

ISSN 2223-2966



СОВРЕМЕННАЯ НАУКА:
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 7 2025 (ИЮЛЬ)

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>

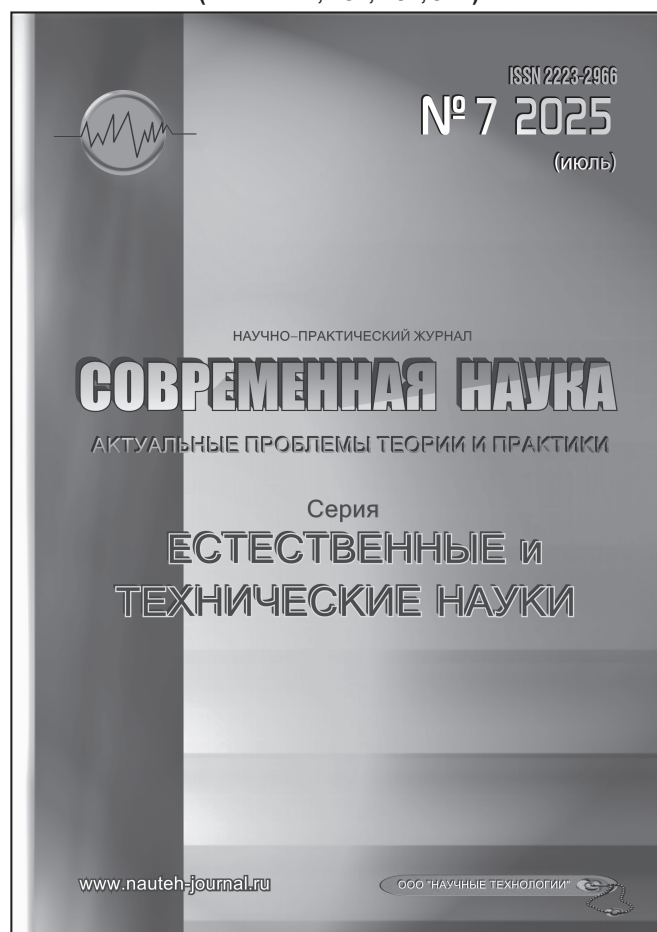
Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия.

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 17.07.2025 г. Формат 84x108 1/16
Печать цифровая Заказ № 0000 Тираж 2000 экз.

ISSN 2223-2966



Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Алексеева Н.В., Должанов П.Б., МIRONENKO О.А. — Оценка состояния экосистемы реки Грузской Еланчик с использованием гидробиологических и гидрохимических показателей сапробности
Alekseeva N., Dolzhanov P., Mironenko O. — Assessment of the ecosystem of the Georgian Elanchik river using hydrobiological and hydrochemical indicators of saprobicity7

Казарезов А.А., Ларичкин В.В. — Экологически и экономически эффективный композиционный сорбционный мат для ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов и кислотных электролитов на почвах
Kazarezov A., Larichkin V. — A cost— and eco-efficient composite sorption mat for the remediation of oil- and acid-contaminated soils17

Ульдияров С.В., Назарова Н.П., Головки М.В. — Анализ и разработка мероприятий по оптимизации обеззараживания сточных вод с применением ультрафиолетового излучения на водоочистных сооружениях
Uldiyarov S., Nazarova N., Golovko M. — Analysis and development of measures to optimize wastewater disinfection using ultraviolet radiation at water treatment plants22

Фокина Н.Ю., Гринев А.Б. — Сравнительная генетика простейших, патогенных для человека и животных
Fokina N., Grinev A. — Comparative genetics of protozoa, pathogenic to humans and animals30

Шейко Е.А., Сытников Д.М., Шихалева О.К. — Патогенные бактерии в терапии онкологических заболеваний
Sheyko E., Sytnikov D., Shihaleva O. — Pathogenic bacteria in antitumor therapy36

Информатика, вычислительная техника и управление

Антоновская О.Г., Бесклубная А.В. — К исследованию квазигармонического

осциллятора типа Ван-дер-Поля методом приближенных точечных отображений
Antonovskaya O., Besklubnaya A. — To study a quasi-harmonic oscillator of the Van der Pol type by the method of approximate point mappings41

Бирюков В.О. — Исследование численных методов моделирования волноводного распространения
Biryukov V. — Investigation of numerical methods for modeling waveguide propagation46

Бушманов А.В., Ложкова А.А. — О методических погрешностях оценки словесной разборчивости речи при оценке защищённости помещения
Bushmanov A., Lozhkova A. — Possible errors in the methodology for assessing speech intelligibility when assessing the security of premises52

Горячкин Б.С., Бузырев И.Л., Чжен А.О., Юников С.Р. — Анализ использования информационно-аналитического инструментария для оценки результативности командной работы
Goryachkin B., Buzyrev I., Zhen A., Yunikov S. — Analysis of the use of information and analytical tools for assessing the performance of teamwork59

Гресюк А.Н., Кожевникова П.В., Кунцев В.Е. — Построение структурной модели пропластков коллекторов геологической модели
Gresyuk A., Kozhevnikova P., Kuntsev V. — Construction of a structural model of reservoir layers of a geological model66

Громоздов Д.Р., Гапаныук Ю.Е., Афанасьев Г.И. — Методы оценки извлечения глубокой семантики большими языковыми моделями
Gromozdov D., Gapanyuk Yu., Afanasyev G. — Methods for assessing deep semantics extraction by large language models73

Дронов А.Г. — О критериях выбора очередного симплекса в алгоритмах триангуляции на основе движущегося фронта
Dronov A. — On the selection criteria for the next simplex in triangulation algorithms based on advancing front method80

