недостаточно изученным [5]. Князева Л.И. и соавт. (2014) утверждают, что результаты цитокинового повреждения при РА могут приводить к дисфункции эндотелия, в большей степени на микроциркуляторном уровне, а избыточная продукция интерлейкина-6 (ИЛ-6) в сочетании с С-реактивным белком (СРБ) при длительности течения заболевания более 2 лет потенцирует развитие макрососудистой эндотелиальной дисфункции [6,7]. В настоящее время активно разрабатываются новые лабораторные биомаркеры, которые могут способствовать улучшению диагностики иммуновоспалительных ревматических заболеваний (ИВРЗ) [8]. Одним из рассматриваемых вариантов является изменение уровня интерлейкина-18 (ИЛ-18) в сыворотке крови. Результаты, полученные на моделях лабораторных животных и в ходе клинических исследований, указывают на то, что ИЛ-18 может играть роль в патогенезе различных заболеваний у человека: ИВРЗ, воспалительные процессы в кишечнике, системные васкулиты и др. [9-11]. Также ИЛ-18 является многообещающим объектом для антицитокиновой терапии, прежде всего у лиц с выраженной воспалительной активностью, которая обусловлена гиперактивацией врожденного иммунного ответа [12]. Изучение концентрации цитокинов у пациентов с РА, осложненным сопутствующими болезнями, вызывает значительный научный и клинический интерес, особенно в контексте коморбидности. Анализ цитокинового профиля при наличии сопутствующей патологии представляет собой важную задачу [4]. В последние годы интенсивно изучаются клеточные иммунные механизмы антифосфолипидного синдрома (АФС). Полагают, что важным фактором иммунопатогенеза АФС является дисрегуляция нормального цитокинового баланса с увеличением продукции провоспалительных цитокинов. Изучение клинико-патогенетического значения цитокинов ограничивается единичными сообщениями о повышении сывороточных уровней фактора некроза опухоли — альфа (ФНО- α) и ИЛ-6 при данном

состоянии [13]. Изучение влияния провоспалительных цитокинов, таких как интерлейкин-1, ИЛ-6, интерлейкин-8 и ФНО- α у женщин с АФС и историей прерывания беременности показало их способность инициировать патологические аутоиммунные процессы при определенных обстоятельствах. В этих случаях наблюдается нарушение регуляции «цитокинового каскада», что влечет за собой нарушения со стороны системы свертывания крови, активацию тромбоцитов, изменения со стороны сосудистой стенки и формирование тромбов в сосудах различного калибра [14-16]. Изучение изменений уровней провоспалительных цитокинов может служить важным звеном в диагностике, прогнозировании и мониторинге эффективности лечения. Понимание роли конкретных цитокинов способствует разработке новых таргетных терапевтических стратегий, в том числе, для пациентов, резистентных к стандартной терапии.

Цель исследования

Изучить взаимосвязь между провоспалительными цитокинами (ИЛ-6, ИЛ-18, ФНО- α) и изменениями основных параметров гемостаза у больных РА с АФС и без него в сравнительном аспекте.

Материалы и методы исследования

В период с 2024 по 2025 гг. обследовано 120 пациентов в возрасте от 22 до 65 лет с установленным диагнозом РА. Диагноз АФС верифицирован на основании классификационных критериев АФС, 2023 ACR/EULAR. У 32 (26,7 %) человек выявлен АФС: 28 (87,5 %) женщин и 4 (12,5 %) мужчины. В группе больных РА без АФС было 88 человек: 74 (84,1 %) женщины и 14 (15,9 %) мужчин.

Сравнительная характеристика обеих групп представлена в таблице 1.

Гематологические параметры исследовались с помощью автоматических гематологических анализаторов Medonic и Swelab. Коагулограмма выполнялась при помощи автоматического коагулометра CoaLAB 1000. Уровни ИЛ-6, ИЛ-18, ФНО- α , фибриногена, Д-димера и эндотелина-1 определялись методом иммуноферментного анализа (фотометр Bio-Rad Model 680 Microplate Reader) с использованием наборов реактивов: «Интерлейкин-6-ИФА-БЕСТ», «Интерлейкин-18-ИФА-БЕСТ», « α -ФНО-ИФА-БЕСТ» (АО «Вектор-Бест», Россия).

Статистическая обработка данных выполнялась при помощи программы Statistica 10.0 («StatSoft Inc.», США). Количественные переменные представлены следующими статистическими характеристиками: средним арифметическим значением (М), стандартным отклонением от среднего арифметического значения (σ), 25-м и 75-м процентилями, медианой. Качественные пере-

Таблица 1.
Сравнительная характеристика исследуемых групп

Параметры	РА с АФС (n=32)	РА без АФС (n=88)	P
Пол, n (%)			
женщины	28 (87,5 %)	74 (84,1 %)	н/з
мужчины	4 (12,5 %)	14 (15,9 %)	н/з
Возраст, лет	56,27 [47,5; 64,3]	50,77 [39,7; 61,9]	< 0,05
Длительность заболевания РА, лет	12,35 [3,9; 21,0]	8,84 [3,1; 14,6]	< 0,01
Стадия РА			
очень ранняя	—	2 (2,3 %)	—
ранняя	—	5 (5,7 %)	—
развернутая	—	56 (63,6 %)	—
поздняя	32 (100 %)	25 (28,4 %)	< 0,001
Серопозитивный РА по РФ, n (%)	24 (75 %)	66 (75 %)	н/з
Активность РА по DAS28	6,38 [5,1; 7,7]	5,21 [4,0; 6,3]	< 0,05
Степень активности РА, n (%)			
низкая	—	9 (10,2 %)	—
средняя	4 (12,5 %)	26 (29,6%)	< 0,05
высокая	28 (87,5 %)	53 (60,2 %)	< 0,01
Рентгенологическая стадия РА (по Штейнбрökerу), n (%)			
I стадия	—	7 (8 %)	—
II стадия	4 (12,5 %)	48 (54,5 %)	< 0,01
III стадия	24 (75 %)	28 (31,8 %)	< 0,01
IV стадия	4 (12,5 %)	5 (5,7 %)	н/з
Функциональный класс РА, n (%)			
ФК I	—	10 (11,4 %)	—
ФК II	4 (12,5 %)	49 (55,7 %)	< 0,01
ФК III	25 (78,1 %)	25 (28,4 %)	< 0,01
ФК IV	3 (9,4 %)	4 (4,5 %)	н/з
Лечение, n (%)			
метотрексат	28 (87,5 %)	72 (81,8 %)	н/з
лефлуномид	2 (6,25 %)	9 (10,2 %)	н/з
сульфасалазин	2 (6,25 %)	2 (2,3 %)	н/з
Только нестероидные противовоспалительные препараты	—	5 (5,7 %)	—

*Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования
н/з — незначимо

менные описывались абсолютными и относительными частотами (процентами). Оценка полученных результатов исследования проводилась с использованием непараметрических тестов Манна — Уитни. Результаты считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Исследование одобрено: Локальным этическим комитетом ФГБОУ ВО ОрГМУ Минздрава России (Протокол № 331 от 14 февраля 2024 г.).

Результаты исследования и их обсуждение

Как видно из таблицы 1, пациенты с РА и АФС были старше, длительность заболевания и активность РА по DAS 28 у них была выше, преобладал процент людей с поздней стадией РА, III рентгенологической стадией

Таблица 2.
Изменения уровней ИЛ-6, ИЛ-18, ФНО-α у больных РА с АФС и без АФС

Параметр	РА с АФС	РА без АФС	p
ИЛ-6 (ср.), пг/мл (норма 6 пг/мл)	3,733 [1,431;12,6]	2,556 [0,77;7,858]	< 0,05
ИЛ-6 (min), пг/мл	0	0	—
ИЛ-6 (max), пг/мл	1808	41,376	< 0,001
ИЛ-6 (повыш.), n (%)	17 (53,1 %)	28 (31,8 %)	< 0,01
ИЛ-6 (повыш.), пг/мл	14,79 [12,0;43,75]	12,05 [10,0;18,2]	< 0,05
ИЛ-18 (ср.), пг/мл (норма — 370 пг/мл; диапазон 104–650 пг/мл)	285,19 [173,11;428,47]	266,18 [145,0;342,5]	< 0,05
ИЛ-18 (min), пг/мл	106,051	37,25	< 0,001
ИЛ-18 (max), пг/мл	4157,12	1741,62	< 0,001
ИЛ-18 выше 370 пг/мл, n (%)	13 (40,6 %)	25 (28,4 %)	< 0,01
ИЛ-18 выше 650 пг/мл, чел.	8 (25 %)	11 (12,5 %)	< 0,01
ИЛ-18 (повыш.), пг/мл	482,038 [404,063;820,85]	433,15 [384,34;635,39]	< 0,05
ФНО-α (ср.), пг/мл (норма 6 пг/мл)	2,15 [0,45;10,84]	1,08 [0,34;6,76]	< 0,05
ФНО-α (min), пг/мл	0	0	—
ФНО-α (max), пг/мл	27,46	8,74	< 0,01
ФНО-α (повыш.), n (%)	7 (21,9 %)	12 (13,6 %)	< 0,05
ФНО-α (повыш.), пг/мл	8,3 [6,95;12,84]	7,38 [6,3;10,52]	< 0,05

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

по Штейнброкеру и III ФК. В обеих группах в большем проценте случаев наблюдалась высокая степень активности РА. Изменения уровней провоспалительных цитокинов — ИЛ-6, ИЛ-18, ФНО-α у больных РА с АФС и без АФС представлены в таблице 2.

Таким образом, в условиях коморбидности РА и АФС выявляются значительно более высокие уровни провоспалительных цитокинов, по сравнению с пациентами, страдающими только РА. Повышенные концентрации этих медиаторов воспаления могут свидетельствовать о более выраженной активности иммунопатологических процессов при сочетании этих двух патологий. В обеих группах отмечалась прямая корреляционная зависимость между уровнями провоспалительных цитокинов и скоростью оседания эритроцитов, С-реактивным белком, активностью воспалительного процесса (РА и АФС: $p < 0,01$; РА без АФС: $p < 0,05$). Дополнительно оценивалось влияние провоспалительных цитокинов на изменение содержания эндотелина-1 (ЭТ-1)— мощного вазоконстриктора и медиатора воспаления, у которого отмечают тромбогенную активность, но роль его в этом процессе не до конца изучена. Установлено, что данные цитокины могут оказывать влияние на стимуляцию продукции ЭТ-1, что в дальнейшем будет приводить к развитию эндотелиальной дисфункции у больных РА, особенно в сочетании с АФС. Повышенный уровень ЭТ-1, индуцированный провоспалительными цитокинами, может иметь патологические последствия, внося свой вклад в развитие и прогрессирование сердечно-сосудистых заболеваний и в возникновение жизнеугрожающих сосудистых осложнений, способствуя вазоконстрикции,

адгезии лейкоцитов к эндотелию и пролиферации гладкомышечных клеток. Корреляционная зависимость изменений уровней провоспалительных цитокинов с основными параметрами системы гемостаза и уровнем эндотелина-1 представлена в таблице 3.

В соответствии с данными таблицы, в обеих группах отмечаются взаимосвязи между ИЛ-6, ИЛ-18, ФНО-α и повышенным уровнем тромбоцитов, снижением АЧТВ, повышением ПТИ, фибриногена, Д-димера и ЭТ-1. Причем, в группе больных РА с АФС данные зависимости более выражены. Эта разница может указывать на синергическое влияние АФС на провоспалительный ответ и его последствия для системы гемостаза. Вероятно, присутствие антифосфолипидных антител в дополнение к хроническому воспалению, характерному для РА, усиливает активацию эндотелия, тромбоцитов и факторов свертывания, что приводит к более значительным изменениям в показателях гемостаза в ответ на повышение уровня цитокинов. Комбинация РА и АФС значительно увеличивает риск тромбозов, инсультов и других сосудистых осложнений. Механизмы, которые могут потенциально участвовать в развитии осложнений, включают в себя: взаимную активацию воспалительного процесса, что усиливает повреждение эндотелиальной стенки, повышенную активность тромбоцитов, снижение антикоагулянтных механизмов, секрецию вазоактивных веществ, сосудистый спазм и др. Поврежденный эндотелий теряет способность эффективно регулировать кровоток, вызывает формирование агрегаций тромбоцитов и активирует коагуляционные пути. Клинически это может проявляться в повышенной частоте артериальных и венозных тромбозов.

Таблица 3.

Корреляционные зависимости между уровнями ИЛ-6, ИЛ-18, ФНО-α и некоторыми параметрами системы гемостаза у больных РА с АФС и без АФС

Параметр	РА с АФС			РА без АФС		
	ИЛ-6	ИЛ-18	ФНО-α	ИЛ-6	ИЛ-18	ФНО-α
Тромбоциты	$r=0,156$ $p<0,05$	$r=0,119$ $p<0,05$	$r=0,114$ $p<0,05$	$r=0,124$ $p<0,05$	$r=0,118$ $p<0,05$	$r=0,015$ $p<0,05$
АЧТВ	$r=-0,30$ $p<0,05$	$r=-0,339$ $p<0,05$	$r=-0,36$ $p<0,05$	$r=-0,297$ $p<0,05$	$r=-0,185$ $p<0,05$	$r=-0,244$ $p<0,05$
ПТИ	$r=0,543$ $p<0,01$	$r=0,658$ $p<0,001$	$r=0,551$ $p<0,01$	$r=0,417$ $p<0,01$	$r=0,235$ $p<0,05$	$r=0,411$ $p<0,01$
Фибриноген	$r=0,659$ $p<0,001$	$r=0,736$ $p<0,001$	$r=0,627$ $p<0,001$	$r=0,306$ $p<0,05$	$r=0,361$ $p<0,05$	$r=0,333$ $p<0,05$
Д-димер	$r=0,51$ $p<0,01$	$r=0,589$ $p<0,01$	$r=0,498$ $p<0,01$	$r=0,161$ $p<0,05$	$r=0,142$ $p<0,05$	$r=0,149$ $p<0,05$
Эндотелин-1	$r=0,543$ $p<0,01$	$r=0,663$ $p<0,001$	$r=0,547$ $p<0,01$	$r=0,198$ $p<0,05$	$r=0,224$ $p<0,05$	$r=0,182$ $p<0,05$

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

Выводы

При изучении ревматоидного артрита РА мы часто сталкиваемся с тем, что его течение может осложняться другими состояниями, влияющими на общую картину заболевания, в т.ч. АФС, который при РА недостаточно изучен. Проведенное исследование позволило установить особенности изменений ключевых провоспалительных цитокинов — ИЛ-6, ИЛ-18 и ФНО- α при РА как в сочетании с АФС, так и без него. Установлено, что повышение концентрации изучаемых цитокинов ассоциировано с усилением гиперкоагуляционного состояния, повышением маркеров эндотелиальной дисфункции и тромбообразования, что, несомненно, ухудшает течение основного заболевания. Более выраженные взаимосвязи между

представленными изменениями наблюдались в группе больных РА с АФС. Поэтому, необходимо разработать критерии более тщательного контроля за такими пациентами. Персонализированный подход, основанный на оценке цитокинового профиля и параметров гемостаза, может способствовать улучшению прогноза и снижению частоты развития тромботических осложнений. Результаты исследования открывают новые перспективы для разработки терапевтических стратегий, направленных на коррекцию дисбаланса провоспалительных цитокинов и профилактики тяжелых осложнений. Необходимо дальнейшее исследование для определения оптимального алгоритма мониторинга маркеров воспаления у больных РА, в т.ч. в условиях коморбидности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лапкина Н.А., Баранов А.А., Шутов А.С., Вологина Ю.А., Филатова А.В., Артюхов А.С. Классические провоспалительные цитокины у больных ревматоидным артритом: иммунологические и клинические взаимосвязи // Пациентоориентированная медицина и фармация. 2024. Т2(3). С.13–20. <https://www.patient-oriented.ru/jour/article/view/98>. DOI: 10.37489/2949-1924-0054. EDN: JBQWFW.
2. Chen S.J., Lin G.J., Chen J.W., Wang K.C., Tien C.H., Hu C.F., Chang C.N., Hsu W.F., Hueng-Chuen Fan H.C., Sytwu H.K. Immunopathogenic mechanisms and novel immune-modulated therapies in rheumatoid arthritis // Int J Mol Sci. 2019. Vol.20. Is.6. P.1332. DOI: 10.3390/ijms20061332.
3. Kany S., Vollrath J.T., Relja B. Cytokines in Inflammatory Disease. Int J Mol Sci. 2019;20(23): 6008. DOI:10.3390/ijms20236008.
4. Tan Y., Qi Q., Lu C., Niu X., Bai Y., Jiang C., Wang Y., Zhou Y., Lu A., Xiao C. Cytokine Imbalance as a Common Mechanism in Both Psoriasis and Rheumatoid Arthritis // Mediators of Inflammation. 2017. Vol. 2017. P. 2405291. DOI:10.1155/2017/2405291.
5. Насонов Е.Л. Современная концепция аутоиммунитета в ревматологии // Научно-практическая ревматология. 2023. Т.61(4). С.397–420. <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennaya-kontseptsiya-autoimmuniteta-v-revmatologii>. DOI: 10.47360/1995-4484-2023-397-420.
6. Jarlborg M., Gabay C. Systemic effects of IL-6 blockade in rheumatoid arthritis beyond the joints // Cytokine. 2022. Vol. 149. P.155742. DOI: 10.1016/j.cyt.2021.155742.
7. Князева Л.И. Провоспалительные медиаторы и эндотелиальная дисфункция при ревматоидном артрите // Успехи современного естествознания. 2015. № 2. С. 63–67. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=34702> (дата обращения: 11.07.2025).
8. Mohan C., Assassi S. Biomarkers in rheumatic diseases: How can they facilitate diagnosis and assessment of disease activity? // BMJ. 2015. Vol.351. P. h5079. DOI: 10.1136/bmj.h5079.
9. Kaplanski G. Interleukin-18: Biological properties and role in disease pathogenesis // Immunol Rev. 2018. Vol. 281(1). P. 138–153. DOI: 10.1111/imr.12616.
10. Esmailbeig M., Ghaderi A. Interleukin-18: A regulator of cancer and autoimmune diseases // Eur. Cytokine Netw. 2017. Vol.28(4). P.127–140. DOI: 10.1684/ecn.2018.0401.
11. Yasuda K., Nakanishi K., Tsutsui H. Interleukin-18 in health and disease // Int. J. Mol. Sci. 2019. Vol. 20(3). P.649. DOI: 10.3390/ijms20030649
12. Plater-Zyberk C., Joosten L.A., Helsen M.M., Sattoune-Roche P., Siegfried C., Alouani S., Van De Loo F.A., Graber P., Aloni S., Cirillo R., Lubberts E., Dinarello C.A., Van Den Berg W. B., Chvatchko Y. Therapeutic effect of neutralizing endogenous IL-18 activity in the collagen-induced model of arthritis // J. Clin. Invest. 2001. Vol.108(12). P.1825–1832. DOI: 10.1172/JCI12097.
13. Александрова Е.Н., Новиков А.А., Решетняк Т.М., Попкова Т.В., Ключкина Н.Г., Диатроптова М.А., Черкасова М.В., Денисов Л.Н., Насонов Е.Л. Цитокины и неоптерин при антифосфолипидном синдроме // Научно-практическая ревматология. 2009. №2. С.10–16. <https://cyberleninka.ru/article/n/tsitokiny-i-neopterin-pri-antifosfolipidnom-sindrome/viewer>
14. Бергер И.В., Махмудова А.Д., Мадашева А.Г., Ходжаева Н.Н. Полиморфизм провоспалительных цитокинов в генезе тромбообразования при тромбофилии и АФС // Журнал гуманитарных и естественных наук. 2023. №5. С.43–46. <https://journals.tnmu.uz/index.php/gtfj/article/view/159>
15. Jackson S.P., Darbusse R., Schoenwalder, S.M. Thromboinflammation: problems of therapeutic effects on coagulation and other host defense mechanisms // Blood. 2019. Vol.133. P.906–918. Doi: 10.1182/blood-2018-11-882993.
16. Knight J.S., Kanthi Y. Mechanisms of immunothrombosis and vasculopathy in antiphospholipid syndrome // Semin. Immunopathol. 2022. Vol.44. Is.3. P.347–362. DOI: 10.1007/s00281-022-00916-w.