Жовноватый К.Е. — Динамика обработки случайных информационных воздействий в когнитивных системах
Zhovnovatiy K. — Dynamics of processing of stochastic information influences in cognitive systems85

Зубарев М.А. — Автоматизированная система управления геотермальным отоплением с беспроводным мониторингом температурных зон
Zubarev M. — Automated geothermal heating control system with wireless monitoring of temperature zones91

Ильин И.И. — Интеграция внешних источников данных в систему учета отчетности телекоммуникационной компании: архитектура и реализация
Ilyin I. — Integration of external data sources into the accounting system of a telecommunication company: architecture and implementation98

Ильин И.И. — Разработка и внедрение модуля массовых изменений данных в коллекциях для автоматизации учета отчетности в телекоммуникационной компании: архитектура и функциональность
Ilyin I. — Development and implementation of a module for mass data changes in collections for automation of accounting reporting in a telecommunications company: architecture and functionality 106

Касьянов А.В. — Периодичность генераторов случайных чисел, построенных на вычислительной машине
Kasyanov A. — Periodicity of random number generators built on a computing machine..... 112

Логачёв М.С., Кучмезов Х.Х. — Цифровая трансформация экотуризма в России: проектирование цифровых сервисов для туристов
Logachev M., Kuchmезov Kh. — Digital transformation of ecotourism in Russia: designing digital services for tourists..... 117

Малявин М.Ю. — Современные угрозы безопасности веб-приложений и комплексный подход к использованию методов для их предотвращения

Malyavin M. — Modern web application security threats and a comprehensive approach to using methods to prevent them 125

Моругин С.Л. — Модель диалога с чат-ботом в мультиагентной среде
Morugin S. — Dialogue model with chat bot in a multiactive environment..... 131

Муравьева Е.А., Масков Г.Г. — Разработка нейросети для поддержания качества дихлорэтана в среде MATLAB и моделирование виртуального анализатора в MATLAB Simulink
Muravyova E., Maskov G. — Development of a neural network for maintaining the quality of dichloroethane in the MATLAB environment and simulation of a virtual analyzer in MATLAB Simulink..... 137

Павлов С.Н. — Информационная система для анализа качества фокусирующих оптических систем
Pavlov S. — Information system for quality analysis of focusing optical systems..... 143

Рубцов А.М. — Ликвидность предприятия как объект управления: эволюция понятий и современные риски
Rubtsov A. — Corporate liquidity as a management object: evolution of concepts and contemporary risks..... 149

Сакаш И.Ю. — Математическая модель для исследования показателей надежности локальных компьютерных сетей
Sakash I. — A study of reliability indicators of local computer networks by means of a mathematical model..... 155

Ситников А.Д. — Реализация сценарного анализа в системах поддержки принятия решений с помощью технологий искусственного интеллекта
Sitnikov A. — Implementation of scenario analysis in decision support systems using artificial intelligence technologies 161

Тарасенко С.С., Королева Ю.Е. — Аналитическая оценка децентрализованных систем в качестве альтернативы для организации хранилищ данных
Tarassenko S., Koroleva Yu. — Analytical assessment of decentralized systems as an alternative for data storage organization 172

Тырышкин С.Ю. — Улучшенный квантовый генетический алгоритм с кутритным представлением в задачах функциональной оптимизации

Tyryshkin S. — Improved quantum genetic algorithm with qutrit representation in functional optimization problems. 177

Фомичев С.М. — Применение технологий искусственного интеллекта в управлении организационными системами: перспективы, вызовы и стратегические направления развития
Fomichev S. — Application of artificial intelligence technologies in organizational systems management: prospects, challenges, and strategic directions of development. 182

Хежжо Мухсен — Анализ эффективности машин опорных векторов в классификации данных и их практические применения
Hejjo Muhsen — Analysis of the effectiveness of support vector machines in data classification and their practical 185

Чжан Чэ, Терехов В.И., Афанасьев Г.И. — Применение графов в мультиагентном обучении с подкреплением: прогресс исследований и методологическая основа
Zhang Che, Terekhov V., Afanasyev G. — Applications of graphs in multi-agent reinforcement learning: research progress and methodological framework 192

Клиническая медицина

Асриян А.Ю., Сокуров А.В., Запарий Н.С., Поляков М.И. — Динамические изменения показателей кумулятивной инвалидизации, обусловленной эндокринопатиями, нутритивными дисфункциями и метаболическими нарушениями у совершеннолетних жителей Москвы в сопоставлении с данными по Центральному федеральному округу за пятилетний период (2017–2021 гг.)
Asriyan A., Sokurov A., Zapariy N., Polyakov M. — Dynamic changes in cumulative disability indicators caused by endocrinopathies, nutritive dysfunctions, and metabolic disorders among adult residents of Moscow in comparison with data from the Central Federal District over a five-year period (2017–2021). 197

Вишневецкая В.А. — Современное состояние проблемы восстановления эффективности жевания при посттравматических дефектах зубных рядов

Vishnevetskaya V. — The current state of the problem of restoring chewing efficiency in post-traumatic defects of the dental arches. 204

Горпинич А.Б. — Возможности прогнозирования факторов риска неудовлетворительных результатов хирургического лечения язвенной болезни двенадцатиперстной кишки
Gorpinich A. — Possibilities of predicting risk factors of unsatisfactory results of surgical treatment of duodenal ulcer 209