© Сарычева Юлия Александровна (yualsarycheva@mail.ru); Чернышева Татьяна Викторовна (yualsarycheva@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОФИЛАКТИКЕ ГЕСТАЦИОННОГО САХАРНОГО ДИАБЕТА У ЖЕНЩИН С ФАКТОРАМИ РИСКА

Сизов Алексей Викторович

Кандидат медицинских наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный
педиатрический медицинский университет
avsizov@inbox.ru

MODERN NEW APPROACHES TO THE PREVENTION OF GESTATIONAL DIABETES IN WOMEN WITH RISK FACTORS

A. Sizov

Summary. The relevance of the study is due to the increasing prevalence of gestational diabetes mellitus worldwide and in Russia, as well as the severity of its consequences for mother and child. The purpose of this article is to summarize and analyze current data on new approaches to the prevention of gestational diabetes in women with risk factors, including non-drug and drug-based strategies. The article presents an analysis of the results of clinical trials, meta-analyses and systematic reviews devoted to non-drug (lifestyle modification, diet, physical activity) and drug (myo-inositol, metformin) methods of prevention. The novelty of the study lies in a comprehensive assessment of the effectiveness of various preventive strategies, including the appointment of myo-inositol, the use of vitamin D and probiotics, as well as in the analysis of their impact on cardiometabolic outcomes. Myo-inositol has been shown to reduce the risk of developing gestational diabetes when prescribed in early pregnancy. The choice of prevention method should be personalized, considering individual risk factors (obesity, history of GSD, age, heredity, baseline metabolic status). A combination of several methods (for example, lifestyle modification + myo-inositol) may have a synergistic effect, but additional research is required.

Keywords: gestational diabetes mellitus, GDM, pregnancy, diabetes mellitus, myo-inositol, vitamin D, metformin, risks in pregnancy.

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена ростом распространенности гестационного сахарного диабета во всем мире и в России, а также серьезностью его последствий для матери и ребенка. Цель настоящей статьи — обобщение и анализ современных данных о новых подходах к профилактике гестационного сахарного диабета у женщин с факторами риска, включая немедикаментозные и медикаментозные стратегии. В статье представлен анализ результатов клинических исследований, мета-анализов и систематических обзоров, посвященных немедикаментозным (модификация образа жизни, диета, физическая активность) и медикаментозным (мио-инозитол, метформин) методам профилактики. Новизна исследования заключается в комплексной оценке эффективности различных профилактических стратегий, включая назначение мио-инозитола, применение витамина D и пробиотиков, а также в анализе их влияния на кардиометаболические исходы. Показано, что мио-инозитол снижает риск развития гестационного сахарного диабета при назначении в ранние сроки беременности. Выбор метода профилактики должен быть персонализирован с учётом индивидуальных факторов риска (ожирение, ГСД в анамнезе, возраст, наследственность, исходный метаболический статус). Комбинация нескольких методов (например, модификация образа жизни + мио-инозитол) может иметь синергетический эффект, однако требуются дополнительные исследования.

Ключевые слова: гестационный сахарный диабет, ГСД, беременность, сахарный диабет, мио-инозитол, витамин D, метформин, риски в беременности.

Введение

Актуальность проблемы ГСД определяется не только его высокой распространенностью, но и серьезными последствиями для здоровья матери и ребенка. Факторами риска ГСД, согласно клиническим рекомендациям, являются избыточная масса тела и ожирение до беременности, возраст старше 30 лет, наличие ГСД в анамнезе, отягощенная наследственность по сахарному диабету 2 типа, синдром поликистозных яичников, крупный плод или неблагоприятные исходы предыдущих беременностей. Особое значение ожирения как модифицируемого фактора риска подчеркивается многими исследователями: распространенность ожирения среди беременных достигает 18–39 %, а избыточный вес

и ожирение ассоциированы не только с ГСД, но и с целым спектром неблагоприятных перинатальных исходов, включая дефекты нервной трубки, врожденные пороки сердца и другие аномалии развития [1, 4, 7].

Цель настоящей статьи — обобщение и анализ современных данных о новых подходах к профилактике гестационного сахарного диабета у женщин с факторами риска, включая немедикаментозные и медикаментозные стратегии.

Материалы и методы исследования

Работа представляет собой обзор и систематизацию данных научной литературы, посвященных профилак-

тике гестационного сахарного диабета. Для обработки данных использовались методы контент-анализа, сравнительного анализа и статистического обобщения результатов.

Результаты и обсуждения

Гестационный сахарный диабет (ГСД) представляет собой одно из наиболее частых осложнений беременности, распространенность которого растет во всем мире. По данным Международной федерации диабета, ГСД встречается у 14 % беременных ежегодно, что соответствует 20 миллионам новорожденных, подверженных влиянию нарушений углеводного обмена внутриутробно [13]. В России, по данным 2023 года, заболевание встречается у 13 % беременных. Заболеваемость резко выросла в 2013 году — сразу на 53 %, с 5,1 до 7,8 случаев на 1000 родов [2]. В 2012 году Минздрав опубликовал приказ об изменениях в диагностике диабета у беременных. Если раньше диагноз ставили при концентрации глюкозы в крови от 5,7 ммоль/л, в настоящее время пороговое значение понизили до 5,1 ммоль/л. Кроме того, ввели обязательное повторное тестирование на 24–28 неделе беременности. С декабря 2013 года новые рекомендации стали обязательными. Данные изменения и стали одной из причин резкого роста заболеваемости. Однако рост заболеваемости обусловлен не только этим, о чем говорят его стремительные темпы. Такой тренд наблюдается не только в России: во многих странах гестационный диабет стал встречаться в два-три раза чаще, чем 20 лет назад [2].

Необходимость профилактики ГСД обусловлена последствиями данного заболевания для матери и ребенка. У женщин с ГСД повышен риск развития артериальной гипертензии, преэклампсии, необходимости родоразрешения путем кесарева сечения, а также послеродовой депрессии. У новорожденных, матери которых страдали ГСД, чаще наблюдаются макросомия, неонатальная гипогликемия, гипербилирубинемия и респираторные нарушения. В отдаленной перспективе у женщин, перенёвших ГСД, риск развития сахарного диабета 2 типа увеличивается в 7–10 раз, а у их детей отмечается более высокая вероятность ожирения, метаболического синдрома и нарушений углеводного обмена [1, 7, 11].

Современная стратегия профилактики гестационного сахарного диабета включает несколько направлений, различающихся по механизму действия, эффективности и доступности. Наиболее изученными и доказавшими свою эффективность подходами являются модификация образа жизни (включая диету и физическую активность), а также применение мио-инозитола и других микронутриентов. В последние годы активно исследуется роль метформина и пробиотиков в первичной и вторичной профилактике ГСД.

Основой профилактики ГСД остаётся модификация образа жизни [8]. Результаты многочисленных исследований демонстрируют, что здоровый образ жизни до беременности и на ранних сроках гестации является мощным фактором снижения риска развития ГСД. В исследовании с участием 6980 беременных женщин было показано, что комбинация четырех факторов здорового образа жизни (физическая активность с расходом энергии $\geq 100,1$ метаболического эквивалента в неделю, потребление овощей и фруктов не менее 5 раз в день, продолжительность ночного сна ≥ 7 часов и нормальный индекс массы тела на ранних сроках беременности) снижает риск ГСД на 66 % по сравнению с женщинами, имевшими 0–1 благоприятный фактор [16].

В исследовании, включавшем 199 женщин с избыточной массой тела или ожирением и ГСД в анамнезе, было показано, что потеря веса более чем на 5 % до беременности снижает вероятность рецидива ГСД на 82 % (отношение шансов 0,18; 95 % доверительный интервал 0,04–0,88). При этом программа модификации образа жизни продолжительностью 16 недель позволила достичь значимой потери веса (4,8 кг в группе вмешательства против 0,7 кг в контрольной группе) [15]. Это говорит об особом значении веса до наступления беременности.

Что касается физической активности, то уже 150 минут умеренной или интенсивной физической нагрузки в неделю снижают риск развития ГСД на 41 % [14]. Наиболее выраженный профилактический эффект достигается при сочетании аэробных и силовых упражнений умеренной интенсивности, начатых на ранних сроках беременности и продолжающихся на протяжении всего гестационного периода. Важно отметить, что профилактическое действие физической активности проявляется уже при увеличении общего расхода энергии, без необходимости достижения высоких показателей интенсивности [3, 6, 7].

Диетические подходы к профилактике ГСД также претерпели существенную эволюцию. Если ранее основное внимание уделялось ограничению простых углеводов и общему снижению калорийности рациона, то современные исследования подчеркивают важность качественного состава диеты. Показано, что средиземноморская модель питания, богатая овощами, фруктами, рыбой, оливковым маслом и цельными злаками, ассоциируется со снижением риска ГСД. Напротив, западная диета с высоким содержанием жирных молочных продуктов, красного мяса, фастфуда и сладостей повышает риск развития заболевания. В исследовании, посвященном оценке диетического воспалительного индекса, было продемонстрировано, что здоровая диета с низким провоспалительным потенциалом (богатая овощами и ржаным хлебом) снижает риск ГСД на 73 % (скорректированное отношение шансов 0,27) [5].

Мио-инозитол, представляющий собой природное инсулиноподобное соединение, содержится в злаках, кукурузе, зеленых овощах и мясе и играет ключевую роль в сигнальных путях внутриклеточной передачи сигнала инсулина, повышая чувствительность тканей к инсулину. В последние годы мио-инозитол привлек внимание исследователей как потенциальное средство для профилактики ГСД у женщин с факторами риска.

Систематический обзор и мета-анализ Кокрейновского сотрудничества, включивший четыре рандомизированных контролируемых исследования с участием 567 женщин, показал, что применение мио-инозитола связано со снижением частоты ГСД с 28 % в группе плацебо до 8–18 % в группе вмешательства [12].

Важно отметить, что мио-инозитол не только снижает риск развития ГСД, но и улучшает гликемический профиль у беременных женщин с эугликемией. Также он уменьшает потребность в инсулинотерапии при уже развившемся ГСД, а также риск преждевременных родов и гипертензивных расстройств при беременности [3, 12].

Далее рассмотрим такой метод профилактики ГСД, как прием витамина D и других микронутриентов. Низкое содержание витамина D в сыворотке крови, согласно проведенным исследованиям, повышает риск ГСД, увеличивает частоту ожирения и других метаболических

нарушений у беременных. Напротив, применение достаточной дозы витамина D снижает риск развития ГСД на 36 % (относительный риск 0,64; 95 % доверительный интервал 0,44–0,94) [12]. Эти же исследователи показали, что применение пробиотиков положительно воздействует на суррогатные маркеры кардиометаболического риска, включая уровни глюкозы, липидный профиль и маркеры воспаления, что позволяет рассматривать пробиотики как вспомогательное средство в комплексной профилактике метаболических нарушений у беременных высокого риска [12].

Метформин, хорошо известный как препарат первого ряда для лечения сахарного диабета 2 типа и синдрома поликистозных яичников, в последние годы активно изучается в контексте профилактики ГСД. Действуя через снижение инсулинорезистентности, метформин патогенетически показан для применения у женщин с факторами риска ГСД. Американская диабетическая ассоциация (ADA) в рекомендациях 2025 года предлагает рассматривать метформин для профилактики сахарного диабета 2 типа у лиц с ИМТ ≥ 35 кг/м², повышенным уровнем глюкозы натощак (≥ 6 ммоль/л) и гликированным гемоглобином (HbA1c) $\geq 6,0$ %, а также у женщин с ГСД в анамнезе [10].

Однако, несмотря на доказанную безопасность метформина во время беременности, унифицированные

Таблица 1.

Сравнительная характеристика методов профилактики гестационного сахарного диабета

Метод профилактики	Механизм действия	Рекомендуемые сроки начала	Особенности и дополнительные эффекты
Модификация образа жизни (диета + физическая активность)	Снижение инсулинорезистентности, уменьшение гестационной прибавки веса, улучшение липидного профиля	До беременности (прегравидарная подготовка) и с ранних сроков (до 16 недель)	Наиболее безопасный и доступный метод; положительное влияние на сердечно-сосудистую систему, снижение риска преэклампсии и макросомии
Мио-инозитол	Участвует в передаче сигнала инсулина, повышает чувствительность тканей к инсулину, улучшает функцию β -клеток	С I триместра (оптимально до 16 недель) и до родов	Снижает потребность в инсулинотерапии при уже имеющемся ГСД, уменьшает риск преждевременных родов и гипертензивных расстройств; хорошо переносится
Витамин D (коррекция дефицита: 2000–4000 МЕ/сут под контролем уровня 25(OH)D)	Модуляция иммунного ответа, улучшение секреции инсулина и чувствительности к нему, снижение воспаления	До беременности или с I триместра при выявленном дефиците	Особенно эффективен у женщин с ожирением и гиповитаминозом D; положительное влияние на минеральную плотность костей у матери и плода
Пробиотики	Модуляция состава кишечной микрофлоры, снижение системного воспаления, улучшение метаболических параметров	I–II триместры (длительность не менее 8 недель)	Рекомендуются как вспомогательное средство в комплексной профилактике; положительное влияние на липидный профиль и массу тела
Метформин	Снижение продукции глюкозы печенью, повышение периферической чувствительности к инсулину, уменьшение всасывания глюкозы в кишечнике	Прегравидарно или с I триместра (только при высоком риске и после консультации эндокринолога)	Применяется в основном у женщин с исходными нарушениями углеводного обмена; отсутствуют унифицированные протоколы для рутинной профилактики

рекомендации по его дозировке, срокам и длительности приема для целей профилактики ГСД в настоящее время отсутствуют. Ряд исследований показал, что применение метформина у беременных с ожирением и синдромом поликистозных яичников может снижать частоту ГСД и уменьшать гестационную прибавку веса. Тем не менее, требуются дополнительные крупные рандомизированные исследования для определения оптимальных показаний и режимов дозирования [4, 9].

Выше представлена обобщающая таблица основных методов профилактики ГСД у женщин с факторами риска. Включены наиболее изученные и доказавшие эффективность подходы.

Следует отметить, что выбор метода профилактики должен быть персонализирован с учётом индивидуальных факторов риска (ожирение, ГСД в анамнезе, возраст, наследственность, исходный метаболический статус). Комбинация нескольких методов (например, модификация образа жизни + мио-инозитол) может иметь синергетический эффект, однако требуются дополнительные исследования.

Перспективными направлениями дальнейших исследований нам представляются разработка персонализированных алгоритмов профилактики на основе генетического профиля и метаболического статуса женщины,

изучение роли кишечной микробиоты в патогенезе ГСД и возможности ее коррекции с помощью пробиотиков и пребиотиков, а также оценка экономической эффективности различных профилактических стратегий.

Выводы

В статье представлен анализ результатов клинических исследований, мета-анализов и систематических обзоров, посвященных немедикаментозным (модификация образа жизни, диета, физическая активность) и медикаментозным (мио-инозитол, метформин) методам профилактики. Новизна исследования заключается в комплексной оценке эффективности различных профилактических стратегий, включая назначение мио-инозитола, применение витамина D и пробиотиков, а также в анализе их влияния на кардиометаболические исходы. Показано, что мио-инозитол снижает риск развития гестационного сахарного диабета при назначении в ранние сроки беременности. Выбор метода профилактики должен быть персонализирован с учётом индивидуальных факторов риска (ожирение, ГСД в анамнезе, возраст, наследственность, исходный метаболический статус). Комбинация нескольких методов (например, модификация образа жизни + мио-инозитол) может иметь синергетический эффект, однако требуются дополнительные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волкова Н.И., Давиденко И.Ю., Дегтярева Ю.С. Клиническая характеристика пациенток с гестационным сахарным диабетом в зависимости от вида лечения (ретроспективное исследование) // Медицинский вестник Юга России. — 2024. — №15(4). — С. 31–37. DOI 10.21886/2219-8075-2024-15-4-31-37.
2. В 40 раз выросло число случаев диабета у беременных с 2008 года // Точно. — URL: <https://tochno.st/materials/vyroslo-cislo-slucaev-diabeta-u-beremennyx-s-2008-goda> (дата обращения: 03.04.2026).
3. Давиденко И.Ю., Волкова Н.И., Дегтярева Ю.С. Возможности лечения различных подтипов гестационного сахарного диабета // Фарматека. — 2024. — № 2. — С. 105–110. <https://dx.doi.org/10.18565/pharmateca.2024.2.105-110>.
4. Демидова Т.Ю., Теплова А.С., Степанова Е.В. Роль и место метформина в репродуктивном здоровье женщин: от прегравидарной подготовки до грудного вскармливания // Медицинский Совет. — 2024. — № 12. — С. 142–150.
5. Здоровое питание с низким провоспалительным потенциалом снижает риск гестационного сахарного диабета // Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины. — URL: <https://gncipm.ru/articles/terapevt-news/zdorovoe-pitanie-s-nizkim-provospalitelnympotenczialom-snizhaet-risk-gestacziionnogo-saharnogo-diabeta.html> (дата обращения: 03.04.2026).
6. Надыров К.Т., Самарова У.С., Малгаждарова А.Е., Алдабекова Г.У., Абрашидова С.Б. Распространённость и факторы риска гестационного сахарного диабета // Наука и Здравоохранение. — 2024. — №26 (3). — С. 164–174. doi 10.34689/SH.2024.26.3.019.
7. Османова С.Д., Цахилова С.Г., Царькова М.А., Сашенко А.А. Ожирение как фактор развития гестационного сахарного диабета // Фарматека. — 2022. — № 6. — С. 76–79. <https://dx.doi.org/10.18565/pharmateca.2022.6.76-79>.
8. Российская ассоциация эндокринологов. Клинические рекомендации: Гестационный сахарный диабет // Российская ассоциация эндокринологов. — URL: https://apicr.minzdrav.gov.ru/api.ashx?op=GetClinrecPdf&id=841_1 (дата обращения: 03.04.2026).
9. Феоктистова И.Г., Анциферов М.Б. Метформин при беременности и лактации: обновлённые данные о безопасности // Ожирение и метаболизм. — 2021. — Т. 18, №2. — С. 118–125.
10. American Diabetes Association. 15. Management of Diabetes in Pregnancy: Standards of Care in Diabetes-2025 // Diabetes Care. — 2025. — Vol. 48. — pp. S306–S320.
11. Baddock S., Petersons C. Gestational diabetes: update on screening, diagnosis, and maternal management // Aust Prescr. — 2025. — Vol. 48, № 2. — pp. 45–50.
12. Chan K.Y., Wong M.M.H., Pang S.S.H., Lo K.K.H. Dietary supplementation for gestational diabetes prevention and management: a meta-analysis of randomized controlled trials // Arch Gynecol Obstet. — 2021. — Vol. 303, № 6. — pp. 1381–1391. DOI: 10.1007/s00404-021-06052-0.

13. Luo J., Tong L., Xu A., He Y., Huang H., Qiu D., Guo X., Chen H., Xu L., Li Y., Zhang H., Li Y. Gestational Diabetes Mellitus: New Thinking on Diagnostic Criteria // *Life* (Basel). — 2024. — №14(12). — pp. 1665.
14. Nelson R. Pre-pregnancy lifestyle impacts gestational diabetes risk // *Reuters*. — URL: <https://www.reuters.com/article/2014/10/14/us-health-pregnancy-diabetes-idUSKCN0I322Z20141014/>
15. Phelan S., Jelalian E., Coustan D., et al. Randomized controlled trial of prepregnancy lifestyle intervention to reduce recurrence of gestational diabetes mellitus // *Am J Obstet Gynecol*. — 2023. — № 229(2). — pp. 158.e1–158.e14.
16. Wu L., Ouyang J., Lai Y., Wu P., Wang Y., Ye Y., Wang J., Hu M. at al. Combined healthy lifestyle in early pregnancy and risk of gestational diabetes mellitus: A prospective cohort study // *BJOG*. — 2023. — №130(13). — pp. 1611–1619.

© Сизов Алексей Викторович (avsizov@inbox.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВЛИЯНИЕ АУТОЛОГИЧНЫХ СЕКРЕТОРНЫХ ПРОДУКТОВ НЕЙТРОФИЛОВ (НЕЙТРОФИЛОКИНОВ) НА СКОРОСТЬ ЗАЖИВЛЕНИЯ РАНЫ У БОЛЬНЫХ С РАНЕВОЙ ХИРУРГИЧЕСКОЙ ИНФЕКЦИЕЙ И СРОКИ ИХ ПРЕБЫВАНИЯ В СТАЦИОНАРЕ

EFFECT OF AUTOLOGICAL SECRETION PRODUCTS OF NEUTROPHILS (NEUTROPHILOKINES) ON THE SPEED OF WOUND HEALING IN PATIENTS WITH WOUND SURGICAL INFECTION AND THEIR STATIONARY STAY

I. Tretyakova

Summary. The article shows that when patients with wound surgical infection received local immunocorrection using autologous neutrophilic cytokines obtained by activating granulocytes with adhesion to plastic, there was a tendency to increase the rate of wound defect reduction, as well as to reduce the length of hospital stay.

Keywords: autologous neutrophilic secretory products, local immunocorrection, wound surgical infection, wound healing rate, hospital stay.

Третьякова Ирина Евгеньевна

Доктор медицинских наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Северо-Осетинская государственная медицинская академия, г. Владикавказ
tretjakova.60@mail.ru

Аннотация. В статье показано, что при проведении у больных с раневой хирургической инфекцией локальной иммунокоррекции с помощью аутологичных нейтрофилокинов, полученных при активации гранулоцитов адгезией на пластике, отмечалась тенденция к увеличению скорости сокращения размеров раневого дефекта, а также сокращались сроки пребывания пациентов в стационаре.