Идрисов Р.И., Капралов С.В., Полиданов М.А., Кашихин А.А., Петрунькин Р.П., Волков К.А. — Клиническое обоснование применения устройства для энтерального зондового питания
Idrisov R., Kapralov S., Polidanov M., Kashikhin A., Petrunkin R., Volkov K. — Clinical rationale for the use of enteral tube feeding device 214

Йайа Латифату, Мартынов А.Ю. — Особенности течения острого повреждения почек при тяжелой тропической малярии в республике Бенин
Yaya L., Martynov A. — Clinical characteristics of acute kidney injury in severe tropical malaria cases in the republic of Benin 218

Капралов С.В., Климашевич В.Ю., Данилов А.Д., Полиданов М.А., Волков К.А., Масляков В.В. — История изучения перитонита от античности до наших дней
Kapralov S., Klimashevich V., Danilov A., Polidanov M., Volkov K., Maslyakov V. — History of the study of peritonitis from antiquity to the present day. 225

Нецкина А.А., Зайцев О.В., Лесовик В.С., Думачев А.В., Серпухин Д.Д. — Экспериментальное обоснование применения неполной серебряной соли полиакриловой кислоты в лечении гнойных ран на лабораторных животных
Netskina A., Zaitsev O., Lesovik V., Dumachev A., Serpukhin D. — Experimental rationale for the use of incomplete silver salt of polyacrylic acid in the treatment of purulent wounds in laboratory animals 231

Парабина Е.В., Фатенков О.В., Миронов А.А., Мякотных М.Н., Светлова Г.Н. — Иммуитет после трансплантации почки: современные вызовы и перспективы <i>Parabina E., Fatenkov O., Mironov A., Myakotnykh M., Svetlova G.</i> — Immunity after kidney transplantation: modern challenges and prospects	236
Сазанов Г.В., Айдемиров А.Н., Сапельников О.В. — Профилактика феномена невосстановленного коронарного кровотока у пациентов с острым коронарным синдромом с подъёмом сегмента ST <i>Sazanov G., Aydemirov A., Sapelnikov O.</i> — Prevention of the phenomenon of unrestored coronary blood	

flow in patients with acute coronary syndrome with ST segment elevation.....	242
Хоконова Т.М., Хараева З.Ф., Сохрокова Д.М., Соляник С.С., Сохрокова Н.М. — Прогностическая ценность биомаркеров сыворотки у пациентов с гипертензивной и ишемической кардиопатологией <i>Khokonova T., Kharaeva Z., Sokhroкова D., Solyanik S., Sokhroкова N.</i> — Prognostic value of serum biomarkers in patients with hypertensive and ischemic cardiopathology	249
Наши авторы	255

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ РЕКИ ГРУЗСКОЙ ЕЛАНЧИК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ САПРОБНОСТИ

ASSESSMENT OF THE ECOSYSTEM OF THE GEORGIAN ELANCHIK RIVER USING HYDROBIOLOGICAL AND HYDROCHEMICAL INDICATORS OF SAPROBICITY

**N. Alekseeva
P. Dolzhanov
O. Mironenko**

Summary. A comprehensive study of the Gruzsky Elanchik River ecosystem, utilizing biochemical indicators of saprobity, has revealed a complex and heterogeneous picture of its condition. On one hand, the river exhibits signs of resilience, demonstrated by sufficient levels of dissolved oxygen and a diverse range of benthic organisms in certain areas. Conversely, the analysis results point to a clear anthropogenic impact, evidenced by elevated levels of organic matter and the prevalence of saprobiont species — indicators of pollution. An imbalance in the composition of phyto- and zooplankton, as well as exceeding permissible concentrations of nitrogen and phosphorus, indicate localized problems associated with pollution and eutrophication. The dominance of euglenoid algae in the phytoplankton is a clear signal of a high level of organic pollution, requiring close attention. Therefore, the ecosystem of the Gruzsky Elanchik River is in a state of dynamic equilibrium, experiencing both the positive influence of natural factors and the negative impact of anthropogenic pressure.

Keywords: Gruzsky Elanchik, saprobiological analysis, biological and hydrochemical methods, anthropogenic impact.

Алексеева Наталья Викторовна

К. вет. н., доцент,

ФГБОУ ВО «Донбасская аграрная академия»

alekseevadonagra@yandex.ru

Должанов Павел Борисович

К. вет. н., ФГБОУ ВО «Донбасская аграрная академия»

pbdol@mail.ru

Мироненко Оксана Александровна

Ст. преподаватель,

ФГБОУ ВО «Донбасская аграрная академия»

ksumirondok@mail.ru

Аннотация. Проведенное комплексное исследование экосистемы реки Грузской Еланчик с использованием гидробиологических и гидрохимических показателей сапробности, позволило выявить сложную и неоднородную картину ее состояния. С одной стороны, река демонстрирует признаки устойчивости, проявляющиеся в достаточном уровне растворенного кислорода и разнообразии донных организмов на отдельных участках. С другой стороны, результаты анализов указывают на явное антропогенное воздействие, выражающееся в повышенном содержании органических веществ и преобладании видов сапробионтов — индикаторов загрязнения. Дисбаланс в составе фито- и зоопланктона, а также превышение допустимых концентраций азота и фосфора, свидетельствуют о наличии локальных проблем, связанных с загрязнением и эвтрофикацией. Преобладание эвгленовых водорослей в фитопланктоне является ярким сигналом о высоком уровне органического загрязнения, требующем пристального внимания. Таким образом, экосистема реки Грузской Еланчик находится в состоянии динамического равновесия, испытывая как позитивное влияние природных факторов, так и негативное воздействие антропогенного пресса.

Ключевые слова: Грузской Еланчик, сапробиологический анализ, биологические и гидрохимические методы, антропогенное влияние.