Ключевые слова: аутологичные секреторные продукты нейтрофилов, локальная иммунокоррекция, раневая хирургическая инфекция, скорость заживления раны, сроки пребывания в стационаре.

Введение

Проблема заживления и лечения ран была и остается одной из самых актуальных проблем современной медицины [1]. Инфекционные осложнения ран являются не менее важной проблемой хирургии [1]. Одной из причин развития микрофлоры в ране является нарушение, как общего, так и местного иммунного статуса. Установлено, что секреторные продукты нейтрофилов влияют на функциональную активность иммунокомпетентных клеток [2, 3, 4]. Между тем, не изучено действие нейтрофилокинов на регенеративные процессы, происходящие в поврежденных тканях.

В этой связи целью нашего исследования было оценить влияние аутологичных супернатантов активированных нейтрофилов на скорость заживления раны у пациентов с локализованными гнойно-воспалительными заболеваниями мягких тканей туловища и конечностей (абсцессы, карбункулы, флегмоны).

Материалы и методы

Для решения поставленной цели использовали ранее разработанный нами способ локальной иммунокоррекции при раневой хирургической инфекции, основанный на применении аутологичных секреторных продуктов нейтрофилов (нейтрофилокинов) крови больных, обладающих иммуностимулирующим действием [5]. На использование этого способа получено разрешение Этического комитета. Аутологичные секреторные продукты нейтрофилов выделяли после активации гранулоцитов адгезией на пластике [6].

Для анализа заживления ран по типу вторичного натяжения целесообразно динамическое измерение площади раневой поверхности [1]. В связи с этим, у больных с раневой хирургической инфекцией мы определяли процент уменьшения площади раневой поверхности за сутки и величину относительного заживления раны. Для определения этих показателей мы измеряли площадь раневой поверхности дважды: на 5–6 сутки и 13–14 сутки после оперативного вмешательства. Для оцен-

ки эффективности метода локальной иммунокоррекции с помощью аутологических нейтрофилокинов использовали 2 группы обследуемых: 1 — группа сравнения, в которой больные получали лечение по общепринятой схеме. В качестве плацебо использовали изотонический раствор NaCl; 2 — опытная группа, в которой пациентам дополнительно к традиционным методам лечения проводили метод локальной иммунокоррекции с помощью аутологических супернатантов активированных адгезией нейтрофилов.

Полученные результаты исследований были подвергнуты статистической обработке с использованием пакетов статистических программ STADIA 6,3; Statistica for Windows 5,0.

Результаты и обсуждение

Результаты исследования показали, что у больных с раневой хирургической инфекцией в результате проведенного метода локальной иммунокоррекции отмечалась

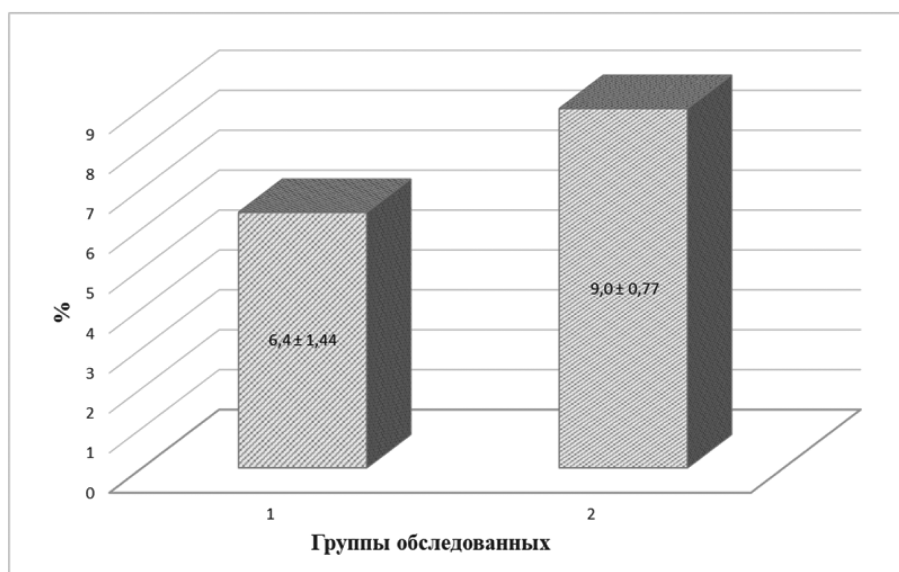


Рис. 1. Влияние аутологических нейтрофилокинов на процент уменьшения площади раневой поверхности за сутки у больных с раневой хирургической инфекцией на туловище и конечностях

Примечание: 1 — группа сравнения (n= 10); 2 — больные, получавшие местно аутонейтрофилокины (n= 10).
Использован критерий Вилкоксона.

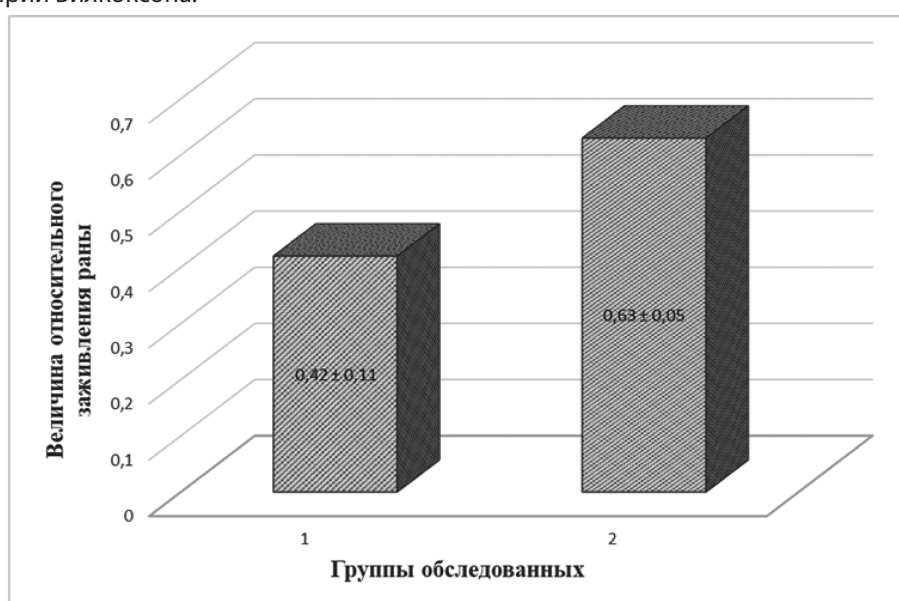


Рис. 2. Влияние аутологических нейтрофилокинов на величину относительного заживления раны у больных с раневой хирургической инфекцией на туловище и конечностях

Примечание: 1 — группа сравнения (n= 10); 2 — больные, получавшие местно аутонейтрофилокины (n= 10).
Использован критерий Вилкоксона.

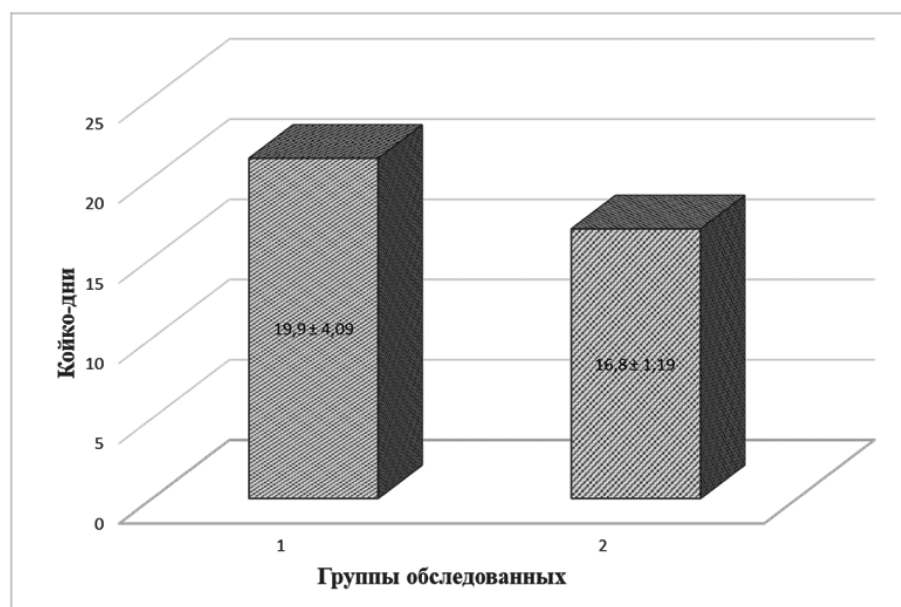


Рис. 3. Влияние аутологичных нейтрофилокинов на продолжительность пребывания больных с раневой хирургической инфекцией в отделении гнойной хирургии

Примечание: 1 — группа сравнения (n= 10); 2 — больные, получавшие местно аутонейтрофилокины (n= 10).

Использован критерий Вилкоксона.

тенденция к росту процента уменьшения площади раневой поверхности за сутки и величины относительного заживления раны по сравнению с первой группой (рис. 1, 2).

Таким образом, в результате проведенного метода локальной иммунокоррекции отмечается тенденция к увеличению скорости сокращения размеров раневого дефекта. Это происходит в результате внеклеточного киллинга, а также иммуномодулирующего влияния аутологичных секреторных продуктов нейтрофилов на эффекторные функции фагоцитов в ране, приводящих к элиминации возбудителя [7, 8], что обеспечивает более успешную регенерацию поврежденных тканей.

С учетом полученных результатов по эффективности местного использования аутологичных нейтрофилокинов у больных с раневой инфекцией, мы проанализировали продолжительность пребывания пациентов в стационаре. Результаты исследования показали, что сроки пребывания в стационаре больных с раневой хирургической инфекцией, которым проводили метод локальной иммунокоррекции, сократились на 2,7–3,1 суток (рис. 3) по сравнению с группой пациентов, получавших лечение по общепринятой схеме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Раны и раневая инфекция / М.И. Кузин, Б.М. Костюченко. — Рипол Классик, 2009. — 106 с.
2. Нейтрофильные гранулоциты как регуляторы иммунитета / А.С. Беляева, Л.В. Ванько, Н.К. Матвеева, Л.В. Кречетова // Журнал «Иммунология». 2016. 37(2). С.129–133.
3. Нейтрофилы и гомеостаз / И.И. Долгушин, О.В. Бухарин. — Екатеринбург, 2001. — 277 с.
4. Alberto Mantovani, Marco A. Cassatella, Sebastien Jaillon. Neutrophils in activation and regulation of innate and adaptive immunity // Nature Reviews Immunology. 2011. Vol.11. P.519–531.
5. Долгушин И.И., Третьякова И.Е., Катунькина Т.В., Латюшина Л.С. Способ локальной иммунокоррекции при раневой хирургической инфекции // Патент РФ № 2234326. — 2004.
6. Третьякова И.Е. Роль секреторных продуктов нейтрофилов в регуляции локальных реакций воспаления и иммунитета.: дис. ... док. мед. наук: 14.00.36: утв. 02.04.2004. Челябинск, 2003. 407 с.
7. Состояние секреторной функции нейтрофилов в норме и в условиях гнойного раневого процесса / И.Е. Третьякова, И.И. Долгушин // Журнал «Иммунология», 2004. 25(5). С. 260–263.
8. Третьякова И.Е. Влияние различных способов активации клеток на уровень секреции провоспалительных цитокинов нейтрофилами крови человека / И.Е. Третьякова // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2025. — № 5–2. — С. 157–159. — DOI 10.37882/2223–2966.2025.05–2.25. — EDN ZFBVFX.

© Третьякова Ирина Евгеньевна (tretjakova.60@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВЗАИМОСВЯЗЬ ИНТОКСИКАЦИИ И ПОЛИОРГАННОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТИ С ТЕЧЕНИЕМ ТЯЖЕЛЫХ И ОСЛОЖНЕННЫХ ФОРМ ОСТРОГО ПАНКРЕАТИТА

Чавга Андрей Иванович

Кандидат медицинских наук, доцент,
Ульяновский государственный университет
andrei.chavga@yandex.ru

RELATIONSHIP BETWEEN INTOXICATION AND MULTIPLE ORGAN FAILURE WITH THE COURSE OF SEVERE AND COMPLICATED FORMS OF ACUTE PANCREATITIS

A. Chavga

Summary. The relevance of research. In complicated forms of acute pancreatitis, high mortality is observed, determined by the development of endogenous intoxication and multiple organ failure.

The purpose of the study is to identify the relationship between the degree of endogenous intoxication, the development of multiple organ failure and the course of severe and complicated forms of acute pancreatitis, with an emphasis on morphofunctional changes in the liver and heart.

Materials and methods of research. The study included patients with confirmed acute pancreatitis. The main group consisted of those who died with severe complicated course and liver damage, the control group consisted of those who died with moderate to severe uncomplicated course. The severity criteria were assessed according to the clinical scale and the presence of organ dysfunction. The analysis included pathoanatomic, hematological and biochemical data. Morphofunctional changes in the liver and myocardium were assessed histologically with morphometry. The study showed that intoxication is an integral component of the pathogenesis of acute pancreatitis, which is manifested in all patients. Severe intoxication syndrome prevailed in the main group. The disease was complicated by shock conditions, including septic, hypovolemic, cardiogenic shock, and toxic shock syndrome. The leading factor in endogenous intoxication was massive necrosis of pancreatic tissues. Morphological examination of the myocardium revealed dystrophic changes in cardiomyocytes and interstitial edema, the degree of which was directly dependent on the severity of endogenous intoxication. Signs of centrilobular necrosis, cholestasis, and fibrosis were found in the liver, and the severity of these changes correlated with the level of intoxication markers and the presence of multiple organ failure.

Conclusions. The study established a relationship between the severity of endogenous intoxication, morphofunctional changes in the liver and myocardium, and the development of multiple organ failure in severe acute pancreatitis. It has been shown that the degree of damage to the liver and heart is directly proportional to the severity of intoxication and serves as an independent predictor of an unfavorable outcome. The data obtained make it possible to clarify the pathogenesis of multiple organ failure in acute pancreatitis and substantiate the need for early correction of intoxication to reduce the risk of organ damage.

Keywords: acute pancreatitis, intoxication, multiple organ failure, peritonitis, necrosis, cardiodepression.

Аннотация. Актуальность исследования. При осложнённых формах острого панкреатита наблюдается высокая летальность, определяемая развитием эндогенной интоксикации и полиорганной недостаточности.

Цель исследования — выявить взаимосвязь между степенью эндогенной интоксикации, развитием полиорганной недостаточности и течением тяжёлых и осложнённых форм острого панкреатита с акцентом на морфофункциональные изменения печени и сердца.

Материалы и методы исследования. В исследование включены пациенты с подтверждённым острым панкреатитом. Основную группу составили умершие с тяжёлым осложнённым течением и поражением печени, контрольную — умершие со среднетяжёлым и тяжёлым неосложнённым течением. Критерии тяжести оценивали по клинической шкале и наличию органной дисфункции. Анализ включал патологоанатомические, гематологические и биохимические данные. Морфофункциональные изменения печени и миокарда оценивали гистологически с морфометрией.

Результаты. Исследование показало, что интоксикация является неотъемлемым компонентом патогенеза острого панкреатита, в той или иной степени проявляющимся у всех пациентов. Выраженный синдром интоксикации преобладал в основной группе. Заболевание осложнялось шоковыми состояниями, среди которых встречались септический, гиповолемический, кардиогенный шок, а также синдром токсического шока. Ведущим фактором эндогенной интоксикации выступал массивный некроз тканей поджелудочной железы. При морфологическом исследовании в миокарде выявлены дистрофические изменения кардиомиоцитов и интерстициальный отёк, степень которых находилась в прямой зависимости от выраженности эндогенной интоксикации. В печени обнаружены признаки центроlobулярного некроза, холестаза и фиброза, причём тяжесть этих изменений коррелировала с уровнем маркеров интоксикации и наличием полиорганной недостаточности.

Выводы. В ходе исследования установлена взаимосвязь между выраженностью эндогенной интоксикации, морфофункциональными изменениями печени и миокарда и развитием полиорганной недостаточности при тяжёлом остром панкреатите. Показано, что степень повреждения печени и сердца прямо пропорциональна тяжести интоксикации и служит независимым предиктором неблагоприятного исхода. Полученные данные позволяют уточнить патогенез полиорганной недостаточности при остром панкреатите и обосновывают необходимость ранней коррекции интоксикации для снижения риска органных повреждений.

Ключевые слова: острый панкреатит, интоксикация, полиорганная недостаточность, перитонит, некроз, кардиодепрессия.

Введение

Острый панкреатит (ОП) представляет собой одну из наиболее распространенных и опасных абдоминальных патологий, характеризующихся высокими показателями заболеваемости и летальности. Особую актуальность приобретает изучение тяжелых и осложненных форм данного заболевания, сопровождающихся развитием интоксикации и полиорганной недостаточности (ПОН).

Диагноз ОП требует наличия двух из следующих трех признаков: абдоминальная боль (острое начало постоянной сильной эпигастральной боли, часто иррадиирующей в спину); показатели сывороточной липазы (амилазы) по крайней мере, в 3 раза выше верхней границы нормы; характерные признаки ОП при контраст-усиленной КТ или магнитно-резонансной томографии (МРТ) и трансабдоминальном УЗИ.

По тяжести ОП делится на легкий, средней тяжести и тяжелый. Легкий ОП — нет органной недостаточности, нет локальных или системных осложнений. Средней тяжести ОП — органная недостаточность, которая разрешается в течение 48 часов (преходящая органная недостаточность) и/или локальные или системные осложнения без продолжающейся органной недостаточности. Тяжелый ОП — продолжающаяся более 48 часов органная недостаточность. Развитие инфицированного некроза у пациентов с продолжающейся органной недостаточностью связано с крайне высокой смертностью.

Осложнения делятся на общие — органная недостаточность и местные — острое перипанкреатическое скопление жидкости, панкреатическая псевдокиста, острое некротическое скопление и отграниченный некроз. К местным осложнениям относятся также нарушение эвакуации из желудка, тромбоз селезеночной и воротной вен и некроз ободочной кишки.

Для определения органной недостаточности должны быть оценены три системы органов: дыхательная, сердечно-сосудистая и почечная. Предлагается использовать с этой целью модифицированную шкалу Marshall. Если имеется 2 и более баллов по данной шкале, то органная недостаточность присутствует [9].

В этиологии летальных исходов при остром панкреатите ведущая роль отводится развитию сердечно-сосудистой и полиорганной недостаточности, спровоцированной инфекционно-токсическим шоком [1]. Несмотря на совершенствование методов диагностики и терапевтических подходов, показатели смертности при данной патологии остаются стабильно высокими, варьируясь в диапазоне от 15 до 100 % в зависимости от степени поражения поджелудочной железы и наличия/отсутствия

инфицирования некротических зон [3]. Патологическая цепь событий, приводящих к полиорганной недостаточности и летальному исходу, инициируется чрезмерной системной воспалительной реакцией, обусловленной неконтролируемой активацией иммунных механизмов и аутоагрессией с повреждением клеток поджелудочной железы [4].

Цель и задачи исследования

Цель исследования — изучить особенности взаимосвязи между интоксикацией и развитием полиорганной недостаточности у пациентов с тяжелым и осложненным течением острого панкреатита, оценить морфофункциональные изменения печени и сердца при различных степенях тяжести заболевания.

В ходе исследования решались следующие задачи:

1. Оценить степень выраженности эндогенной интоксикации у пациентов с тяжёлым и осложнённым течением острого панкреатита (включая перитонит, панкреонекроз) по клинико-лабораторным маркерам
2. Выявить морфологические изменения миокарда
3. Изучить динамику биохимических показателей печени
4. Установить взаимосвязь между степенью морфофункциональных изменений печени и сердца, выраженностью интоксикации и развитием полиорганной недостаточности.

Материалы и методы исследования

Исследование было проведено на материале патологоанатомических вскрытий пациентов, умерших от тяжелого острого панкреатита. Причиной летальных исходов послужили: развитие полиорганной недостаточности, инфекционно-токсический шок, септические осложнения, острая сердечно-сосудистая недостаточность.

В исследование были включены две группы пациентов. Основная группа (N=48) — пациенты с тяжелым и осложненным течением острого панкреатита и значимым поражением печени:

- Средний возраст: $51,7 \pm 15,7$ лет;
- Мужчины: 27 человек (56,25 %);
- Женщины: 21 человек (43,75 %).

Контрольная группа (N=46) — пациенты со среднетяжелым течением острого панкреатита:

- Средний возраст: $52,6 \pm 16,2$ года;
- Мужчины: 25 человек (54,3 %);
- Женщины: 21 человек (45,7 %).

Критерии тяжести были следующие: клинические показатели, лабораторные маркеры, органная дисфункция, осложнения.

Клинические показатели: интенсивность болевого синдрома (интенсивная, некупируемая боль), наличие перитонеальных симптомов, состояние гемодинамики (артериальная гипотензия, тахикардия), наличие симптомов эндотоксикоза (температура выше 38°C, спутанность сознания).

Лабораторные критерии включали уровень амилазы крови выше 1000 Ед/л, уровень липазы выше 500 Ед/л, повышение маркеров эндогенной интоксикации (С-реактивный белок, прокальцитонин), нарушение показателей гемограммы (лейкоцитоз выше $15 \times 10^9/\text{л}$).

Органная дисфункция включала такие параметры, как нарушение функции почек (повышение креатинина), дыхательная недостаточность (снижение SpO_2), печёночная дисфункция (повышение АСТ, АЛТ, билирубина), сердечно-сосудистые нарушения.

Шкала APACHE II:

- оценка выше 8 баллов для тяжёлого течения;
- оценка 5–7 баллов для среднетяжёлого течения.

Также учитывалось наличие осложнений: местные (панкреонекроз, перитонит, абсцессы); системные (инфекционно-токсический шок, полиорганная недостаточность).

Методы исследования включали: анализ медицинской документации; патологоанатомическое исследование; гистологическое исследование образцов тканей поджелудочной железы, печени и сердца; морфометрическую оценку патологических изменений; анализ биохимических показателей крови; статистическую обработку данных.

Все исследования проводились на аутопсийном материале с соблюдением этических норм и правил проведения патологоанатомических исследований. В исследование включены две группы пациентов: контрольная и с верифицированным поражением печени. Для оценки динамики биохимических изменений при остром панкреатите проведён проспективный мониторинг ключевых лабораторных показателей на 1-е, 3-и и 5-е сутки заболевания. Выбор этих сроков был обусловлен периодами максимальной метаболической нестабильности и формирования системного воспалительного ответа.

Биохимическое обследование включало определение маркеров цитолиза (АСТ, АЛТ), холестаза (билирубин), синтетической функции печени (общий белок), метаболических нарушений (липидный профиль) и коагуляционного статуса (фибриноген). Статистическая обработка выполнена с использованием критерия Манна–Уитни для межгрупповых сравнений и непараметрических методов для анализа динамики. В ходе детально-

го патологоанатомического исследования были изучены основные патогенетические механизмы острого панкреатита у пациентов с летальным исходом.

Результаты и обсуждения

Рассмотрим осложнения и их сочетаемость. У 63 % пациентов зафиксировали классическую триаду эндогенной интоксикации: гипертермию выше 38,5°C, лейкоцитоз более $15 \times 10^9/\text{л}$ и повышение маркеров системного воспаления. Перитонит диагностировали у 28,5 % — от локальных форм до распространённого процесса с фибринозными наложениями и серозно-гнойным выпотом. Шок развился у 7,5 % больных; в 5 % случаев речь шла о септическом, в 2 % — о гиповолемическом шоке. Кардиогенная форма самостоятельно не встречалась, возникая лишь как проявление полиорганной недостаточности на фоне тяжёлого эндотоксикоза. Отметим, что осложнения редко были изолированными. У 45 % пациентов с перитонитом одновременно присутствовал выраженный эндотоксический синдром. Такое сочетание не случайно: именно перитонит выступает мощным триггером системного воспалительного ответа, усугубляя интоксикацию.

Рассмотрим летальность и ключевые механизмы. При анализе летальных исходов выделены четыре основных звена: массивный некроз поджелудочной железы, нарушение барьерной функции кишечника, прогрессирующая полиорганная недостаточность и тяжёлые гемодинамические расстройства. Решающим фактором неблагоприятного прогноза служила степень эндотоксикоза. Она сочеталась с распространённостью некротических изменений в поджелудочной железе. Следовательно, была статистически подтверждена взаимосвязь между степенью эндотоксикоза, наличием перитонита и развитием полиорганной недостаточности.

В процессе морфологического исследования аутопсийного материала у пациентов с тяжёлым течением острого панкреатита были выявлены характерные изменения структуры сердечной мышцы. При этом статистический анализ (коэффициент корреляции Пирсона, $p < 0,05$) показал значимую связь между состоянием тканей миокарда и выраженностью патологических изменений. В группе с острым панкреатитом, осложнённым перитонитом и эндотоксикозом, морфологическая картина характеризовалась сохранной архитектоникой кардиомиоцитов с овальными ядрами, центрально расположенными по отношению к клеткам, при умеренном интерстициальном отёке. По мере прогрессирования патологического процесса нарастали гипертрофия кардиомиоцитов, мелкоочаговый кардиосклероз, очаговые ишемические повреждения, полнокровие сосудистого русла и выраженный отёк межклеточного пространства. В результате проведенного корреляционного анализа

Таблица 1.

Корреляционная зависимость между исходным диагнозом, осложнением, результатами гистологии

	Исходный диагноз	Осложнение	Гистология	Отек
Исходный диагноз	–	–0,302455133	0,06415392	–0,017641288
Осложнение	–0,302455133	–	–0,10884956	–0,120273311
Гистология	0,064153917	–0,108849563	–	0,889708718*
Выраженность отека	–0,017641288	–0,120273311	0,88970872*	

была выявлена прямая зависимость между степенью повреждения кардиомиоцитов и тяжестью патологических изменений сердечной мышцы, что представлено в таблице 1.

Наиболее важным результатом исследования является сильная положительная корреляция ($r = 0,8897$) между состоянием тканей сердечной мышцы и выраженностью отека, что указывает на прямую зависимость между структурными изменениями миокарда и отеками явлениями.

Полученные коэффициенты корреляции демонстрируют следующие закономерности. Так, была получена отрицательная умеренная связь между исходным диагнозом и развившимися осложнениями ($r = -0,3024$). Это показывает, что тяжесть исходного состояния влияет на вероятность развития осложнений, хотя и не является определяющим фактором. Важно отметить, что прямые причинно-следственные связи между этими параметрами были выражены не явно. Этот вывод подтверждается полученными слабыми отрицательными корреляциями между осложнениями и гистологическими изменениями ($r = -0,1088$), а также между осложнениями и отеком ($r = -0,1202$). Следовательно, выявленные корреляционные зависимости отражают сложный патогенетический механизм развития кардиальных изменений при остром панкреатите. Здесь основным фактором выступает выраженность эндотоксикоза и степень повреждения поджелудочной железы.

Сохранение упорядоченной структуры кардиомиоцитов было отмечено при проведении гистологического исследования сердца у большинства пациентов с острым панкреатитом. Причем данная тенденция выявлялась, несмотря на развитие умеренного интерстициального отека. Отек межклеточного пространства сопровождался умеренной гипертрофией кардиомиоцитов, склерозом и признаками ишемии. Тогда как при множественных нарушениях в структуре сердечной мышцы, наблюдался выраженный интерстициальный отек, выраженная гипертрофия кардиомиоцитов, кардиосклероз. Данные морфологические изменения, как правило, не сопровождаются грубыми структурными повреждениями кардиомиоцитов (рис. 1).

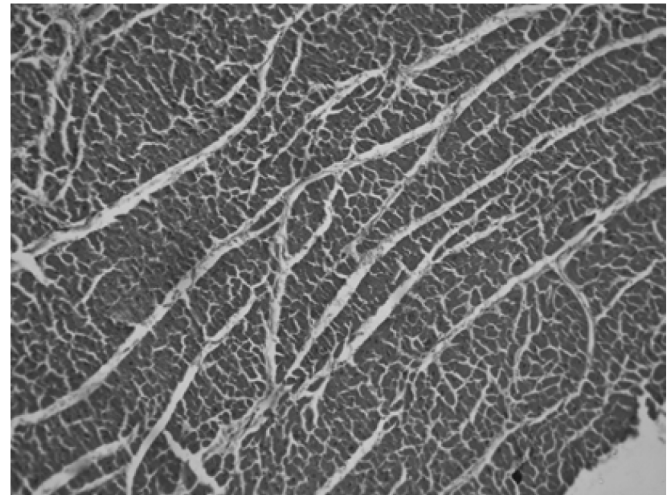


Рис. 1. Гистологическая картина сердца: кардиомиоциты расположены правильными рядами, ядра овальные, в центре клеток, умеренный интерстициальный отек (микроскоп Leika DM E, фото, камеры микроскопа Leika EC3)

В целом, сохранение упорядоченного расположения рядов кардиомиоцитов на фоне умеренного интерстициального отека миокарда отражает относительную сохранность функциональных резервов сердечной мышцы при остром панкреатите. Данная гистологическая картина свидетельствует о способности миокарда адаптироваться к развивающимся гемодинамическим нарушениям и сохранять насосную функцию сердца на фоне системной воспалительной реакции. Дальнейшее прогрессирование и нарастание выраженности интерстициального отека является следствием нарушений микроциркуляции и повышения сосудистой проницаемости, обусловленных системной воспалительной реакцией. При умеренной гипертрофии кардиомиоцитов, измененном рисунке сердца, признаках склероза, развивался преимущественно отек межмышечного пространства (рис. 2).

В случаях более выраженных структурных нарушений в миокарде, сопровождающихся множественными морфологическими изменениями, отмечается более выраженный интерстициальный отек, значительная гипертрофия кардиомиоцитов, а также более распространен-

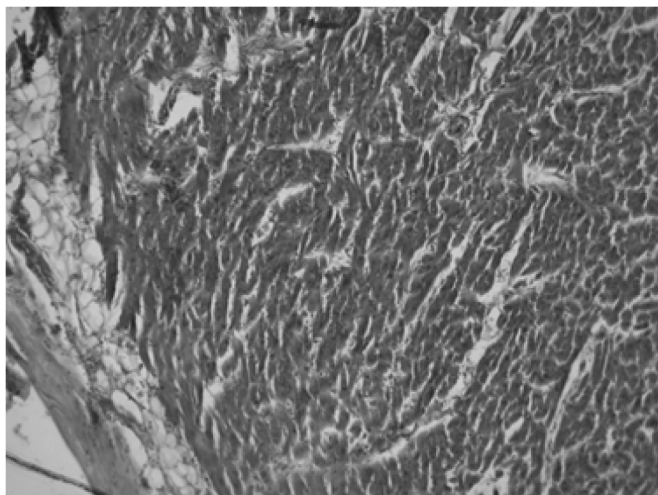


Рис. 2. Гистологическая картина сердца: гипертрофия кардиомиоцитов, отек межмышечных пространств (микроскоп Leika DM E, фото, камеры микроскопа Leika EC3)

ные склеротические процессы. Данная гистологическая картина свидетельствует о более глубоких адаптационно-компенсаторных перестройках миокарда, возникающих в ответ на тяжелое повреждение сердечной мышцы (рис. 3).

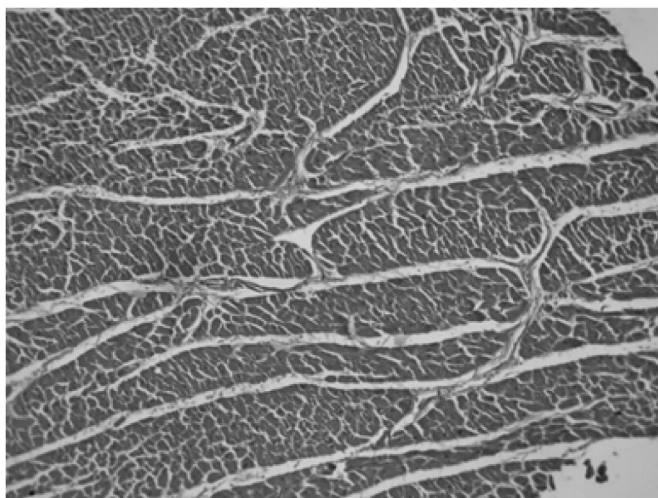


Рис. 3. Гистологическая картина сердца: выраженный интерстициальный отек, выраженная гипертрофия КМЦ (микроскоп Leika DM E, фото, камеры микроскопа Leika EC3)

Выраженный интерстициальный отек и грубые структурные нарушения в миокарде, как правило, наблюдаются при наиболее тяжелом течении острого панкреатита, сопровождающемся развитием выраженной системной воспалительной реакции, гемодинамическими расстройствами и полиорганной недостаточностью. В этих случаях адаптационные возможности миокарда истощены, что предрасполагает к развитию тяжелых нарушений сократительной функции сердца.

Таким образом, тесная взаимосвязь между степенью выраженности интерстициального отека, гипертрофическими процессами, склеротическими изменениями и ишемическим повреждением миокарда отражает сложные адаптационно-компенсаторные механизмы, запускаемые в сердечной мышце при остром панкреатите. Характер и выраженность этих морфологических изменений коррелируют с тяжестью течения заболевания и риском развития сердечно-сосудистых осложнений.

В целом, результаты изучения анамнеза пациентов и результаты гистологических исследований указывают на то, что у большинства пациентов с тяжелыми осложнениями в виде перитонита, интоксикации наблюдались выраженные изменения со стороны сердечной мышцы, кардиомиоцитов. Результаты гистологических исследований показали гипертрофию кардиомиоцитов, кардиосклероз, в некоторых случаях — ишемические процессы, участки кровоизлияния. У многих наблюдался умеренный и выраженный отек интерстициальной ткани. Была выявлена достоверно значимая корреляционная зависимость между состоянием тканей сердечной мышцы и выраженностью отека. У многих пациентов, которые изначально поступили с острым или хроническим панкреатитом, с выраженным перитонитом, интоксикацией, кардиомиоциты располагались правильными рядами, ядра были овальными, располагались в центре клеток. У таких пациентов наблюдался умеренный интерстициальный отек.

Таким образом, острый панкреатит сопровождается развитием эндогенной интоксикации, которая приводит как к структурным, так и к функциональным нарушениям внутренних органов [5, 7]. У пациентов с выраженным перитонитом и сильной интоксикацией наблюдалась умеренная гипертрофия кардиомиоцитов [6], полнокровие сосудов [13], умеренный кардиосклероз [11]. При этом у многих пациентов наблюдался выраженный отек межклеточного пространства [8]. У пациентов с выраженной гипертрофией кардиомиоцитов, наблюдался выраженный интерстициальный отек [10]. Во многих микропрепаратах сердца при этом наблюдались явления мелкоочагового кардиосклероза, явления очагового ишемического повреждения [12]. Прослеживалась прямая корреляционная зависимость между характеристиками ткани и выраженностью отека. То есть, чем более тяжелыми были нарушения кардиомиоцитов, их гипертрофия, тем более выраженным и тяжелым был отек окружающих тканей. И наоборот, незначительные изменения кардиомиоцитов, сердечной ткани сопровождалась незначительным, умеренным отеком [2]. Полученные данные согласуются с результатами исследований P.K. Garg и V.P. Singh, показавших, что системное воспаление при остром панкреатите напрямую коррелирует с развитием органной дисфункции, включая сердечно-сосудистые нарушения [14]. Как отмечают

A. Marukhov с соавторами, именно эндогенная интоксикация является основным патогенетическим фактором, приводящим к полиорганной недостаточности при тяжёлом остром панкреатите [16].

С учетом того, что поражение печени было критерием, выявленным ретроспективно, далее автором была оценена динамика поражения печени (табл. 2).

Согласно данным таблицы, трансаминазы (АСТ, АЛТ) в группе с поражением печени значимо повышались к 3-м и 5-м суткам ($p < 0,001$), отражая прогрессирующий цитоллиз. Билирубин возрастал уже в первые сутки, достигая значимости к 5-м суткам ($p = 0,00036$), что указывает на развитие холестаза. Общий белок оставался стабильным в обеих группах — синтетическая функция печени сохранялась даже при её поражении. При этом уровень холестерина в группе с поражением печени снижался, что связано с нарушением липидного метаболизма и жировой дистрофией. Фибриноген к 5-м суткам критически повышался ($p = 0,00159$), свидетельствуя об активации коагуляционного каскада и гиперкоагуляции.

Выявленные изменения подтверждают развитие мультиорганной дисфункции: поражение печени (рост трансаминаз и билирубина), метаболические нарушения (изменение липидного профиля), коагулопатия (повышение фибриногена) и эндотоксикоз. Динамика нейтрофильной эластазы и маркеров интоксикации согласуется с данными I.D. Duzhyi с соавторами о прямой корреляции протеолитических процессов с тяжестью эндотоксикоза при остром панкреатите [15].

Выводы

В данном исследовании установлена прямая связь между степенью эндогенной интоксикации и развитием полиорганной недостаточности, ключевым звеном которой выступает массивный некроз поджелудочной железы. Выраженный синдром интоксикации выявлен у большинства пациентов, что подтверждает его центральную роль в патогенезе. Морфологические изменения органов коррелировали с тяжестью процесса. В миокарде зафиксированы изменения от умеренного интерстициального отёка до гипертрофии кардиомио-

Таблица 2.

Динамика основных биохимических показателей при остром панкреатите

Показатель	Контроль		Значимое поражение печени		p-value
	М	м	М	м	
АСТ 1 сутки	263,4391	222,9818	232,112	189,8669	0,467265
АСТ 3 сутки	140,4667	103,9613	158,645	276,257	0,000691
АСТ 5 сутки	88,39976	89,64257	110,4742	173,291	0,004892
АЛТ 1 сутки	246,8717	201,5094	243,334	238,2859	0,938611
АЛТ 3 сутки	154,6929	116,5298	171,5	194,2454	0,00387
АЛТ 5 сутки	88,53415	71,604	106,9968	120,9082	0,00282
Билирубин 1 сутки	45,99348	8,0082	66,99804	7,54188	0,085362
Билирубин 3 сутки	43,12143	6,92061	42,12275	6,54531	0,000719
Билирубин 5 сутки	22,36829	3,81809	30,26419	9,38857	0,00036
Белок 3 сутки	65,935	7,864544	64,17949	9,582527	0,375663
Белок 5 сутки	62,56341	8,335999	63,57407	9,273685	0,641488
Холестерин 1 сутки	5,59875	1,133155	4,775455	1,577576	0,2264
Холестерин 3 сутки	5,618571	1,411033	4,205	2,340523	0,300676
Триглицериды 1 сутки	1,655	0,770746	1,725	1,69745	0,956362
Фибриноген 1 сутки	373,0667	104,4293	358,5556	121,9008	0,545782
Фибриноген (?) 3 сутки	450	102,733	468,7857	178,517	0,742976
Фибриноген (?) 5 сутки	455,4762	146,9941	647,8571	143,0867	0,00159

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

цитов и очагового кардиосклероза; выявлена сильная корреляционная связь между состоянием тканей и выраженностью отёка ($r = 0,8897$). В печени наблюдались центрлобулярный некроз, холестаз и фиброз, степень которых коррелировала с уровнем маркеров интоксикации. Выявлено, что летальные исходы обусловлены полиорганной недостаточностью, инфекционно-токсическим шоком (у 7,5 % пациентов, преимущественно септического генеза) и сердечно-сосудистыми осложнениями. В ходе исследования установлена взаимосвязь между выраженностью эндогенной интоксикации, мор-

фофункциональными изменениями печени и миокарда и развитием полиорганной недостаточности при тяжёлом остром панкреатите. Показано, что степень повреждения печени и сердца прямо пропорциональна тяжести интоксикации и служит независимым предиктором неблагоприятного исхода. Полученные данные позволяют уточнить патогенез полиорганной недостаточности при остром панкреатите и обосновывают необходимость ранней коррекции интоксикации для снижения риска органных повреждений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Багненко С.Ф., Гольцов В.Р., Савелло В.Е. Классификация острого панкреатита // Вестник хирургии. — 2015. — № 1. — С. 86–92.
2. Басов Ф.В., Тарасенко В.С., Стадников А.А. Структурно-функциональная характеристика изменений в поджелудочной железе в условиях экспериментального острого панкреатита при воздействии перфторана // Оренбургский медицинский вестник. — 2018. — № 4 (15). — С. 32–35.
3. Баулин А.А., Аверьянова Л.А., Баулин В.А. Важность диагностического алгоритма на этапах маршрутизации пациентов с острым панкреатитом // Вестник СурГУ. Медицина. — 2022. — № 4(54). — С. 36–40.
4. Белик Б.М., Чернов В.Н., Алибеков А.З. Выбор лечебной тактики у больных острым деструктивным панкреатитом // Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова. — 2015. — № 6. — С. 26–31.
5. Гройзик К.Л., Костырной А.В., Алексеева Е.С. Новые возможности лечения острого панкреатита // Таврический медико-биологический вестник. — 2022. — № 25(2). — С. 38–43.
6. Дюжева Т.Г., Джус Е.В., Шефер А.В. Конфигурация некроза поджелудочной железы и дифференцированное лечение острого панкреатита // Анналы хирургической гепатологии. — 2013. — № 18(1). — С. 92–102.
7. Карпенко Д.Г., Дрютова В.В., Ларина В.Н. Клиническое наблюдение пациентки среднего возраста с маскированным течением панкреонекроза, наблюдающейся в амбулаторных условиях // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. — 2022. — № 204(8). — С. 198–205.
8. Мидленко О.В., Мидленко И.В., Чавга А.И. Современные представления о роли гемодинамических нарушений в патогенезе острого панкреатита // Ульяновский медико-биологический журнал. — 2023. — № 2. — С. 30–46.
9. Федоровский В.В. Современная международная классификация острого панкреатита — очередной пересмотр // Journal of Siberian Medical Sciences. — 2015. — № 1. — С. 1–9.
10. Халимов Э.В., Михайлов А.Ю., Соловьев А.А. Эндотелиальная дисфункция в оценке степени тяжести острого панкреатита // Вестник современной клинической медицины. — 2022. — № 15 (6). — С. 117–121.
11. Халимов М.Ш., Файзуллаев Б.Б. Асатуллаев Ж.Р. К вопросу о классификации острого панкреатита // Вестник экстренной медицины. — 2021. — № 14 (6). — С. 89–92.
12. Чавга А.И. Совершенствование подходов к диагностике и лечению острого панкреатита различной степени тяжести / А.И. Чавга, О.В. Мидленко, В.И. Мидленко: монография. — М.: Научные технологии, 2024. — 123 с.
13. Черданцев Д.В., Строев А.В., Первова О.В. Проблема острого панкреатита в Красноярском крае // Современные проблемы науки и образования. — 2019. — № 2. — С. 52–56.
14. Garg P.K., Singh, V.P. Organ Failure Due to Systemic Injury in Acute Pancreatitis // Gastroenterology. — 2019. — № 156 (7). — С. 2008–2023.
15. Duzhyi I.D. Efficiency of early use of lymphotropic antibacterial therapy in patients with acute pancreatitis / I.D. Duzhyi, O.L. Sytnik, H.I. Piatykov, M.A. Khakhaliev, I.A. Symonenko // Kharkiv Surgical School. — 2024. — № 2-3. — pp. 177–182.
16. Marukhov A., Khoroshilov S., Zakharov M. et al. Extracorporeal detoxification in complex treatment of severe acute pancreatitis // Russian Journal of Anesthesiology and Reanimatology. — 2020. — № 5. — pp. 23–29.