Введение

Река Грузской Еланчик, протекающая по территории Донецкой Народной Республики, является важным источником водоснабжения и играет значительную роль в поддержании биоразнообразия региона. Антропогенное воздействие, связанное с промышленностью, сельским хозяйством и активными боевыми действиями, оказывает существенное влияние на состояние её экосистемы [1, 9, 10, 13].

Оценка качества воды и выявление степени загрязнения является важной задачей для разработки мер

по сохранению и восстановлению реки. Для этой цели широко используются биологические и химические показатели сапробности, позволяющие комплексно оценить состояние водной среды [5, 10, 11].

Биологические методы оценки сапробности основаны на изучении видового состава и численности организмов, населяющих водную среду. Различные виды живых существ обладают разной чувствительностью к загрязнению, что позволяет использовать их в качестве индикаторов качества воды. Некоторые виды бактерий и простейших активно размножаются в загрязненных водах, в то время как другие, более требовательные

к чистоте воды, исчезают. Изучение видового состава макрозообентоса (донных беспозвоночных) является одним из наиболее распространенных методов биоиндикации. Индексы, основанные на чувствительности различных видов к загрязнению, позволяют определить степень сапробности реки [1, 9].

Химические методы оценки сапробности основаны на измерении концентрации различных химических веществ в воде. К наиболее важным показателям относятся: растворенный кислород, биохимическое потребление кислорода, химическое потребление кислорода, содержание нитратов, нитритов, аммония, фосфатов и других загрязняющих веществ [2, 5, 8, 11, 13].

Комплексное применение биологических и химических методов позволяет получить более полную и объективную оценку состояния экосистемы реки Грузской Еланчик. Сопоставление данных, полученных разными методами, позволяет выявить источники загрязнения, определить степень их влияния на водную среду и разработать эффективные меры по улучшению качества воды и восстановлению экологического равновесия [2, 5, 8, 9, 10, 13].

Цель работы: на основании биологических и химических показателей сапробности оценить состояние экосистемы реки Грузской Еланчик.

Материалы и методы

Оценку состояния экосистемы реки Грузской Еланчик проводили с использованием гидробиологических и гидрохимических показателей сапробности. Отбор проб воды бассейна реки Грузской Еланчик произведено в семи гидрологических створах расположенных в Старобешевском и Тельмановском районах Донецкой Народной Республики: № 1 — в районе Кумачевской сельской администрации (выше по течению), № 2 — в районе Кумачевской сельской администрации (ниже по течению), № 3 — в районе Кузнецово-Михайловской сельской администрации, № 4 — балка Горькая (левый приток Грузского Еланчика) в районе Кузнецово-Михайловской сельской администрации, № 5 — балка Большая Каменка (правый приток Грузского Еланчика) в районе Мичуринской сельской администрации, № 6 — балка Большая Каменка в районе Первомайской сельской администрации, № 7 — балка Горькая (левый приток Грузского Еланчика) в районе Михайловской сельской администрации.

Отбор, обработка и исследование проб проводились в соответствии с установленными нормативными документами [4, 7].

Методы исследования:

— гидробиологическое (определение видового состава и численности фитопланктона, зоопланкто-

на и макрозообентоса) с последующим сапробиологическим анализом;

— гидрохимическое (определение водородного показателя, биохимического потребления кислорода, химического потребления кислорода, содержание растворенного кислорода, взвешенных веществ, минеральных форм азота и фосфора) с последующим расчетом индекса загрязнения воды [3, 4, 6, 12].

Результаты исследования

Грузский Еланчик — река в Донецкой Народной Республике, формирующая акваторию Азовского моря с истоком между сёлами Культура, Вишнёвое и Кумачово. Река протекает по территории Старобешевского, Тельмановского и Новоазовского районов ДНР. Длина реки составляет 91 км, а площадь водосборного бассейна — 1250 км², с уклоном — 1,3 м/км. Речная долина трапециевидная, шириной до 2,5 км. Русло реки на отдельных участках расчищено и имеет ширину и глубину до 10 м и 1,5 м соответственно. Вода из реки используется для орошения. Главными притоками Грузского Еланчика являются река Средний Еланчик (правый приток) и река Горькая (левый приток).

В бассейне реки преобладают чернозёмы и древние кристаллические породы с четвертичными отложениями. Дно реки в основном илистое и вязкое (особенно в гидростворах № 4–7), но встречаются и глинистые участки (гидростворы № 1, № 2), а также выходы песчанников.

В бассейне реки Грузской Еланчик доминируют распространённые макрофиты, такие как тростник обыкновенный, рогоз широколистный и роголистник тёмно-зелёный. Зарастание составляет около 12–20 %, но в некоторых гидростворах (№ 2, № 6, № 7) требуется удаление растительности, особенно рогоза и тростника.

Река находится в зоне умеренно-континентального климата с жарким сухим летом и мягкой малоснежной зимой. Река относится к восточно-европейскому типу с преобладанием снегового питания и весенними паводками. Ледостав обычно длится с середины декабря до середины марта. Питание реки смешанное, с преобладанием снегового стока (до 70 %), но в засушливые периоды может пересыхать, а зимой — перемерзать.

Модуль годового стока колеблется от 0,9 до 1,3 л/с с 1 км². Объемы стока значительно варьируются между гидростворами, с наибольшими значениями в створах № 1 и № 3, наименьшим — в створе № 2. Уровень зарегулированности стока (влияние водохранилищ и прудов) также различается, с наиболее высокими показателями в створах № 2 и № 3 и низким в створе № 4.

В ходе гидробиологического исследования были определены компоненты, формирующие фитопланктон (растительные микроорганизмы, свободно перемещающиеся в воде), зоопланктон (животные микроорганизмы, составляющие планктонное сообщество) и макрозообентос (донные беспозвоночные размером более 0,2 см) с последующим сапробиологическим анализом.

Видовое разнообразие фитопланктона, обнаруженного в пробах воды из реки Грузской Еланчик, представлено четырьмя классами водорослей: *Euglenophyta* (эвгленовые), *Cyanophyta* (сине-зеленые), *Chlorophyta* (зеленые) и *Bacillariophyta* (диатомовые).

Эвгленовые водоросли обычно встречаются в пресных водах, насыщенных органическими веществами; они имеют жгутик для активного движения и хлоропласты для фотосинтеза, хотя некоторые виды способны к гетеротрофному питанию, поглощая органику из окружающей среды. Сине-зеленые водоросли — это прокариоты (не имеющие оформленного ядра), образующие колонии или нити, способные к фотосинтезу и фиксации атмосферного азота. Зеленые водоросли — эукариоты (с оформленным ядром) одноклеточной, колониальной или многоклеточной формы с хлоропластами, содержащими хлорофилл *a* и *b* (как у высших растений). Диатомовые водоросли — одноклеточные водоросли, разнообразные по форме и размеру, с кремнеземным панцирем (фрастулой), состоящим из двух частей.

Экологическая роль разных классов водорослей неодинакова и значительно различается. Эвгленовые водоросли служат индикаторами загрязнения воды органическими веществами, поскольку некоторые виды могут вызывать «цветение» воды, придавая ей зеленоватый или красноватый оттенок. Цианобактерии, являясь важными первичными продуцентами (автотрофами) в водных экосистемах, также могут указывать на качество воды, поскольку вызывают «цветение» (особенно в теплую погоду), что приводит к снижению уровня кислорода и выделению токсичных веществ (цианотоксинов), опасных для рыб, других водных организмов и человека. Зеленые водоросли, из-за их чувствительности к изменениям окружающей среды, тоже используются как индикаторы качества воды и являются важными автотрофами, служащими пищей для зоопланктона и рыб. Диатомовые водоросли, будучи важными первичными продуцентами, особенно в холодных водах, также применяются для оценки качества воды, поскольку разные виды по-разному реагируют на загрязнение, а после их отмирания кремнеземные панцири оседают на дно, формируя диатомовые отложения (диатомит).

Обнаружение этих четырех классов водорослей в реке Грузской Еланчик говорит о разнообразии фитопланктона в данной водной экосистеме. Однако, для бо-

лее точной оценки состояния экосистемы реки Грузской Еланчик и потенциальных проблем, необходимо знать видовой состав каждого класса для проведения сапробиологического анализа (таблица 1).

Таблица 1.

Видовой состав фитопланктона на гидрологических створах бассейна реки Грузской Еланчик

Таксон	Гидрологический створ							Долевое распределение, %
	1	2	3	4	5	6	7	
1 группа Евгленовые водоросли (<i>Euglenophyta</i>)								
<i>Cyclidiopsis aus</i>	+		+		+	+	+	60,9
<i>Euglena geniculata</i>	+		+	+	+	+	+	
<i>Eutreptia lanovii</i>	+		+		+	+	+	
<i>Lepocinclis globula</i>	+		+		+	+	+	
<i>Phacus monlatus</i>			+		+			
<i>Phacus orbicularis</i>	+					+	+	
<i>Phacus pyrum</i>		+						
<i>Trachelomonos volvocina</i>	+	+	+		+	+	+	
Количество видов	6	2	6	1	6	6	6	
2 группа Сине-зеленые водоросли (<i>Cyanophyta</i>)								
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	+	+	+	+	+	+	+	18,1
<i>Anabaena circinalis</i>		+						
<i>Merismopedia tenuissima</i>		+					+	
<i>Microcystis aeruginosa</i>		+		+				
<i>Oscillatoria tenuis</i>		+						
Количество видов	1	5	1	2	1	1	2	
3 группа Зеленые водоросли (<i>Chlorophyta</i>)								
<i>Chlamidomonas pertusa</i>	+		+		+	+	+	13,33
<i>Chlamidomonas reinhardtii</i>	+	+	+	+	+	+	+	
<i>Chlorella vulgaris</i>	+	+		+	+	+	+	
<i>Chlorogonium dongatum</i>			+			+	+	
<i>Chlorogonium elongatum</i>					+			
<i>Closterium intermedium</i>	+				+	+	+	
<i>Scenedesmus acutus</i>		+						
<i>Spirogyra porticalis</i>	+				+	+	+	
Количество видов	5	3	3	2	6	6	6	

Таксон	Гидрологический створ							Долевое распределе- ние, %
	1	2	3	4	5	6	7	
4 группа Диатомовые водоросли (<i>Bacillariophyta</i>)								
<i>Bacillaria paradoxa</i>	+				+	+	+	7,6
<i>Cylindrotheca gracilis</i>	+				+		+	
<i>Cymbella cymbiformis</i>					+			
<i>Fragilaria capucina</i>	+				+	+	+	
<i>Gyrosigma acuminatum</i>	+				+	+	+	
<i>Nizshia microcephata</i>	+	+	+		+	+	+	
<i>Pinnularia viridis</i>	+				+	+	+	
<i>Pleurosigma salinarum</i>	+			+	+	+	+	
<i>Stephonodiscus astraea</i>				+				
<i>Stephonodiscus hantzshii</i>	+	+	+		+	+	+	
Количество видов	8	2	2	2	9	7	8	
Общая биомасса, г/м³	27,9	20,2	10,5	29,5	24,6	49,5	50,5	212,7/100