© Чавга Андрей Иванович (andrei.chavga@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОСОБЕННОСТИ ЦИТОКИНОВОГО СТАТУСА У ПАЦИЕНТОВ С ГЕМОБЛАСТОЗАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВОЗРАСТА И ИСХОДА ЗАБОЛЕВАНИЯ ДО И ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ ПОЛИХИМИОТЕРАПИИ, ОСЛОЖНЕННОЙ СЕПСИСОМ

FEATURES OF THE CYTOKINE STATUS IN PATIENTS WITH HEMOBLASTOSES, DEPENDING ON THE AGE AND OUTCOME OF THE DISEASE, BEFORE AND AFTER POLYCHEMOTHERAPY COMPLICATED BY SEPSIS

**A. Yurkin
A. Shchegolev
E. Yurkina
M. Toporkov**

Summary. In patients with hematologic malignancies, the use of intensive chemotherapy protocols can often be associated with the development of infectious complications, particularly sepsis. The analysis of the obtained data demonstrated age-specific features of the cytokine profile in patients with oncohematological pathology complicated by sepsis during antitumor therapy. Dynamic evaluation of interleukin and interferon levels allows for the verification of immune response impairments and the prediction of the risk of fatal outcomes in the event of infectious complications.

Keywords: sepsis, proinflammatory cytokines, interferons, interleukins, limfoproliferative diseases, acute myeloid leukemia.

Введение

В настоящее время у больных гемобластозами сохраняется высокая летальность, обусловленная как прогрессированием самой болезни, так и действием цитостатических препаратов, приводящих к ухудшению течения имеющихся сопутствующих заболеваний, и нарушением в различных звеньях иммунитета. Вследствие этого возникают тяжелые инфекционные осложнения и сепсис на фоне развившейся нейтропе-

Юркин Александр Кимович
кандидат медицинских наук, преподаватель,
ФГБВОУ ВО Военно-медицинская академия
им. С.М. Кирова, г. Санкт-Петербург
carotis1956@mail.ru

Щеголев Алексей Валерианович
доктор медицинских наук, профессор,
Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова,
г. Санкт-Петербург;
главный анестезиолог-реаниматолог МО РФ,
главный внештатный специалист
по анестезиологии-реаниматологии
Комитета по здравоохранению Санкт-Петербурга

Юркина Екатерина Александровна
кандидат медицинских наук,
независимый исследователь

Топорков Михаил Михайлович
кандидат медицинских наук, старший преподаватель,
ФГБВОУ ВО Военно-медицинская академия
им. С.М. Кирова, г. Санкт-Петербург

Аннотация. У пациентов с гемобластозами применение интенсивных протоколов химиотерапии подчас может быть сопряжено с развитием инфекционных осложнений, в частности, сепсисом. Анализ полученных данных продемонстрировал возрастные особенности цитокинового профиля пациентов с онкогематологической патологией, осложненной сепсисом на фоне проведения противоопухолевой терапии. Оценка в динамике показателей интерлейкинов и интерферонов позволяет верифицировать нарушения в иммунном ответе и прогнозировать риск летального исхода при развитии инфекционных осложнений.

Ключевые слова: сепсис, провоспалительные цитокины, интерфероны, интерлейкины, лимфопролиферативные заболевания, острые миелоидные лейкозы.

нии у иммунокомпрометированных больных [1]. Ответ организма на микробную инвазию контролируется провоспалительными цитокинами, синтезируемыми макрофагами (ИЛ-1 β , ФНО- α , ИЛ-6) [2]. Цитокины регулируют пролиферацию, дифференцировку, способны модифицировать функциональную активность клеток кроветворной, иммунной и иных гомеостатических систем организма. От баланса цитокинов во многом зависит исход патологического процесса как в ранний, так и в отсроченный периоды, поскольку они являются универсаль-

ной регуляторной сетью медиаторов [3,4]. Необходимо отметить, что у пациентов с гемобластомами имеют место сложные цитокиновые взаимодействия между иммунной системой и опухолевыми клетками, которые еще не до конца раскрыты. Кроме того, нужно учитывать их влияние на костномозговое кроветворение [5]. Научные работы, анализирующие влияние цитокинов на исходы у пациентов онкогематологического профиля разных возрастных групп до и после проведения программной химиотерапии, осложнившейся сепсисом, немногочисленны [6,7,8]. Вместе с тем исследование цитокинового профиля у этой когорты пациентов представляет собой актуальную научно-практическую задачу, решение которой позволит оценить их прогностическую значимость.

Цель исследования

Исследовать цитокиновый статус у больных гемобластомами в группах пациентов с лимфопролиферативными заболеваниями (ЛПЗ) и острым миелоидным лейкозом (ОМЛ) до и после проведения полихимиотерапии (ПХТ) в зависимости от возраста (до и после 60 лет) на этапах верификации заболевания с доказанным осложненным сепсисом у больных после проведения ПХТ.

Материалы и методы

В исследование, состоящее из проспективного и ретроспективного анализа, был включен 361 больной гемобластомами в возрасте от 18 до 80 лет. Ретроспективную часть работы включала 200 пациентов с гемобластомами, наблюдавшихся с 2011 по 2016 гг., а проспективная — 161 пациента, наблюдавшихся за период с 2013 по 2017 гг. Диагнозы ОМЛ и ЛПЗ устанавливались в соответствии с критериями Всемирной Организации Здравоохранения опухолей кроветворной и лимфоидной тканей, а стадию заболевания определяли согласно классификации принятой в Ann-Arbor. Для диагноза ОМЛ использовали Франко-американо-британскую классификацию 1976 г. (French-American-British cooperative group, FAB) на основании морфологического исследования крови и костного мозга и цитохимических реакций, при дополнительном использовании иммунофенотипирования и цитогенетического исследования бластных клеток [9].

Всем больным выполняли клинические и биохимические анализы крови. Оценка общесоматического статуса больных проводили по шкале Карновского в модификации Восточной кооперативной онкологической группы. Показатели иммунитета оценивали после верифицированных диагнозов ЛПЗ и ОМЛ. Терапию проводили по унифицированному протоколу для больных ОМЛ. Химиотерапию проводили в стандартном режиме дозирования, включающем 1–2 цикла индукции, 2–4 цикла высокодозной консолидации. В качестве ин-

дукционного цикла использовали стандартный цикл по программе «7+3». Консолидация ремиссии проводилась циклами и содержала citarabin в «высоких» дозах, а также препараты, которые раньше не были включены в проводимую терапию. Поддерживающую терапию выполняли по протоколу «5+5» с интервалами между 6 циклами 28 дней. Терапия больным ЛПЗ также была выполнена по унифицированным протоколам: R-CHOP (ритуксимаб+циклофосфан, доксорубин, винкристин, преднизолон), BEACOPP (блеомицин, этапозид, доксорубин (адриамицин), циклофосфан, онковин (винкристин), прокарбазин, преднизолон), R-EPOCH (ритуксимаб+этапозид, преднизолон, винкристин, циклофосфан, доксорубин) [10,11].

Для скрининга пациентов с высокой вероятностью развития сепсиса использовали упрощенную шкалу SOFA — qSOFA (quick Sequential Organ Failure Assessment), по результатам которой можно было предполагать наличие сепсиса по клиническим признакам без лабораторных исследований: изменение уровня сознания (оценивали по шкале комы Глазго); снижение систолического артериального давления менее 100 мм рт. ст.; увеличение частоты дыхания до 22 и более раз в минуту. Диагноз сепсиса устанавливали в соответствии с критериями, принятыми на 3-й Международной консенсусной конференции по определению сепсиса [12]. В зависимости от морфологической формы все больные были разделены на 2 группы. В группу больных ЛПЗ вошли 167 (46,26 %) пациентов, среди которых были 104 (62,28 %) мужчины и 63 (37,72 %) женщины. В группу больных ОМЛ вошли 194 (53,74 %) пациента, среди которых было 94 (48,45 %) мужчины и 100 (51,55 %) женщины. Группу больных ЛПЗ до 60 лет составили 74 (44,60 %) пациента, с ОМЛ — 87 (44,85 %) пациентов. Группу больных ЛПЗ после 60 лет составили 93 (55,69 %) пациента, с ОМЛ — 107 (55,15 %) пациентов ($p < 0,01$). Всего на лечении до 60 лет находился 161 (44,60 %) пациент, после 60 лет — 200 (55,40 %) ($p < 0,01$) пациентов. Средний возраст пациентов в группе, страдающих ЛПЗ, составил — $55,5 \pm 18,8$ лет, в группе ОМЛ — $55,8 \pm 18,4$ лет.

Определение уровней цитокинов в сыворотке крови, спонтанную и индуцированную продукцию ИЛ-1 β , ИЛ-4, ИЛ-6, ИЛ-8, ИЛ-10, ИФН- α , ИФН- γ проводили с использованием иммуноферментных тест-систем («Цитокин», «Протеиновый контур», ЗАО «Вектор-Бест-Балтика», Россия) по инструкции производителя.

Для статистического анализа использовали статистический пакет Statistica, версия 10.0. Для определения значимости различия между двумя независимыми выборками при непараметрическом распределении применяли U-критерий Манна-Уитни. Различие считалось достоверным при доверительной вероятности не менее 95 % (уровень значимости $p < 0,05$). Анализ взаимосвя-

зей проводился методом непараметрического корреляционного анализа Спирмена. Оценка значимости частот распределения, изучаемых признаков в группах, проводилась с помощью критерия χ^2 с поправкой Йетса на непрерывность.

Результаты и их обсуждения

При исследовании цитокинов до ПХТ статистически значимые отличия у выживших больных и больных с летальным исходом были выявлены в отношении спонтанной продукции интерферона- α (ИФН- α) и интерферона- γ (ИФН- γ) только у больных ОМЛ до 60 лет (табл. 1). При этом у умерших больных в данной группе спонтанная продукция ИФН- α (Me=109,4/110,3 пг/мл; $p < 0,05$), и спонтанная продукция ИФН- γ (Me=54,3/56,4 пг/мл; $p < 0,05$) была достоверно выше. Изменение спонтанной продукции ИФН- α при этом оставалось в рамках диапазона нормальных значений (N=85,5–119,2), тогда как медиана спонтанной продукции ИФН- γ немного превышала верхнюю границу референтного предела (N=45,0–52,2). Следует отметить, что у умерших пациентов старше 60 лет отмечалась тенденция к повышению спонтанной продукции ИФН- γ (Me=54,3/55,2 пг/мл; $p=0,264$).

У пациентов с неблагоприятным исходом в группах ЛПЗ до и после 60 лет была отмечена тенденция к повышению спонтанной продукции ИФН- α : Me=119,4/124,2 пг/мл; $p=0,985$ и Me=119,4/124,3 пг/мл; $p=0,400$ соответственно, а также спонтанной продукции ИФН- γ : Me=57,5/59,3 пг/мл; $p=0,953$ и Me=56,8/60,8 пг/мл; $p=0,100$.

Таким образом, у пациентов группы ОМЛ до 60 лет выявлены относительно более высокие уровни спонтанной продукции ИФН- α и ИФН- γ , после 60 лет — тенденция к повышению ИФН- γ , которые, ассоциированы с более высоким риском летальности у этой когорты пациентов. Сходная направленность цитокиновых сдвигов, но без статистических значимых различий, характерна и для умерших пациентов с ЛПЗ независимо от возраста. Кроме того, из приведенных данных таблицы видно, что повышены значения ФНО- α , ИЛ-8, спонтанной продукции ИЛ-1 β у умерших пациентов в группе ЛПЗ вне зависимости от возраста и у больных ОМЛ до 60 лет, у лиц с ОМЛ после 60 лет отмечена тенденция к повышению показателей индуцированной продукции ИЛ-1 β , но без статистически значимых отличий. Данные изменения демонстрируют заметный дисбаланс в цитокиновом ста-

Таблица 1.

Сравнительный анализ цитокинового профиля у пациентов с ремиссией и летальным исходом до проведения ПХТ

Цитокины до ПХТ	ЛПЗ, <60 рем. (n=37)/лет. (n=33)		ЛПЗ, >60 рем. (n=58)/лет. (n=27)		ОМЛ, <60 рем. (n=63)/лет. (n=28)		ОМЛ, >60 рем. (n=71)/лет. (n=44)	
	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль
ФНО- α сыв., пг/мл	9,3	3,9–13,6	5,5	3,9–13,7	4,2	3,7–9,5	4,8	3,9–13,3
	9,5	4,7–14,8	9,5	3,7–15,7	4,5	3,8–11,7	4,8	3,9–14,0
	$p=0,303$		$p=0,700$		$p=0,328$		$p=0,796$	
ФНО- α спон., пг/мл	43,8	36,4–45,3	43,7	36,4–45,3	45,3	41,4–59,4	44,3	38,5–47,3
	43,2	35,3–47,3	41,3	34,2–45,3	45,3	39,4–50,3	44,3	36,6–47,3
	$p=0,888$		$p=0,497$		$p=0,365$		$p=0,748$	
ФНО- α инд., пг/мл	413,0	403,4–438,2	406,8	388,5–425,1	400,8	385,5–415,3	403,4	388,5–438,2
	421,3	400,8–452,4	418,3	403,4–439,3	406,9	394,7–433,3	403,4	388,5–431,4
	$p=0,698$		$p=0,142$		$p=0,054$		$p=0,993$	
ИЛ-1 β сыв., пг/мл	10,9	3,9–13,3	4,8	3,9–15,3	4,0	3,4–9,1	4,7	3,4–14,6
	5,2	3,9–21,5	12,5	3,9–21,5	4,0	3,6–24,0	4,0	3,4–13,05
	$p=0,597$		$p=0,293$		$p=0,375$		$p=0,415$	
ИЛ-1 β спон., пг/мл	61,3	53,5–63,2	62,4	53,3–63,2	56,6	53,4–63,2	61,3	53,5–63,2
	62,5	57,7–64,8	62,6	53,5–65,3	59,9	53,5–63,2	60,8	53,5–64,9
	$p=0,215$		$p=0,141$		$p=0,411$		$p=0,805$	

Цитокины до ПХТ	ЛПЗ, <60 рем. (n=37)/лет. (n=33)		ЛПЗ, >60 рем. (n=58)/лет. (n=27)		ОМЛ, <60 рем. (n=63)/лет. (n=28)		ОМЛ, >60 рем. (n=71)/лет. (n=44)	
	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль
ИЛ-1 β инд., пг/мл	167,3	162,4–176,3	167,3	162,4–176,3	164,3	158,4–172,3	164,5	158,4–172,7
	168,4	163,4–175,4	173,4	162,4–185,4	168,4	162,4–180,1	167,4	162,4–174,9
	p=0,290		p=0,240		p=0,304		p=0,270	
ИЛ-2 сыв., пг/мл	2,18	2,08–14,00	2,32	2,07–14,00	2,16	2,07–10,20	2,16	2,07–13,0
	2,30	2,07–14,00	11,9	2,08–32,80	2,17	2,07–19,25	2,18	2,08–13,1
	p=0,874		p=0,191		p=0,433		p=0,631	
ИЛ-4 сыв., пг/мл	2,41	2,32–13,50	2,40	2,36–11,50	2,39	2,34–7,00	2,39	2,34–12,00
	4,20	2,38–12,00	10,8	2,38–12,00	2,39	2,34–11,50	2,38	2,34–11,15
	p=0,601		p=0,570		p=0,487		p=0,861	
ИЛ-6 сыв., пг/мл	9,8	5,0–12,7	8,0	4,0–13,5	6,0	3,7–10,0	6,1	4,0–12,0
	8,0	5,0–13,5	9,8	6,1–19,5	5,1	3,7–25,4	6,0	4,1–17,9
	p=0,680		p=0,167		p=0,433		p=0,750	
ИЛ-8 сыв., пг/мл	9,6	3,9–73,3	7,9	3,9–67,8	4,7	3,0–63,5	6,5	3,9–68,8
	48,8	3,9–88,3	63,7	5,8–82,2	4,9	2,9–71,1	6,4	3,5–67,8
	p=0,733		p=0,140		p=0,521		p=0,560	
ИЛ-10 сыв., пг/мл	8,3	3,9–21,0	8,3	3,9–19,6	6,8	3,9–15,3	6,7	3,7–21,6
	13,0	5,7–25,3	13,0	5,8–32,7	7,6	3,9–19,5	7,5	4,9–16,7
	p=0,356		p=0,197		p=0,620		p=0,437	
ИФН- α сыв., пг/мл	8,9	4,3–21,9	7,2	3,9–21,8	6,9	3,9–19,9	7,3	3,6–17,8
	11,5	4,0–26,3	12,4	4,0–25,3	8,2	3,9–26,3	5,3	3,9–19,8
	p=0,892		p=0,724		p=0,673		p=0,818	
ИФН- α спон., пг/мл	119,4	109,4–124,3	119,4	88,7–124,3	109,4	83,5–119,4	110,3	84,5–124,3
	124,2	93,5–153,2	124,3	89,4–142,4	110,3	89,6–137,3	93,5	85,3–129,4
	p=0,985		p=0,400		p=0,048*		p=0,716	
ИФН- α инд., пг/мл	479,2	438,5–546,4	485,4	436,3–546,4	458,3	432,6–497,3	458,5	432,6–546,4
	486,4	438,5–547,5	459,3	436,3–556,3	455,9	434,5–546,4	438,5	436,3–569,0
	p=0,579		p=0,985		p=0,552		p=0,840	
ИФН- γ сыв., пг/мл	10,8	9,7–26,2	10,8	10,2–22,3	10,4	9,8–17,9	10,6	9,9–26,5
	10,8	10,1–26,5	17,9	10,4–32,5	10,6	10,1–21,7	10,6	9,9–22,7
	p=0,604		p=0,254		p=0,222		p=0,783	
ИФН- γ спон., пг/мл	57,5	53,2–62,1	56,8	53,2–61,6	54,3	53,2–59,3	54,3	53,2–61,4
	59,3	53,2–62,3	60,4	54,5–64,2	56,4	53,2–63,3	55,2	53,3–61,7
	p=0,953		p=0,100		p=0,042*		p=0,264	

Цитокины до ПХТ	ЛПЗ, <60 рем. (n=37)/лет. (n=33)		ЛПЗ, >60 рем. (n=58)/лет. (n=27)		ОМЛ, <60 рем. (n=63)/лет. (n=28)		ОМЛ, >60 рем. (n=71)/лет. (n=44)	
	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль
ИФН-γ инд., пг/мл	253,1	174,4–264,2	253,2	174,4–259,4	231,4	159,3–253,3	245,3	174,4–258,3
	253,1	231,4–269,5	253,3	245,3–264,2	238,4	174,4–260,3	250,7	231,4–260,0
	p=0,600		p=0,284		p=0,356		p=0,186	

Примечания: Me — Медиана; рем. — ремиссия; лет. — летальный исход; * — уровень статистической значимости $p < 0,05$; ** — уровень статистической значимости $p < 0,01$.

туса, что отражает дисрегуляцию системы иммунологической реактивности у этой категории пациентов с гемобластозами.

После проведения ПХТ сравнительный анализ цитокинового профиля между больными ЛПЗ с ремиссией и с летальным исходом выявил статистически значимые отличия в основном в группе до 60 лет (табл. 2). Все больные, которые отражены в таблице после проведения ПХТ имели доказанный сепсис.