В фитопланктонном сообществе реки Грузской Еланчик выявлен 31 таксон водорослей видового ранга. Наибольшим таксономическим разнообразием отличаются диатомовые водоросли, на долю которых приходится 32,3 % (10 видов) от общего видового состава фитопланктона. Сине-зеленые водоросли представлены в меньшем количестве — 16,1 % (5 видов). Эвгленовые и зеленые водоросли демонстрируют схожую представленность, составляя по 25,8 % (8 видов) от общего количества водорослей. Количественные показатели развития фитопланктона в реке Грузской Еланчик варьируют в зависимости от гидрологического створа. Наибольшие значения биомассы фитопланктона зафиксированы на гидрологических створах № 6 и № 7, составляя 49,5 г/м³ и 50,5 г/м³ соответственно. Наименьшее значение отмечено на гидрологическом створе № 3 — 10,5 г/м³.

Среди 31 идентифицированного таксона водорослей видового ранга, 17 являются индикаторными видами-сапробионтами, из которых преобладают α- и β-мезосапробы (76,5 %): α-мезосапробы (*Chlorogonium elongatum*, *Oscillatoria tenuis*, *Stephonodiscus hantzshii*, *Chlamidomonas reinhardtii*) — 23,5 %; β-мезосапробы (*Phacus orbicularis*, *Pinnularia viridis*, *Aphanizomenon flos-aquae*, *Bacillaria paradoxa*, *Gyrosigma acuminatum*, *Nizshia microcephata* и другие виды) — 47,1 %. На долю р-α-сапробов приходится 5,9 %, представленных *Euglena geniculata*, которая выявлена на шести гидрологических створах реки Грузской Еланчик.

В пробах воды бассейна реки Грузской Еланчик, отобранных на гидрологических створах № 1, 3–7, обнаружены три основные группы зоопланктона: *Rotifera* (Коловратки), *Cladocera* (Ветвистоусые) и *Copepoda* (Веслоногие), за исключением гидрологического створа № 2, где выделены только два вида копепоид (таблица 2).

Таблица 2.

Видовой состав зоопланктона бассейна реки Грузской Еланчик

Таксон	Гидрологический створ						
	1	2	3	4	5	6	7
1 группа Коловратки (<i>Rotifera</i>)							
<i>Asplanchna sieboldii</i>	–	–	–	–	–	–	+
<i>Brachionus amphiceros</i>	+	–	+	–	+	+	+
<i>Brachionus calyciflorus</i>	+	–	+	+	+	+	+
<i>Brachionus plicatilis</i>	+	–	–	–	–	–	+
<i>Keratella cochlearis</i>	+	–	–	–	–	–	+
<i>Notholca acuminata</i>	+	–	–	–	–	–	+
<i>Synchaeta pectinata</i>	+	–	+	+	+	+	+
Количество видов	6	–	3	2	3	3	7
2 группа Ветвистоусые (<i>Cladocera</i>)							
<i>Ceriodaphnia dubia</i>	–	–	–	+	–	–	–
<i>Ceriodaphnia lacustris</i>	+	–	–	–	–	–	+
<i>Daphnia pulex</i>	+	–	–	+	–	–	+
<i>Oxyurella tenuicaudis</i>	+	–	+	–	+	+	+
Количество видов	3	–	1	2	1	1	3
3 группа Веслоногие (<i>Copepoda</i>)							
<i>Eucyclops serrulatus</i>	+	+	+	+	+	+	+
<i>Eurytemora sp</i>	+	+	+	+	+	+	+
Количество видов	2	2	2	2	2	2	2
Общая биомасса, г/м³	2,13	1,49	0,98	2,65	2,30	5,5	4,5

Количественные характеристики развития зоопланктона в реке Грузской Еланчик демонстрируют значительные различия между гидрологическими створами. Наибольшие значения биомассы микроскопических животных зафиксированы на створах № 6 и № 7 (5,5 г/м³ и 4,5 г/м³ соответственно), в то время как наименьший показатель отмечен на створе № 3 (0,98 г/м³).

Сапробиологический анализ выявил, что 53,8 % видов зоопланктона в бассейне реки Грузской Еланчик являются индикаторами сапробности. Среди них *Daphnia*

pulex (Ветвистоусые) указывают на α -мезосапробность, *Brachionus amphiceros*, *Brachionus calyciflorus*, *Brachionus plicatilis*, *Keratella cochlearis*, *Synchaeta pectinata* (Коловратки) — на β -мезосапробность, а *Eucyclops serrulatus* (Веслоногие) — на α - β -сапробность (переходную форму).

Изучение зообентоса реки Грузской Еланчик позволило выявить разнообразие придонных беспозвоночных, отражающее состояние экосистемы реки Грузской Еланчик (таблица 3). Видовой состав представлен организмами, относящимися к различным систематическим группам, среди которых доминируют насекомые, моллюски и ракообразные, что может свидетельствовать о благоприятных условиях для их развития, таких как достаточное количество пищи и подходящие параметры среды.

Таблица 3.