У умерших больных ЛПЗ до 60 лет концентрации в сыворотке крови ФНО-α (Me=5,0/8,8 пг/мл; $p < 0,05$), ИЛ-1β (Me=3,8/7,9 пг/мл; $p < 0,01$), ИЛ-4 (Me=2,41/3,14 пг/мл; $p < 0,05$), ИЛ-10 (Me=7,3/9,9 пг/мл; $p < 0,05$), ИФН-α (Me=6,9/8,6 пг/мл; $p < 0,05$), а также спонтанная продукция ИФН-α (Me=88,8/99,3 пг/мл; $p < 0,05$) были выше, чем у пациентов с наступившей ремиссией. При этом медиана содержания данных цитокинов в сыворотке крови немного превышала границы референтных значений (ФНО-α N=2,0-8,21 пг/мл; ИЛ-1β N=0-5 пг/мл; ИЛ-4

Таблица 2.

Сравнительный анализ цитокинового профиля у пациентов с ремиссией и летальным исходом после ПХТ с сепсисом

Цитокины после ПХТ	ЛПЗ, <60 рем. (n=31)/лет. (n=21)		ЛПЗ, >60 рем. (n=52)/лет. (n=22)		ОМЛ, <60 рем. (n=40)/лет. (n=12)		ОМЛ, >60 рем. (n=54)/лет. (n=21)	
	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль
ФНО-α сыв., пг/мл	5,0	3,7–8,3	5,0	2,7–9,4	4,9	2,6–8,6	5,0	2,9–7,8
	8,8	5,3–14,0	7,2	2,2–9,3	8,3	4,1–18,8	2,2	2,2–7,5
	p=0,041*		p=0,623		p=0,078		p=0,227	
ФНО-α спон., пг/мл	57,4	53,5–64,5	57,4	53,3–64,3	55,0	48,3–64,5	57,4	52,2–64,5
	59,5	44,2–66,7	53,3	48,3–64,9	61,5	48,3–68,5	48,3	47,6–57,7
	p=0,830		p=0,248		p=0,446		p=0,029*	
ФНО-α инд., пг/мл	398,5	382,4–412,3	392,4	377,2–411,2	393,9	369,5–405,4	398,5	382,4–410,3
	400,9	372,8–421,3	389,3	340,4–415,5	407,3	367,3–429,2	356,4	340,4–416,4
	p=0,675		p=0,744		p=0,287		p=0,104	
ИЛ-1β сыв., пг/мл	3,8	3,2–7,3	5,0	3,2–7,7	4,0	3,2–7,3	3,9	3,1–7,6
	7,9	4,3–9,5	7,4	2,4–10,4	8,3	3,1–9,5	2,9	2,0–8,8
	p=0,005**		p=0,603		p=0,098		p=0,732	
ИЛ-1β спон., пг/мл	53,5	42,4–57,4	53,5	43,5–58,3	53,1	44,7–58,3	52,1	42,4–58,3
	58,4	42,4–63,2	54,5	42,4–61,4	53,2	44,9–61,0	44,9	41,2–52,1
	p=0,227		p=0,427		p=0,712		p=0,142	

Цитокины после ПХТ	ЛПЗ, <60 рем. (n=31)/лет. (n=21)		ЛПЗ, >60 рем. (n=52)/лет. (n=22)		ОМЛ, <60 рем. (n=40)/лет. (n=12)		ОМЛ, >60 рем. (n=54)/лет. (n=21)	
	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль
ИЛ-1 β инд., пг/мл	157,3	153,4–163,3	154,5	145,3–162,4	154,0	138,5–164,5	153,4	137,5–162,4
	154,5	148,3–164,5	154,5	137,4–173,4	152,7	141,1–170,1	150,8	135,5–155,9
	p=0,903		p=0,414		p=0,744		p=0,251	
ИЛ-2 сыв., пг/мл	2,3	2,3–3,1	2,2	2,1–5,8	2,2	2,1–4,1	2,2	2,1–5,2
	5,3	2,2–7,4	5,6	2,0–8,5	4,4	2,0–8,3	2,0	2,0–7,1
	p=0,188		p=0,448		p=0,271		p=0,332	
ИЛ-4 сыв., пг/мл	2,41	2,33–3,14	2,39	2,33–3,83	2,37	2,32–2,75	2,41	2,33–3,15
	3,14	2,39–4,70	2,42	2,33–3,36	2,36	2,33–4,02	2,35	2,33–2,90
	p=0,020*		p=0,995		p=0,446		p=0,485	
ИЛ-6 сыв., пг/мл	5,1	3,7–7,8	4,6	3,7–7,5	4,4	3,0–7,6	5,0	3,2–6,1
	5,2	3,2–8,0	3,7	3,2–8,9	5,5	4,5–10,6	4,6	3,5–11,0
	p=0,601		p=0,566		p=0,082		p=0,636	
ИЛ-8 сыв., пг/мл	10,4	3,9–57,0	6,2	3,9–52,0	7,9	3,7–55,5	6,2	2,8–56,4
	55,8	7,9–61,8	52,2	3,0–62,1	55,0	2,9–63,4	3,0	2,6–50,4
	p=0,133		p=0,424		p=0,181		p=0,723	
ИЛ-10 сыв., пг/мл	7,3	5,1–9,9	7,8	5,2–9,9	7,0	4,3–9,9	6,8	3,9–9,9
	9,9	7,8–11,5	9,7	3,8–13,4	9,9	7,1–10,8	7,1	3,8–12,6
	p=0,021*		p=0,273		p=0,063		p=0,671	
ИФН- α сыв., пг/мл	6,9	3,8–9,4	8,4	3,8–9,5	7,0	4,9–9,4	6,8	3,8–9,4
	8,6	5,4–10,3	9,8	2,3–12,5	9,5	3,0–12,7	3,1	2,2–10,1
	p=0,047*		p=0,236		p=0,235		p=0,287	
ИФН- α спон., пг/мл	88,8	85,4–99,8	88,7	84,5–100,3	92,4	85,5–106,3	88,8	85,4–100,3
	99,3	88,4–119,3	91,2	88,8–119,2	88,8	87,0–112,3	88,8	88,1–95,3
	p=0,045*		p=0,030*		p=0,719		p=0,938	
ИФН- α инд., пг/мл	432,6	421,3–462,3	437,5	425,4–462,3	433,5	421,3–463,3	436,5	421,3–462,3
	465,3	425,4–477,9	460,4	417,3–484,4	470,3	424,9–487,8	425,4	417,3–469,6
	p=0,059		p=0,339		p=0,068		p=0,485	
ИФН- γ сыв., пг/мл	10,1	9,5–10,9	10,1	9,6–11,1	9,6	9,5–10,2	10,1	9,5–11,2
	10,4	9,9–13,6	10,1	9,4–18,4	10,2	9,7–12,5	9,9	9,4–10,2
	p=0,194		p=0,709		p=0,047*		p=0,305	

Цитокины после ПХТ	ЛПЗ, <60 рем. (n=31)/лет. (n=21)		ЛПЗ, >60 рем. (n=52)/лет. (n=22)		ОМЛ, <60 рем. (n=40)/лет. (n=12)		ОМЛ, >60 рем. (n=54)/лет. (n=21)	
	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль
ИФН-γ спон., пг/мл	48,3	47,6–54,3	50,4	47,6–54,3	48,4	46,7–53,2	48,3	46,8–54,9
	50,5	47,6–57,4	52,2	47,6–59,5	51,4	46,4–58,0	48,0	45,3–52,4
	p=0,411		p=0,438		p=0,769		p=0,198	
ИФН-γ инд., пг/мл	175,0	162,3–231,4	174,4	155,0–231,4	170,7	153,5–190,5	168,0	148,3–231,4
	208,0	158,0–235,0	164,5	153,5–237,0	164,5	154,3–216,5	164,3	148,3–182,0
	p=0,647		p=0,687		p=0,736		p=0,479	

Примечания: Me — Медиана; рем. — ремиссия; лет. — летальный исход; * — уровень статистической значимости $p < 0,05$; ** — уровень статистической значимости $p < 0,01$.

$N=2,32-2,42$ пг/мл; ИЛ-10 $N=0-9,1$ пг/мл; ИФН-α $N=2,0-8,0$ пг/мл), тогда как спонтанная продукция ИФН-α изменялась в пределах нормы. Спонтанная продукция ИФН-α также была статистически значимо выше у больных ЛПЗ старше 60 лет с летальным исходом по сравнению с пациентами с ремиссией ($Me=88,7/91,2$ пг/мл; $p < 0,05$), хотя при этом средние значения не выходили за референтные границы. Других статистически значимых отличий в категории больных ЛПЗ старше 60 лет не наблюдалось. У умерших пациентов с ЛПЗ до 60 лет после проведения ПХТ высокие сывороточные концентрации провоспалительных медиаторов (ФНО-α, ИЛ-1β, ИФН-α) в сочетании с избыточной продукцией ИЛ-4 и ИЛ-10 отражают тяжесть течения развившихся инфекционных осложнений — сепсиса. Гиперцитокинемия свидетельствует о тяжелой степени дисрегуляции иммунного ответа и коррелирует с неблагоприятным исходом заболевания. Летальный исход пациентов старшей возрастной группы с ЛПЗ после ПХТ на фоне сепсиса был ассоциирован с повышенной спонтанной продукцией ИФН-α. Данный факт, вероятно, может рассматриваться как один из маркеров нарушения цитокиновой регуляции в условиях развившегося сепсиса. Поскольку средние значения спонтанной продукции ИФН-α не выходили за референтные границы, это свидетельствует, возможно, об особенностях иммунологической реактивности у лиц данной категории с неблагоприятным исходом заболевания.

У умерших пациентов с ОМЛ до 60 лет после проведения ПХТ была установлена более высокая концентрация в сыворотке крови ИФН-α ($Me=9,6/10,2$ пг/мл; $p < 0,05$), а в группе ОМЛ старше 60 лет у больных с летальным исходом была ниже спонтанная продукция ФНО-α ($Me=57,4/48,3$ пг/мл; $p < 0,05$), что указывает на разнонаправленный дисбаланс секреции цитокинов в зависимости от возраста и глубокие изменения в им-

мунной системе на фоне сепсиса. Установлено, что у лиц до 60 лет неблагоприятный исход ассоциирован с гиперпродукцией ИФН-γ, а в группе старше 60 лет — с дефицитом ФНО-α.

Выводы

1. Таким образом, проведенное исследование выявило определенную взаимосвязь между состоянием интерферонового статуса и исходом заболевания у пациентов с гемобластозами. Повышение спонтанной продукции ИФН-α и ИФН-γ у пациентов группы ОМЛ до 60 лет до проведения противоопухолевой терапии может рассматриваться как неблагоприятный прогностический фактор у этой категории лиц.
2. После проведения полихимиотерапии характер изменений цитокинового профиля пациентов отличался в зависимости от возраста и демонстрировал многовариантные нарушения в системе иммунитета в условиях сепсиса, что можно использовать в качестве дополнительных прогностических маркеров течения болезни. У умерших пациентов с ЛПЗ до 60 лет высокие сывороточные концентрации провоспалительных медиаторов (ФНО-α, ИЛ-1β, ИФН-α) в сочетании с избыточной продукцией ИЛ-4 и ИЛ-10 свидетельствует о тяжелой степени дисрегуляции иммунного ответа и коррелируют с неблагоприятным исходом заболевания. Летальный исход пациентов старшей возрастной группы с ЛПЗ на фоне сепсиса был ассоциирован с повышенной спонтанной продукцией ИФН-α. В группе ОМЛ у лиц до 60 лет неблагоприятный исход был ассоциирован с гиперпродукцией ИФН-γ, при этом старше 60 лет — с дефицитом ФНО-α.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kochanek M. Management of sepsis in neutropenic cancer patients: 2018 guidelines from the Infectious Diseases Working Party (AGIHO) and Intensive Care Working Party (iCHOP) of the German Society of Hematology and Medical Oncology (DGHO) / M. Kochanek, E. Schalk, M. von Bergwelt-Baildon [et al.] // *Annals of Hematology*. — 2019. — Vol. 98, № 5. — P. 1051–1069. — DOI: 10.1007/s00277-019-03622-0.
2. Daniel M. Pathophysiology of Sepsis and Genesis of Septic Shock: The Critical Role of Mesenchymal Stem Cells (MSCs) / M. Daniel, Y. Bedoui, D. Vagner [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. — 2022. — Vol. 23, № 16. — P. 9274. — DOI: 10.3390/ijms23169274.
3. Arai K.I. Cytokines: coordinators of immune and inflammatory responses / K.I. Arai, F. Lee, A. Miyajima [et al.] // *Annual Review of Biochemistry*. — 1990. — Vol. 59. — P. 783–836. — DOI: 10.1146/annurev.bi.59.070190.004031.
4. Клиническая иммунология / В.А. Козлов, А.А. Савченко, И.В. Кудрявцев [и др.]. — Красноярск: Поликор, 2020. — 386 с.
5. Luciano M. The cytokine network in acute myeloid leukemia / M. Luciano, P.W. Krenn, J. Horejs-Hoeck // *Frontiers in Immunology*. — 2022. — Vol. 13. — Art. 1000996. — DOI: 10.3389/fimmu.2022.1000996.
6. Sanchez-Correa B. Cytokine profiles in acute myeloid leukemia patients at diagnosis: survival is inversely correlated with IL-6 and directly correlated with IL-10 levels / B. Sanchez-Correa, J.M. Bergua, C. Campos [et al.] // *Cytokine*. — 2013. — Vol. 61, № 3. — P. 885–891. — DOI: 10.1016/j.cyto.2012.12.023.
7. Brenner A.K. Patients with acute myeloid leukemia can be subclassified based on the constitutive cytokine release of the leukemic cells; the possible clinical relevance and the importance of cellular iron metabolism / A.K. Brenner, T.H.A. Tvedt, I. Nepstad [et al.] // *Expert Opinion on Therapeutic Targets*. — 2017. — Vol. 21, № 4. — P. 357–369. — DOI: 10.1080/14728222.2017.1300255.
8. Zhong H. Prognostic nomogram incorporating inflammatory cytokines for overall survival in patients with aggressive non-Hodgkin's lymphoma / H. Zhong, J. Chen, S. Cheng [et al.] // *EBioMedicine*. — 2019. — Vol. 41. — P. 167–174. — DOI: 10.1016/j.ebiom.2019.02.048.
9. Bennett J.M. Proposals for the classification of the acute leukaemias. French American-British (FAB) co-operative group / J.M. Bennett, D. Catovsky, M.T. Daniel [et al.] // *British Journal of Haematology*. — 1976. — Vol. 33, № 4. — P. 451–458. — DOI: 10.1111/j.1365-2141.1976.tb03563.x.
10. Рукавицын О.А. Гематология: Национальное руководство / под ред. О.А. Рукавицына. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2015. — 776 с.
11. Савченко В.Г. Программное лечение заболеваний системы крови / Под ред. В.Г. Савченко. — М.: Практика, 2012. — С. 289–342.
12. Singer M. The Third International Consensus Definitions for Sepsis and Septic Shock (Sepsis-3) / M. Singer, C.S. Deutschman, C.W. Seymour [et al.] // *JAMA*. — 2016. — Vol. 315, № 8. — P. 801–810. — DOI: 10.1001/jama.2016.0287.

© Юркин Александр Кимович (carotis1956@mail.ru); Щеголев Алексей Валерианович; Юркина Екатерина Александровна;
Топорков Михаил Михайлович

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ Т-КЛЕТОЧНОГО ЗВЕНА ИММУНИТЕТА У БОЛЬНЫХ ГЕМОБЛАСТОЗАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИСХОДА ЗАБОЛЕВАНИЯ ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ ПОЛИХИМИОТЕРАПИИ, ОСЛОЖНЕННОЙ СЕПСИСОМ

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE T-CELL IMMUNE SYSTEM IN PATIENTS WITH HEMOBLASTOSES, DEPENDING ON THE OUTCOME OF THE DISEASE AFTER POLYCHEMOTHERAPY COMPLICATED BY SEPSIS

A. Yurkin
A. Shchegolev
E. Yurkina

Summary. Patients with oncohematological profile have an increased risk of developing sepsis, which is one of the leading causes of hospitalization in intensive care units and high mortality rates. Currently, the search for prognostic, in particular, immunological markers is relevant, to improve the clinical assessment of the patient's condition and timely appointment of personalized therapy. The article presents an analysis of immunological indicators of the T-cell immunity in patients with hemoblastoses after polychemotherapy against the background of sepsis. Significant changes in T-lymphocyte subpopulations were identified, indicating a pronounced dysregulation of the immune response. These findings reflect the impaired immune response in this patient cohort and provide insights into the disease outcomes.

Keywords: sepsis, T-cell immunity, CD3⁺HLA-DR⁺, CD4⁺/CD8⁺, CD4⁺CD25^{bright}, lymphoproliferative diseases, acute myeloid leukemia.

Юркин Александр Кимович

кандидат медицинских наук, преподаватель,
ФГБОУ ВО Военно-медицинская академия
им. С.М. Кирова, г. Санкт-Петербург
carotis1956@mail.ru

Щеголев Алексей Валерианович

доктор медицинских наук, профессор,
Военно-медицинская академия
им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург;
главный анестезиолог-реаниматолог МО РФ,
главный внештатный специалист
по анестезиологии-реаниматологии
Комитета по здравоохранению Санкт-Петербурга

Юркина Екатерина Александровна

кандидат медицинских наук,
независимый исследователь

Аннотация. Пациенты онкогематологического профиля имеют повышенный риск развития сепсиса, который является одной из ведущих причин госпитализации в отделения интенсивной терапии и реанимации, и высоких показателей смертности. В настоящее время актуален поиск прогностических, в частности иммунологических маркеров, с целью повышения клинической оценки состояния больного и своевременного назначения персонализированной терапии. В статье представлен анализ иммунологических показателей Т-клеточного звена иммунитета у пациентов с гемобластозами после полихимиотерапии на фоне сепсиса. Были выявлены значимые изменения субпопуляций Т-лимфоцитов, свидетельствующие о выраженной дисрегуляции иммунного ответа. Полученные данные отражают нарушение иммунного ответа у этой когорты пациентов и позволяют прогнозировать исходы заболевания.

Ключевые слова: сепсис, Т-клеточный иммунитет, CD3⁺HLA-DR⁺, CD4⁺/CD8⁺, CD4⁺CD25^{bright}, лимфопролиферативные заболевания, острые миелоидные лейкозы.

Введение

Пациенты онкогематологического профиля имеют повышенный риск развития инфекционных осложнений и сепсиса, возникающие как в результате нарушений в иммунной системе вследствие действия цитостатических препаратов, так и вследствие прогрес-

сирования основного заболевания [1]. Необходимо отметить, что несмотря на успехи в диагностике и лечении в области онкологии, у пациентов с гемобластозами сепсис является одной из ведущих причин госпитализации в отделения интенсивной терапии и реанимации, и высоких показателей смертности среди этой категории лиц [1,2,3,4]. Кроме того, следует учитывать долгосрочные

последствия перенесенного сепсиса. По данным исследований, лишь 50 % пациентов полностью восстанавливается после выписки из стационара, в то время как треть больных умирают на второй год, при этом показатели смертности в последующие три года варьируют от 40 % до 80 % [5]. Согласно современным представлениям, сепсис является сложным гетерогенным синдромом, возникающим в результате дисрегуляции иммунного ответа на повреждения инфекционной природы у больного и характеризующийся различной степенью выраженности воспалительного ответа и иммуносупрессией, которой уделяется все больше внимания в последние годы [6,7]. Известно, что защитные механизмы, инициирующие иммунные реакции и возникающие в ответ на проникновение в организм чужеродных агентов, можно разделить на два типа: врожденный и адаптивный иммунный ответ. Несмотря на значительные достижения в исследовании иммунопатогенеза сепсиса, механизмы, лежащие в основе нарушения его иммунной регуляции изучены недостаточно. При этом одну из ключевых ролей в его патогенезе, по данным исследований, играют Т-лимфоциты [8,9]. Изучение особенностей иммунологических параметров Т-клеточного звена иммунитета у пациентов онкогематологического профиля при сепсисе представляет собой актуальную задачу, поскольку выявленные иммунологические нарушения важны как для прогнозирования исходов болезни, так и для обоснования в последующем персонализированной иммуно-ориентированной терапии.

Цель исследования

Проанализировать особенности субпопуляционного состава Т-клеточного звена иммунитета в группах больных с лимфопролиферативными заболеваниями (ЛПЗ) и острым миелоидным лейкозом (ОМЛ) после проведения полихимиотерапии, осложненной присоединившимся сепсисом, в зависимости от исхода.

Материалы и методы

В исследование, состоящее из проспективного и ретроспективного анализа, был включен 361 пациент с гемобластомами в возрасте от 18 до 80 лет. Ретроспективный анализ включал 200 пациентов с гемобластомами, наблюдавшихся с 2011 по 2016 гг., а проспективный — 161 пациента, наблюдавшихся с 2013 по 2017 гг. Диагнозы ОМЛ и ЛПЗ устанавливали в соответствии с критериями Всемирной Организации Здравоохранения опухолей кроветворной и лимфоидной тканей [10]. Стадию заболевания у пациентов с лимфомами определяли согласно классификации Ann-Arbor в модификации Cotswold, а при ОМЛ использовали Франко-американо-британскую классификацию (French-American-Britishcooperative group, FAB). Всем больным оценивали общесоматиче-

ский статус по шкале Карновского в модификации Восточной кооперативной онкологической группы. Помимо стандартного комплекса диагностических мероприятий всем пациентам исследовали иммунологические параметры: анализ количественного состава субпопуляций лимфоцитов выполняли на проточном цитометре Cytomics FC500 («Beckman Coulter», США) с применением комбинаций прямых моноклональных антител (CD45/CD4/CD8/CD3/CD25, CD45/CD16+56/CD19/CD3/HLA-DR, CD45RA/CD45RO/CD4/CD45, CD8/CD38/CD3/CD45) и изотипических контролей той же фирмы.

Терапию проводили по унифицированному протоколу пациентов с ОМЛ. Применяли стандартные режимы дозирования, включающие 1–2 цикла индукции, 2–4 цикла высокодозной консолидации. В качестве индукционного цикла использовали стандартный цикл по программе «7+3». Консолидация ремиссии проводилась циклами и содержала цитарабин в «высоких» дозах, а также препараты, которые раньше не были включены в проводимую терапию. Поддерживающую терапию проводили по протоколу «5+5» с интервалами между 6 циклами 28 дней. Терапию пациентам с ЛПЗ также проводили по унифицированным протоколам: R-CHOP (ритуксимаб+циклофосфид, доксорубин, винкристин, преднизолон), BEACOPP (блеомицин, этапозид, доксорубин (адриамицин), циклофосфан, онковин (винкристин), прокарбазин, преднизолон), R-EPOCH (ритуксимаб+этапозид, преднизолон, винкристин, циклофосфан, доксорубин) [11].

Для скрининга пациентов с высокой вероятностью развития сепсиса использовали упрощенную шкалу SOFA — qSOFA (quickSequential Organ Failure Assessment). Диагноз «сепсис» был установлен на основании критериев 3-го международного консенсуса по определению сепсиса («Sepsis-3») [12]. В зависимости от морфологической формы все больные были разделены на две группы: ЛПЗ и ОМЛ. Средний возраст пациентов составил в группе, страдающих ЛПЗ — $55,5 \pm 18,8$ лет, в группе ОМЛ — $55,8 \pm 18,4$ лет.

Для статистического анализа использовали статистический пакет Statistica, версия 10.0. Для определения значимости различия между двумя независимыми выборками при непараметрическом распределении применяли U-критерий Манна-Уитни. Различия считались достоверными при доверительной вероятности не менее 95% (уровень значимости $p < 0,05$). Анализ взаимосвязей проводился методом непараметрического корреляционного анализа Спирмена. Оценка значимости частот распределения, изучаемых признаков в группах, проводилась с помощью критерия χ^2 с поправкой Йетса на непрерывность.

Результаты и обсуждение

Результаты исследования иммунного статуса пациентов обследуемых групп в зависимости от исхода заболевания представлены в таблице 1. У пациентов в груп-

пе ЛПЗ отмечена лимфопения, наиболее выраженная у умерших по сравнению с выжившими больными ($0,62 [0,38-0,90]10^9/л$ против $0,65 [0,47-0,81]10^9/л$, $p>0,05$), но без статистически значимых различий. Следует отметить, что одной из особенностей сепсиса является

Таблица 1.

Сравнительный анализ показателей популяций Т-клеток у больных ЛПЗ и ОМЛ в зависимости от возраста и исхода заболевания после полихимиотерапии, осложнившейся сепсисом

Популяции Т-клеток после ПХТ	ЛПЗ, <60 рем. (n=31)/лет. (n=21)		ЛПЗ, >60 рем. (n=52)/лет. (n=22)		ОМЛ, <60 рем. (n=40)/лет. (n=12)		ОМЛ, >60 рем. (n=54)/лет. (n=21)	
	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль
CD3 ⁺ , Т-лимфоциты, %	69,8	67,8–77,3	70,9	67,8–77,4	72,6	66,6–79,7	72,0	67,8–79,7
	75,3	70,5–77,3	79,2	68,0–94,7	78,0	71,0–94,7	92,3	72,6–95,3
	p=0,182		p=0,006**		p=0,073		p=0,003**	
CD3 ⁺ , Т-лимфоциты, x10 ⁹ /л	1,22	0,91–1,38	1,26	0,91–1,4	1,38	1,12–1,65	1,27	0,88–1,70
	1,13	0,84–1,32	0,82	0,36–1,22	0,93	0,47–1,23	0,75	0,43–1,19
	p=0,207		p=0,0005**		p=0,0004***		p=0,001***	
CD3 ⁺ CD4 ⁺ , Т-хелперы, %	46,5	36,5–63,3	48,6	38,7–61,1	42,7	36,9–49,4	49,5	38,5–63,4
	55,6	42,5–62,2	66,3	47,3–73,4	66,3	50,2–67,4	55,6	50,7–73,4
	p=0,390		p=0,0004***		p=0,000***		p=0,02*	
CD3 ⁺ CD4 ⁺ , Т-хелперы, x10 ⁹ /л	0,58	0,51–0,79	0,72	0,58–0,93	0,72	0,61–0,93	0,72	0,58–0,84
	0,58	0,42–0,64	0,42	0,23–0,63	0,36	0,36–0,61	0,37	0,29–0,79
	p=0,594		p=0,000***		p=0,004**		p=0,029*	
CD3 ⁺ CD8 ⁺ , ЦТЛ, %	23,3	21,3–26,2	23,4	21,3–26,2	24,8	23,3–28,5	22,7	19,3–25,3
	19,7	17,1–21,2	17,7	12,4–21,2	19,7	17,3–20,5	21,2	13,4–22,2
	p=0,005**		p=0,000***		p=0,000***		p=0,015*	
CD3 ⁺ CD8 ⁺ , ЦТЛ, x10 ⁹	0,47	0,24–0,80	0,62	0,26–0,79	0,62	0,36–0,76	0,62	0,35–0,79
	0,26	0,17–0,62	0,14	0,09–0,25	0,14	0,09–0,35	0,14	0,09–0,36
	p=0,032*		p=0,000***		p=0,0001***		p=0,000***	
Индекс CD3 ⁺ CD4 ⁺ / CD3 ⁺ CD8 ⁺	1,30	1,17–1,85	1,42	1,21–1,84	1,43	1,14–1,88	1,42	1,22–1,76
	1,84	1,64–2,46	2,39	1,94–2,90	2,20	2,17–2,43	2,3	1,81–2,77
	p=0,016*		p=0,000***		p=0,000***		p=0,000***	
CD3 ⁺ CD56 ⁺ , Т-киллеры (NKT), %	2,6	2,1–5,5	3,5	1,9–5,5	4,8	2,1–5,5	5,2	1,9–5,8
	2,2	1,6–2,7	1,5	1,2–2,2	1,4	1,3–1,8	1,5	1,3–2,9
	p=0,044*		p=0,000***		p=0,000***		p=0,000***	
CD3 ⁺ CD56 ⁺ , Т-киллеры (NKT), x10 ⁹	0,14	0,06–0,16	0,14	0,09–0,17	0,14	0,08–0,16	0,14	0,09–0,16
	0,09	0,05–0,14	0,06	0,01–0,11	0,05	0,03–0,10	0,04	0,02–0,09
	p=0,203		p=0,000***		p=0,003**		p=0,000*	

Популяции Т-клеток после ПХТ	ЛПЗ, <60 рем. (n=31)/лет. (n=21)		ЛПЗ, >60 рем. (n=52)/лет. (n=22)		ОМЛ, <60 рем. (n=40)/лет. (n=12)		ОМЛ, >60 рем. (n=54)/лет. (n=21)	
	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль
CD3 ⁺ CD4 ⁺ CD8 ⁺ незрелые Т-лимфоциты, %	1,1	0,7–1,5	1,1	0,7–1,3	1,1	0,9–1,4	1,1	0,8–1,6
	0,9	0,7–1,2	0,9	1,2–2,2	1,5	1,3–1,8	0,9	0,8–1,4
	p=0,348		p=0,625		p=0,370		p=0,302	
CD3 ⁺ TCRαβ ⁺ , %	67,5	66,2–73,9	68,7	66,2–73,8	70,5	64,9–75,4	69,4	66,2–75,4
	73,6	68,9–75,0	77,6	66,4–91,9	76,3	69,4–93,4	90,1	71,0–91,0
	p=0,182		p=0,006**		p=0,073		p=0,003**	
CD3 ⁺ TCRαβ ⁺ , ×10 ⁹	1,1	0,98–1,25	0,99	0,96–1,14	0,99	0,93–1,19	0,99	0,93–1,08
	0,96	0,93–1,08	0,95	0,78–0,98	1,06	0,91–1,34	0,96	0,88–1,13
	p=0,047*		p=0,003**		p=0,743		p=0,349	
CD3 ⁺ TCRγδ ⁺ , %	2,30	1,59–3,37	2,24	1,64–3,54	2,10	1,67–4,26	2,62	1,58–4,30
	1,73	1,62–2,30	1,64	1,60–2,84	1,70	1,61–3,83	2,20	1,64–4,30
	p=0,291		p=0,334		p=0,460		p=0,408	
CD3 ⁺ TCRγδ ⁺ , ×10 ⁹	0,05	0,05–0,08	0,05	0,03–0,08	0,05	0,05–0,09	0,05	0,03–0,08
	0,06	0,04–0,08	0,05	0,05–0,06	0,05	0,05–0,08	0,06	0,05–0,09
	p=0,718		p=0,884		p=0,790		p=0,444	
CD3 ⁺ CD25 ⁺ , %	3,8	3,8–6,8	4,3	3,8–5,8	4,3	3,8–7,6	4,1	3,8–6,8
	5,8	4,5–10,7	6,8	3,9–10,2	5,3	4,3–9,6	4,8	3,6–12,8
	p=0,087		p=0,007**		p=0,263		p=0,383	
CD3 ⁺ CD25 ⁺ , ×10 ⁹	0,18	0,09–1,60	0,17	0,09–1,70	0,21	0,13–1,60	0,27	0,09–2,10
	0,09	0,08–0,23	0,13	0,07–1,60	0,11	0,05–1,70	0,76	0,08–1,90
	p=0,028*		p=0,275		p=0,082		p=0,434	
CD3 ⁺ HLA–DR ⁺ , %	11,0	6,1–13,2	9,4	6,3–14,2	9,4	6,1–13,3	9,4	6,7–13,0
	12,0	9,0–13,0	13,0	9,0–16,0	12,2	10,5–12,7	10,6	8,0–16,6
	p=0,422		p=0,032*		p=0,203		p=0,233	
CD3 ⁺ HLA–DR ⁺ , ×10 ⁹	0,17	0,09–0,23	0,17	0,09–0,23	0,17	0,12–0,22	0,18	0,11–0,23
	0,14	0,04–0,23	0,17	0,02–0,24	0,22	0,08–0,29	0,23	0,16–0,28
	p=0,501		p=0,794		p=0,500		p=0,091	
CD3 ⁺ CD8 ^{bright} CD38 ⁺ , % (% от CD3)	8,8	7,7–9,9	8,3	6,8–10,8	9,6	6,8–9,9	9,8	7,8–9,9
	15,2	9,9–18,4	8,3	6,8–13,7	9,4	7,5–15,9	9,4	7,1–18,4
	p=0,004**		p=0,740		p=0,477		p=0,573	
CD4 ⁺ CD45RO ⁺ Th- памяти, % (% от CD4)	21,2	19,5–22,9	20,1	19,3–23,7	22,9	18,6–22,9	19,6	11,7–22,9
	24,1	22,9–26,4	23,4	15,3–27,4	24,2	22,9–25,8	25,1	21,4–26,0
	p=0,0004**		p=0,028*		p=0,013*		p=0,0005**	

Популяции Т-клеток после ПХТ	ЛПЗ, <60 рем. (n=31)/лет. (n=21)		ЛПЗ, >60 рем. (n=52)/лет. (n=22)		ОМЛ, <60 рем. (n=40)/лет. (n=12)		ОМЛ, >60 рем. (n=54)/лет. (n=21)	
	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль	Me	н.в. квартиль
CD4 ⁺ CD45RO ⁺ Th- наивные % (% от CD4)	24,7	21,8–31,6	25,7	22,8–32,7	24,7	21,8–31,9	24,7	21,8–32,1
	27,9	24,3–41,1	24,3	20,3–67,3	25,3	22,3–31,8	24,3	22,3–36,7
	p=0,037*		p=0,995		p=0,625		p=0,976	

Примечания: Me — Медиана; рем. — ремиссия; лет. — летальный исход; * — уровень статистической значимости $p < 0,05$; ** — уровень статистической значимости $p < 0,01$; *** — уровень статистической значимости $p < 0,001$.

лимфопения, поскольку из-за апоптоза снижается количество циркулирующих Т-клеток CD4⁺, CD8⁺, естественных киллеров [13,14]. При этом согласно результатам ретроспективного исследования с участием 335 пациентов с бактериемией и сепсисом лимфопения у этой когорты лиц коррелировала с неблагоприятным исходом [15]. Как представлено в таблице 1, в группе ЛПЗ младше 60 лет по сравнению с выжившими пациентами у лиц с летальным исходом статистически значимо было ниже как относительное (Me=23,3/19,7 %; $p < 0,01$), так и абсолютное (Me=0,47/0,26 $\times 10^9$; $p < 0,05$) количество цитотоксических Т-лимфоцитов (ЦТЛ) CD3⁺CD8⁺. Следует отметить, что средние значения относительного и абсолютного количества ЦТЛ у умерших больных находилось ниже референтных значений, тогда как у выживших пациентов — в пределах нормы. В работе J. Monserrat и соавт. также было выявлено более выраженное снижение числа CD3⁺CD8⁺ у пациентов с септическим шоком, чем в группе сравнения [8]. По сравнению с выжившими больными, у пациентов с летальным исходом было верифицировано статистически значимое более высокое значение иммунорегуляторного индекса (ИРИ) CD3⁺CD4⁺/CD3⁺CD8⁺ (Me=1,30/1,84; $p < 0,05$) за счет снижения числа CD3⁺CD8⁺ и повышения Т-хелперов CD3⁺CD4⁺, хотя последнее не было статистически значимым. Повышение ИРИ отражает дисбаланс в соотношении основных популяций Т-лимфоцитов. Нужно отметить, что Y. Li и соавт. у части пациентов с сепсисом регистрировали снижение количества CD3⁺, CD4⁺, уменьшение соотношения CD4⁺/CD8⁺, при этом авторы отметили, что снижение CD3⁺ и уменьшение соотношения CD4⁺/CD8⁺ коррелировало с неблагоприятным прогнозом [5]. Однако, наши результаты коррелировали с данными другого исследования у пациентов с сепсисом [14]. Также у больных ЛПЗ до 60 лет с летальным исходом по сравнению с выжившими больными наблюдалось статистически значимое более низкое относительное количество Т-киллеров (NKT-клетки) CD3⁺CD56⁺ (Me=2,2/2,6 %; $p < 0,05$), а также абсолютное (Me=0,26/0,47 $\times 10^9$; $p < 0,05$) количество Т-клеток с $\alpha\beta$ -Т-клеточным рецептором CD3⁺TCR $\alpha\beta$ ⁺. CD3⁺TCR $\alpha\beta$ ⁺ Т-клетки являются основной популяцией Т-клеток, реализующей специфический иммунный ответ. Анализ содержания популяций активированных

Т-клеток выявил, что у умерших больных ЛПЗ младше 60 лет абсолютное число Т-клеток, экспрессирующих антиген ранней активации CD25 (CD3⁺CD25⁺) статистически значимо было ниже, чем у выживших пациентов ($p < 0,05$). Представляется интересным, что процент активированных CD38-позитивных ЦТЛ (CD3⁺CD8^{bright}CD38⁺), по сравнению с выжившими был достоверно выше у умерших больных (Me=8,8/15,2 %; $p < 0,01$), превышая при этом референтные значения. О прогностической роли CD8⁺ при сепсисе были опубликованы недавно результаты крупного исследования [16]. Также в данной группе ЛПЗ до 60 лет по сравнению с выжившими пациентами у больных с летальным исходом статистически значимо было выше относительное количество Т-хелперов памяти CD4⁺CD45RO⁺ (Me=21,2/24,1 %; $p < 0,01$) и наивных Т-хелперов CD4⁺CD45RO⁻ (Me=24,7/27,9 %; $p < 0,05$). Повышение Т-хелперов памяти (CD45RO⁺) при сепсисе также было зарегистрировано ранее и описано в научных публикациях [17].

Согласно современным представлениям, снижение экспрессии HLA-DR на моноцитах является одним из маркеров иммуносупрессии и исхода у пациентов с сепсисом [14,18,19]. K. Tschaikowsky и соавт. в проспективном исследовании у пациентов с сепсисом выявили увеличение экспрессии HLA-DR на лимфоцитах, что коррелировало с плохим прогнозом [14]. Согласно полученным результатам, средний уровень содержания CD3⁺HLA-DR⁺ у умерших больных был выше, чем в группе выживших (Me=12,0/11,0 %; $p=0,422$).

Сравнительный анализ в группе пациентов ЛПЗ старше 60 лет показал статистически значимое изменение количества общей популяции Т-лимфоцитов CD3⁺. Как представлено в таблице 1, у больных с летальным исходом абсолютное число CD3⁺ (Me=0,82/1,26 $\times 10^9$; $p < 0,05$), было ниже по сравнению с выжившими пациентами. В одном из крупных исследований у пациентов старших возрастных групп было установлено, что неблагоприятный исход коррелировал со снижением CD3⁺ [20]. В работе Z.Cui и соавт. при сепсисе обнаружены значительные снижения абсолютного количества лимфоцитов CD3⁺, CD4⁺, CD8⁺, CD19⁺ и CD56⁺ [21]. Абсолютное чис-

ло $CD3^+CD4^+$ ($Me=0,72/0,42 \times 10^9$; $p < 0,05$) по сравнению с выжившими пациентами было ниже у лиц с летальным исходом. В то же время и относительное ($Me=23,4/17,7$ %; $p < 0,001$), и абсолютное ($Me=0,14/0,62 \times 10^9$; $p < 0,001$) количество ЦТЛ $CD3^+CD8^+$ у умерших пациентов было достоверно ниже, чем у выживших лиц. О дисбалансе Т-хелперов и ЦТЛ по сравнению с выжившими пациентами у умерших больных ЛПЗ старше 60 лет также свидетельствует и высокое значение ИРИ ($Me=1,42/2,39 \times 10^9$; $p < 0,001$). Субпопуляция TNK-клеток $CD3^+CD56^+$, как и в случае с ЦТЛ, у умерших пациентов была существенно снижена. По сравнению с выжившими больными у умерших и относительное ($Me=3,5/1,5$ %; $p < 0,001$), и абсолютное ($Me=0,14/0,06 \times 10^9$; $p < 0,001$) количество TNK-клеток имело статистически значимое более низкое содержание.

Абсолютное число Т-клеток с $\alpha\beta$ -Т-клеточным рецептором $CD3^+TCR\alpha\beta^+$, как и в группе ЛПЗ до 60 лет, у больных ЛПЗ старше 60 лет с летальным исходом было ниже ($Me=0,95/0,99 \times 10^9$; $p < 0,01$), чем в группе выживших больных.

Сравнительный анализ содержания активированных популяций Т-лимфоцитов показал достоверное повышение количества некоторых из них у умерших больных: повышение медианы относительного содержания Т-клеток, экспрессирующих маркер ранней активации $CD3^+CD25^+$, ($p < 0,01$); медианы Т-клеток, экспрессирующих маркер поздней активации HLA-DR, ($p < 0,05$); медианы активированных Т-хелперов памяти $CD4^+CD45RO^+$, ($p < 0,05$).