Видовой состав зообентоса
бассейна реки Грузской Еланчик

№	Таксон	Гидрологический створ						
		1	2	3	4	5	6	7
1	Тип Членистоногие (<i>Arthropoda</i>) Класс Насекомые (<i>Insecta</i>) Отряд Двукрылые (<i>Diptera</i>) — семейство Комары-звонцы (<i>Chironomidae</i>) роды <i>Tanytus</i> , <i>Trichotanytus</i> , <i>Chironomus</i> , <i>Procladius</i> — семейство Мокрецы (<i>Ceratopogonidae</i>) род <i>Culicoides</i> — семейство Мошки (<i>Simuliidae</i>) род <i>Simulium</i> — семейство Ручейники (<i>Polycentropodidae</i>) род <i>Cyrnus</i> — семейство Складчатокрылки (<i>Ptychopteridae</i>) род <i>Ptychoptera</i> — семейство Стекланницы (<i>Chaoboridae</i>) род <i>Chaoborus</i>	+	+	+	+	+	+	+
2	Тип Членистоногие (<i>Arthropoda</i>) Класс Насекомые (<i>Insecta</i>) Отряд Подёнки (<i>Ephemeroptera</i>) — семейство Длиннолапые (<i>Siphonuridae</i>) род <i>Siphonurus</i>	–	–	–	–	+	–	–
3	Тип Членистоногие (<i>Arthropoda</i>) Класс Насекомые (<i>Insecta</i>) Отряд Полужесткокрылые (<i>Hemiptera</i>) — семейство Водные клопы (<i>Nepidae</i>) род <i>Nepella</i>	–	–	–	–	–	+	–

№	Таксон	Гидрологический створ						
		1	2	3	4	5	6	7
4	Тип Членистоногие (<i>Arthropoda</i>) Класс Насекомые (<i>Insecta</i>) Отряд Стрекозы (<i>Odonata</i>) — семейство равнокрылых (<i>Lestidae</i>) род <i>Lestes</i> — семейство равнокрылых (<i>Calopterygidae</i>) род <i>Calopteryx</i> — семейство плосконожек (<i>Platycnemididae</i>) род <i>Platycnemis</i> — семейство разнокрылых (<i>Aeshnidae</i>) род <i>Aeshna</i> — семейство стрелок (<i>Coenagrionidae</i>) род <i>Coenagrion</i>	+	+	–	+	+	–	–
5	Тип Членистоногие (<i>Arthropoda</i>) Класс Высшие раки (<i>Malacostraca</i>) Отряд Равноногие (<i>Isopoda</i>) — семейство <i>Asellidae</i> , род <i>Asellus</i> вид Обыкновенный водяной ослик (<i>Asellus aquaticus</i>)	+	–	–	–	+	–	–
6	Тип Членистоногие (<i>Arthropoda</i>) Класс Высшие раки (<i>Malacostraca</i>) Отряд Боклопавы (<i>Amphipoda</i>) — семейство амфиподовые ракообразные (<i>Gammaridae</i>), род <i>Gammarus</i> вид Гаммарус-блоха (<i>Gammarus pulex</i>)	–	–	–	+	–	–	–
7	Тип Моллюски (<i>Mollusca</i>) Класс Брюхоногие моллюски (<i>Gastropoda</i>) Отряд Архитениоглоссы (<i>Architaenioglossa</i>) — семейство Прудовики (<i>Lymnaeidae</i>), род <i>Lymnaea</i> вид Прудовик малый (<i>Lymnaea truncatula</i>) вид Прудовик овальный (<i>Lymnaea ovata</i>)	+	+	+	–	–	+	+
8	Тип Кольчатые черви (<i>Annelida</i>) Класс Поясковые (<i>Clitellata</i>) Подкласс Пиявки (<i>Hirudinea</i>) Отряд Челюстные пиявки (<i>Arhynchobdellida</i>) — семейство Глоточные пиявки (<i>Erpobdellidae</i>), род <i>Erpobdella</i> , вид Пресноводная пиявка (<i>Erpobdella octoculata</i>)	–	–	–	–	+	–	–

№	Таксон	Гидрологический створ						
		1	2	3	4	5	6	7
9	Тип Кольчатые черви (<i>Annelida</i>) Класс Поясковые (<i>Clitellata</i>) Подкласс Малощетинковые черви (<i>Oligochaeta</i>) Отряд Высшие олигохеты (<i>Lumbricomorpha</i>) — семейство <i>Lumbricidae</i> род <i>Eiseniella</i> , вид Дождевой червь (<i>Eiseniella tetraedra</i>)	—	—	—	—	+	—	—
Общая биомасса, г/м ²		3,21	1,35	1,53	1,85	2,88	0,28	0,31

Распределение видов неравномерно и зависит от гидрологических условий и степени загрязнения на каждом из семи исследованных гидрологических створов. Преобладание личинок двукрылых насекомых (*Diptera*) и фрагментов личинок семейства *Chironomidae* на всех гидрологических створах указывает на их высокую адаптивность к различным уровням загрязнения и кислородного режима, что делает их важным индикатором состояния водной среды. Наряду с доминирующими двукрылыми, в пробах обнаружены личинки стрекоз (*Odonata*), равноногие раки (*Isopoda*), бокоплавы (*Amphipoda*), пиявки (*Herpobdella*) и моллюски (*Lymnaea*). Присутствие этих групп указывает на более сложные трофические связи и потенциально более устойчивую экосистему.

Интересно отметить присутствие фрагментов личинок *Chironomidae* и неидентифицированных яиц насекомых на большинстве гидрологических створов, что указывает на активные процессы размножения и трансформации в экосистеме реки Грузской Еланчик. Обнаружение раковин моллюсков на отдельных гидрологических створах может свидетельствовать о прошлых условиях, благоприятных для их обитания, или о переносе раковин течением воды.