У пациентов в группе ОМЛ также была зарегистрирована лимфопения, наиболее выраженная у умерших лиц по сравнению с выжившими ($0,63 [0,42-0,74] \times 10^9/\text{л}$ против $0,68 [0,47-0,83] \times 10^9/\text{л}$, $p > 0,05$), но без статистически значимых различий. Как показано в таблице 1, сравнительный анализ в группе ОМЛ до 60 лет выявил у лиц с летальным исходом по сравнению с выжившими больными понижение содержания абсолютного числа общей популяции Т-клеток $CD3^+$ ($Me=0,93/1,38 \times 10^9$; $p < 0,001$). Абсолютное число $CD3^+CD4^+$ у умерших пациентов было ниже ($Me=0,36/0,72 \times 10^9$; $p < 0,01$), чем у выживших больных. Содержание цитотоксических лимфоцитов $CD3^+CD8^+$ имело однонаправленное снижение как относительного ($Me=19,7/24,8$ %; $p < 0,001$), так и абсолютно ($Me=0,14/0,62 \times 10^9$; $p < 0,001$) числа у больных с летальным исходом по сравнению с выжившими больными. Также, как и в предыдущих группах ЛПЗ о дисбалансе основных Т-клеточных популяций у больных с летальным исходом по сравнению с выжившими пациентами свидетельствует высокий уровень ИРИ ($Me=2,2/1,43$; $p < 0,001$) за счет статистически значимого повышения Т-хелперов и снижения ЦТЛ. Как и в случае с ЦТЛ, при анализе популяции NKT-клеток $CD3^+CD56^+$ у больных

ОМЛ до 60 лет имело место однонаправленное снижение у пациентов с летальным исходом. И относительное ($Me=1,4/4,8$ %; $p < 0,001$), и абсолютное ($Me=0,05/0,14 \times 10^9$; $p < 0,01$) содержание $CD3^+CD56^+$ у умерших больных было статистически значимо ниже, чем в группе выживших пациентов. Среди популяций активированных Т-лимфоцитов изменения были зафиксированы только у Th-памяти $CD4^+CD45RO^+$. Их относительное количество было выше у больных с летальным исходом, чем у выживших пациентов ($Me=24,2/22,9$ %; $p < 0,05$). Кроме того, была также, как в группе ЛПЗ, увеличена медиана содержания Т-клеток, экспрессирующих маркер поздней активации HLA-DR у умерших пациентов по сравнению с выжившими, но без статистически значимых отличий ($p > 0,05$).

По данным исследований, на поздней стадии сепсиса уменьшается количество Т-лимфоцитов, но происходит увеличение регуляторных Т-клеток (Treg). При этом повышение Treg приводило к нарушению пролиферативной активности Т-клеток, а также во многом с Treg связывают иммуносупрессию, развивающуюся на поздних стадиях септического процесса [6,21,22]. По нашим данным в группе ОМЛ до 60 лет уровень содержания $CD4^+CD25^{\text{bright}}$ у умерших больных был выше, чем в группе выживших: $2,09 [1,97-2,7]$ % против $2,0 [2,0-2,8]$ %, но без статистически значимой разницы ($p > 0,05$). В одном из проспективных исследований при септическом шоке авторы также обнаружили повышение содержания $CD4^+CD25^+$ [23].

При сравнительном анализе в группе больных с ОМЛ старше 60 лет были также обнаружены статистически значимые изменения со стороны $CD3^+$, $CD3^+CD4^+$, $CD3^+CD8^+$, индекса $CD3^+CD4^+/CD3^+CD8^+$, $CD3^+CD56^+$ и Т-хелперов-памяти $CD4^+CD45RO^+$, что продемонстрировано в таблице 1. Были выявлены существенные изменения в общей популяции Т-лимфоцитов $CD3^+$ и популяции Т-хелперов $CD3^+CD4^+$. Их абсолютное число ($CD3^+ - Me=1,27/0,75 \times 10^9$; $p < 0,001$; $CD3^+CD4^+ - Me=0,72/0,37 \times 10^9$; $p < 0,05$) по сравнению с выжившими пациентами было ниже у умерших лиц. При этом процент общей популяции Т-лимфоцитов и Т-хелперов у больных с летальным исходом в среднем превышал референтные границы ($CD3^+ - N=60-80$ %; $CD3^+CD4^+ - N=30-50$ %), а абсолютные значения были ниже нормальных пределов ($CD3^+ N=0,8-2,2 \times 10^9$; $CD3^+CD4^+ N=0,5-1,2 \times 10^9$). Цитотоксические Т-лимфоциты $CD3^+CD8^+$, как и в предыдущих группах, показали однонаправленное статистически значимое снижение как относительного ($p < 0,05$), так и абсолютного ($p < 0,001$) количества у пациентов с летальным исходом. Медиана абсолютных значений ЦТЛ у умерших больных была ниже референтных значений ($N=0,5-1,2 \times 10^9$). Дисбаланс основных популяций Т-клеток демонстрировал повышенный, у больных с летальным исходом индекс $CD3^+CD4^+/CD3^+CD8^+$ ($p < 0,001$)

за счет увеличения Т-хелперов и уменьшения ЦТЛ. Также, как и в предыдущих группах, медиана значений данного показателя превышала границы нормы ($N=1,2-1,8$). NKT-клетки $CD3^+CD56^+$ также снижались и в относительном ($p<0,001$), и в абсолютном ($p<0,001$) количестве у больных с летальным исходом. Процент популяции Т-хелперов памяти $CD4^+CD45RO^+$, как и в предыдущих группах, был повышен у умерших больных ($p<0,001$). Кроме того, также была увеличена медиана содержания Т-клеток, экспрессирующих маркер поздней активации HLA-DR у умерших пациентов по сравнению с выжившими, но без статистически значимых отличий ($p>0,05$). Также в группе ОМЛ старше 60 лет уровень содержания $CD4^+CD25^{bright}$ у умерших больных был выше, чем в группе выживших: 2,24 [1,85–5,75] % против 2,0 [2,0–2,74] %, но без статистически значимой разницы ($p>0,05$).

Заключение

При развитии системного воспалительного ответа на инфекцию при сепсисе возникает сложная система клеточного взаимодействия врожденного и адаптивного иммунитета. Согласно данным научных публикаций, одну из важных ролей в координации данных процессов отводят различным субпопуляциям Т-лимфоцитов

[8,13,17]. Сравнительный анализ иммунологических показателей между выжившими больными и лицами с летальным исходом показал, что в постцитостатическом периоде на фоне присоединения сепсиса в группах пациентов с лимфопролиферативными заболеваниями и острым миелоидным лейкозом у умерших лиц выявил значимые изменения в структуре Т-клеточного звена. Установлено, что неблагоприятный прогноз был ассоциирован с тенденцией к более выраженным показателям лимфопении, снижением содержания основных популяций Т-лимфоцитов ниже референтных границ. На этом фоне обнаружена тенденция к увеличению регуляторных Т-клеток ($CD4^+CD25^{bright}$) в группе больных острым миелоидным лейкозом, в обеих группах зафиксированы повышение экспрессии маркера поздней активации $CD3^+HLA-DR^+$, рост иммунорегуляторного индекса и Т-хелперов-памяти ($CD4^+CD45RO^+$), что отражает выраженную дисрегуляцию иммунного ответа. Совокупность зарегистрированных изменений свидетельствует о тяжелой иммунологической несостоятельности, при которой в том числе выявленные изменения Т-клеточного звена иммунитета привели к неэффективной противoinфекционной защите у этой когорты лиц и определили неблагоприятный исход заболевания.

ЛИТЕРАТУРА

- Rosolem M.M. Critically ill patients with cancer and sepsis: clinical course and prognostic factors / M.M. Rosolem, L.S. C.F. Rabello, T. Lisboa [et al.] // J. Crit. Care. — 2012. — Vol. 27, № 3. — P. 301–307. DOI: 10.1016/j.jcrc.2011.06.014.
- Mellinghoff S.C. [Management of infection in immunocompromised patients] / S.C. Mellinghoff, J. Stemler, S. Forkl [et al.] // Dtsch. Med. Wochenschr. — 2022. — Vol. 147, № 13. — P. 840–850. DOI: 10.1055/a-1684-6763.
- Azoulay E. Outcomes of critically ill patients with hematologic malignancies: prospective multicenter data from France and Belgium—a groupe de recherchespiratoire en réanimation nonco-hématologique study / E. Azoulay, D. Mokart, F. Pène [et al.] // J. Clin. Oncol. — 2013. — Vol. 31, № 22. — P. 2810–2818. DOI: 10.1200/JCO.2012.47.2365.
- Kochanek M. Management of sepsis in neutropenic cancer patients: 2018 guidelines from the Infectious Diseases Working Party (AGIHO) and Intensive Care Working Party (iCHOP) of the German Society of Hematology and Medical Oncology (DGHO) / M. Kochanek, E. Schalk, M. von Bergwelt-Baildon [et al.] // Ann. Hematol. — 2019. — Vol. 98, № 5. — P. 1051–1069. DOI: 10.1007/s00277-019-03622-0.
- Li Y. Changes in Early T-Cell Subsets and Their Impact on Prognosis in Patients with Sepsis: A Single-Center Retrospective Study / Y. Li, Y. Wang, B. Chen [et al.] // Int. J. Clin. Pract. — 2023. — Vol. 2023. — P. 1688385. DOI: 10.1155/2023/1688385.
- Hotchkiss R.S. Sepsis-induced immunosuppression: from cellular dysfunctions to immunotherapy / R.S. Hotchkiss, G. Monneret, D. Payen // Nat. Rev. Immunol. — 2013. — Vol. 13, № 12. — P. 862–874. DOI: 10.1038/nri3552.
- Kox M. The immunology of sepsis: translating new insights into clinical practice / M. Kox, M. Bauer, L.D.J. Bos [et al.] // Nat. Rev. Nephrol. — 2026. — Vol. 22, № 1. — P. 30–49. DOI: 10.1038/s41581-025-01004-6.
- Monserat J. Clinical relevance of the severe abnormalities of the T cell compartment in septic shock patients / J. Monserat, R. de Pablo, E. Reyes [et al.] // Crit. Care. — 2009. — Vol. 13, № 1. — P. R26. DOI: 10.1186/cc7731.
- Wang H. Single-cell RNA-seq analysis identifies the atlas of lymph fluid and reveals a sepsis-related T cell subset / H. Wang, P. He, Z. Wang [et al.] // Cell. Rep. — 2025. — Vol. 44, № 4. — P. 115469. DOI: 10.1016/j.celrep.2025.115469.
- Swerdlow S.H. WHO Classification of Tumours of Haematopoietic and Lymphoid Tissues / ed. by S.H. Swerdlow, E. Campo, N.L. Harris [et al.]. — 4th ed. — Lyon: IARC, 2017. — 585 p. — ISBN 978-92-832-4494-3.
- Савченко В.Г. Программное лечение заболеваний системы крови: руководство для врачей / под ред. В.Г. Савченко. — М.: Практическая медицина, 2012. — Т. 1. — 595 с. — ISBN 978-5-98811-211-2.
- Singer M. The Third International Consensus Definitions for Sepsis and Septic Shock (Sepsis-3) / M. Singer, C.S. Deutschman, C.W. Seymour [et al.] // JAMA. — 2016. — Vol. 315, № 8. — P. 801–810. DOI: 10.1001/jama.2016.0287.
- Zanza C. Cellular Immuno-Profile in Septic Human Host: A Scoping Review / C. Zanza, G. Caputo, G. Tornatore [et al.] // Biology (Basel). — 2022. — Vol. 11, № 11. — P. 1626. DOI: 10.3390/biology11111626.

14. Tschaikowsky K. Coincidence of pro— and anti-inflammatory responses in the early phase of severe sepsis: Longitudinal study of mononuclear histocompatibility leukocyte antigen-DR expression, procalcitonin, C-reactive protein, and changes in T-cell subsets in septic and postoperative patients / K. Tschaikowsky, M. Hedwig-Geissing, A. Schiele [et al.] // Crit. Care Med. — 2002. — Vol. 30, № 5. — P. 1015–1023. DOI: 10.1097/00003246-200205000-00010.
15. Drewry A.M. Persistent lymphopenia after diagnosis of sepsis predicts mortality / A.M. Drewry, N. Samra, L.P. Skrupky [et al.] // Shock. — 2014. — Vol. 42, № 5. — P. 383–391. DOI: 10.1097/SHK.0000000000000234.
16. Zhao G. Prognostic Value and Potential Mechanism of CD8+ T Subsets Phenotype in ICU Patients with Sepsis / G. Zhao, H. Wang, J. Zhang [et al.] // Shock. — 2026. — Vol. 65, № 2. — P. 201–210. DOI: 10.1097/SHK.0000000000002730.
17. Roth G. Susceptibility to programmed cell death in T-lymphocytes from septic patients: a mechanism for lymphopenia and Th2 predominance / G. Roth, B. Moser, C. Krenn [et al.] // Biochem. Biophys. Res. Commun. — 2003. — Vol. 308, № 4. — P. 840–846. DOI: 10.1016/s0006-291x(03)01482-7.
18. Zhuang Y. Dynamic monitoring of monocyte HLA-DR expression for the diagnosis, prognosis, and prediction of sepsis / Y. Zhuang, H. Peng, Y. Chen [et al.] // Front. Biosci. (Landmark Ed). — 2017. — Vol. 22, № 8. — P. 1344–1354. DOI: 10.2741/4547.
19. Boomer J.S. Immunosuppression in patients who die of sepsis and multiple organ failure / J.S. Boomer, K. To, K.C. Chang [et al.] // JAMA. — 2011. — Vol. 306, № 23. — P. 2594–2605. DOI: 10.1001/jama.2011.1829.
20. Zhang J. Dynamic alterations of lymphocyte subsets following sepsis in octogenarian and elder patients / J. Zhang, W. Cheng, D. Li [et al.] // J. Intensive Med. — 2025. — Vol. 5, № 4. — P. 359–366. DOI: 10.1016/j.jointm.2025.04.002.
21. Cui Z. Study on immune status alterations in patients with sepsis / Z. Cui, L. Wang, H. Li, M. Feng // Int. Immunopharmacol. — 2023. — Vol. 118. — P. 110048. DOI: 10.1016/j.intimp.2023.110048.
22. Venet F. Increased circulating regulatory T cells (CD4(+)CD25(+)CD127(-)) contribute to lymphocyte anergy in septic shock patients / F. Venet, C.S. Chung, H. Kherouf [et al.] // Intensive Care Med. — 2009. — Vol. 35, № 4. — P. 678–686. DOI: 10.1007/s00134-008-1337-8.
23. Monneret G. Marked elevation of human circulating CD4+CD25+ regulatory T cells in sepsis-induced immunoparalysis / G. Monneret, A.L. Debar, F. Venet [et al.] // Crit. Care Med. — 2003. — Vol. 31, № 7. — P. 2068–2071. — DOI: 10.1097/01.CCM.0000069345.78884.0F.

© Юркин Александр Кимович (sarotis1956@mail.ru); Щеголев Алексей Валерианович; Юркина Екатерина Александровна;

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

Наши авторы

Afanaseva N. — Perm State Medical University named after Academician E.A. Wagner

Aksenov K. — Postgraduate student, Chita State Medical Academy

Aksenova T. — Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, Chita State Medical Academy

Amarantov D. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Perm State Medical University named after Academician E.A. Wagner

Antonovskaya O. — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering

Asmankin S. — postgraduate student, Moscow State Technological University «STANKIN»

Belkin E. — ALGONT JSC, Kaluga

Belousov E. — Graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, (Sibstrin)

Besklubnaya A. — Candidate of Pedagogical Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering

Bogdasarov A. — Doctor of Medical Sciences, Professor, State Educational Institution of Higher Professional Education Ulyanovsk State University

Bogdasarova R. — Postgraduate Student, State Educational Institution of Higher Professional Education Ulyanovsk State University

Chavga A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Ulyanovsk State University, Ulyanovsk

Cheban S. — Surgeon, Reutov Clinical Hospital

Cherkasov A. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kuban State Technological University, Krasnodar

Chernevov V. — Independent researcher, Balabanovo

Chernysheva T. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Orenburg State Medical University

Our authors

Davidyan L. — Doctor of Medical Sciences, Professor, State Educational Institution of Higher Professional Education Ulyanovsk State University

Dolidze D. — Doctor of Medical Sciences, Academic Secretary, Head of the Scientific and Clinical Department, S.P. Botkin Medical Research and Clinical Center, Moscow; Professor, Russian Medical Academy of Postgraduate Education

Fedorova N. — senior lecturer, Volgograd State Technical University

Gorokhov A. — Candidate of Biological Sciences, Federal Research Center Yakut Scientific Center Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Gresyuk A. — Candidate of Technical Sciences, assistant professor, Ukhta State Technical University

Groshev S. — Volgograd State Technical University

Herbert D. — Assistant, Ukhta State Technical University

Ichmelyan A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, State Educational Institution of Higher Professional Education Ulyanovsk State University

Kamalov A. — Graduate student, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

Komlev D. — MISIS University of Science and Technology (National Research Technological University), Moscow

Kondrashev A. — ALGONT JSC, Kaluga

Kondratov D. — Doctor of physico-mathematical sciences, associate professor, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

Kopylov V. — Doctor of Technical Sciences, Professor, Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk

Koriagin V. — Resident, Perm State Medical University named after Academician E.A. Wagner

Koriagina N. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Perm State Medical University named after Academician E.A. Wagner

Kucherenko S. — Perm State Medical University named after Academician E.A. Wagner

Kuntsev V. — Candidate of Technical Sciences, assistant professor, Ukhta State Technical University

Kuznetsov M. — Doctor of Medical Sciences, Professor, L.L. Levshin Institute of Cluster Oncology, Sechenov University; S.S. Yudin City Clinical Hospital

Lebedev S. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Russian Medical Academy of Postgraduate Education; Deputy Chief Physician for Oncology, S.P. Botkin Medical Research and Clinical Center, Moscow

Lobanov L. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Chita State Medical Academy

Lobanov O. — Postgraduate, Lecturer, Moscow State Technological University Stankin, Moscow

Lobanov S. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Chita State Medical Academy

Lobanov Yu. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Chita State Medical Academy

Maslov A. — Postgraduate student, Moscow State Technical University of Civil Aviation

Matveev D. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Russian Medical Academy of Postgraduate Education

Muraviev A. — Postgraduate Student, St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov

Nosov K. — Postgraduate student, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg

Oleynikova D. — Candidate of Medical Sciences, Senior Lecturer Ulyanovsk State University, Higher Professional Education Institution

Orevkov E. — Assistant, Perm State Medical University named after Academician E.A. Wagner

Pavlov V. — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

Pavlovsky V. — Lecturer, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)

Pavlyenko Yu. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education South Ural State Medical University

Pchelintsev I. — postgraduate, Moscow State Linguistic University

Pershin P. — The urologist, State Healthcare Institution City Clinical Hospital No. 1, Chita

Petrov V. — Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor, Moscow State Technological University STANKIN, Moscow

Piotrovich A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education South Ural State Medical University

Plotnikov V. — postgraduate student, Volgograd State Technical University

Ponomarev D. — Candidate of Medical Sciences, Cardiologist, Branch of Medtorgservice Limited liability company, Tambov

Reshetov V. — Postgraduate student, Voronezh State University, Russian Federation, Voronezh

Salov M. — Kuban State Technological University, Krasnodar

Sarycheva Yu. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Orenburg State Medical University

Shaykhutdinov N. — Order of the Red Banner of Labor S.I. Georgievsky Medical Institute FGAOU VO KFU named after V.I. Vernadsky

Shchegolev A. — Doctor of Medical Sciences, professor, S.M. Kirov Military Medical Academy, Saint Petersburg; Chief Anesthesiologist-Intensivist of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Chief Freelance Specialist in Anesthesiology, and Intensive Care Medicine of the Health Committee of Saint Petersburg

Shibichenko M. — Postgraduate student, Moscow University of Finance and Law MFUA, Moscow

Shifrin B. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov

Shkitronov M. — Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Establishment of Higher Education Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters named after the Hero of the Russian Federation, Army General E.N. Zinichev

Sizov A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University

Stryukov V. — Assistant, Ukhta State Technical University

Superekin I. — Postgraduate student, General Director of the Autonomous Non-Profit Organization Center for Expertise, Development and Assessment of Competencies «New Time»

Toporkov M. — Candidate of Medical Sciences, senior lecturer, S.M. Kirov Military Medical Academy, Saint Petersburg

Tretyakova I. — Doctor of medical sciences, Federal state budget educational institution of higher education «North Ossetian state medical academy», Vladikavkaz

Trubacheva-Gudovich A. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)

Ukolov A. — Postgraduate, Moscow State University of Technology «STANKIN»

Ushakova O. — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

Velichenko V. — Doctor of Biological Sciences, Arctic State Agrotechnological University

Voitenok O. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Establishment of Higher Education Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Desasters named after the Hero of the Russian Federation, Army General E.N. Zinichev

Voronova A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Order of the Red Banner of Labor S.I. Georgievsky Medical Institute FGAOU VO KFU named after V. I. Vernadsky

Vorontsova O. — Order of the Red Banner of Labor S.I. Georgievsky Medical Institute FGAOU VO KFU named after V.I. Vernadsky

Yakovlev A. — Doctor of Engineering, professor, Volgograd State Technical University

Yeskin D. — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volgograd Academy of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation

Yurkin A. — Candidate of Medical Sciences, lecturer, S.M. Kirov Military Medical Academy, Saint Petersburg

Yurkina E. — Candidate of Medical Sciences, independent researcher

Zagorulko A. — Candidate of Medical Sciences, Head of the Department No. 2, Branch, Oncology Center No. 1, S.S. Yudin City Clinical Hospital, Moscow; Specialist in X-ray Endovascular Diagnostics and Treatment, Cardiovascular Surgeon, Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

Zhikharev A. — Volgograd State Technical University

Zlykh D. — Postgraduate Student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)

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).