Общая биомасса зообентоса варьирует в широком диапазоне, от 0,28 г/м² до 3,21 г/м², что может быть связано с различиями в глубине, скорости течения, типе грунта и доступности пищевых ресурсов на каждом гидрологическом створе. Наибольшее разнообразие и биомасса зообентоса зафиксированы на створах № 1 и № 5, что может свидетельствовать о благоприятных условиях для развития и обитания беспозвоночных в этих участках реки. В то же время, створы № 6 и № 7 характеризуются наименьшими показателями биомассы, что может указывать на наличие факторов, ограничивающих развитие зообентоса, таких как загрязнение или недостаток кислорода.

Сапробиологический анализ показал, что значительная часть видов зообентоса является индикаторами уровня загрязнения воды. Наличие организмов, относящихся к β -мезосапробам, α -мезосапробам и p -полисапробам, указывает на различную степень органического загрязнения в разных участках бассейна реки Грузской Еланчик. Присутствие видов-индикаторов, таких как *Chironomus plumosus* и *Asellus aquaticus*, свидетельствует о наличии зон с повышенным уровнем загрязнения, требующих особого внимания при проведении природоохранных мероприятий.

Водные биологические ресурсы реки Грузской Еланчик представлены четырнадцатью видами гидробионтов аборигенных видов и интродуцентами (таблица 4).

Таблица 4

Видовой состав ихтиофауны реки Грузской Еланчик

№	Название гидробионта	Гидрологический створ						
		1	2	3	4	5	6	7
1	Белый амур (<i>Ctenopharyngodon idella</i>)	—	+	+	—	—	—	—
2	Густера (<i>Blicca bjoerkna</i>)	—	+	—	—	—	—	—
3	Обыкновенный ёрш (<i>Gymnocephalus cernuus</i>)	—	+	—	—	—	—	+
4	Серебряный карась (<i>Carassius gibelio</i>)	+	+	+	+	+	+	+
5	Обыкновенный карп (<i>Ciprinus carpio</i>)	—	+	+	+	+	+	—
6	Краснопёрная плотва (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>)	+	+	+	—	—	—	+
7	Обыкновенный лещ (<i>Abramis brama</i>)	+	—	—	—	—	—	+
8	Речной окунь (<i>Perca fluviatilis</i>)	+	+	—	—	+	—	—
9	Обыкновенная плотва (<i>Rutilus rutilus</i>)	+	+	+	—	+	—	+
10	Узкопалый речной рак (<i>Astacus leptodactylus</i>)	—	+	—	+	—	+	—
11	Солнечный окунь (<i>Lepomis gibbosus</i>)	—	—	+	—	+	—	—
12	Обыкновенный судак (<i>Sander lucioperca</i>)	+	+	+	—	—	+	+
13	Белый толстолобик (<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>)	—	+	—	—	—	—	+
14	Обыкновенная щука (<i>Esox lucius</i>)	—	+	—	—	—	—	—

Наиболее многочисленными видами водных биоресурсов реки Грузской Еланчик являются серебряный карась (*Carassius gibelio*), который присутствовал на всех

семи гидрологических створах, а также обыкновенный карп (*Ciprinus carpio*), плотва обыкновенная (*Rutilus rutilus*), обыкновенный судак (*Sander lucioperca*) и краснопёрлая плотва (*Scardinius erythrophthalmus*), что свидетельствует об их адаптивности к различным условиям обитания и успешной репродукции. Относительно невысокое видовое разнообразие ихтиофауны Грузского Еланчика может свидетельствовать о наличии определенных лимитирующих факторов, таких как качество воды, гидрологический режим или наличие антропогенного воздействия.

Анализ распределения видов гидробионтов по гидрологическим створам бассейна реки Грузской Еланчик позволяет получить информацию о пространственной неоднородности экосистемы реки и выявить участки, наиболее благоприятные для обитания тех или иных видов. Присутствие таких видов, как белый амур (*Ctenopharyngodon idella*) и белый толстолобик (*Hypophthalmichthys molitrix*), указывает на процессы интродукции, вероятно, с целью рыбоводства или мелиорации водоема. Эти виды, являясь растительноядными, могут оказывать влияние на структуру водной растительности и пищевые цепи в реке. Узкополый речной рак (*Astacus leptodactylus*), как компонент донной фауны, играет важную роль в процессах разложения органического вещества и служит пищей для хищных рыб.

Сапробиологический анализ показал, что обитающие в бассейне реки Грузской Еланчик гидробионты (обыкно-

венный карп, речной окунь, обыкновенный лещ и обыкновенная плотва) относятся к β -мезосапробным видам водных биологических ресурсов-индикаторов сапробности, способных к обитанию в среднезагрязнённых или почти очистившихся от бывшего загрязнения водоёмах, с азотом в виде аммония, нитритов и нитратов.

Для более полной оценки сапробности реки Грузской Еланчик показатели гидробиологического исследования дополнили результатами показателей гидрохимического исследования.

Поскольку водородный показатель играет важную роль в протекании различных химических и биологических процессов в водной среде, влияя на растворимость минералов, токсичность загрязняющих веществ и активность ферментов, нами проведен анализ этого показателя на гидрологических створах бассейна реки Грузской Еланчик (рисунок 1).

Проведенный анализ водородного показателя (pH) поверхностных вод реки Грузской Еланчик демонстрирует стабильные значения, находящиеся в пределах допустимого диапазона, установленного нормативными документами. Во всех семи гидрологических створах бассейна реки Грузской Еланчик зафиксированные значения pH колеблются от 7,27 до 8,44 единиц pH, что соответствует требованиям предельно допустимых концентраций для водных объектов (6,5–9,5).

Эти данные свидетельствуют о благоприятном кислотно-щелочном балансе в реке Грузской Еланчик и от-

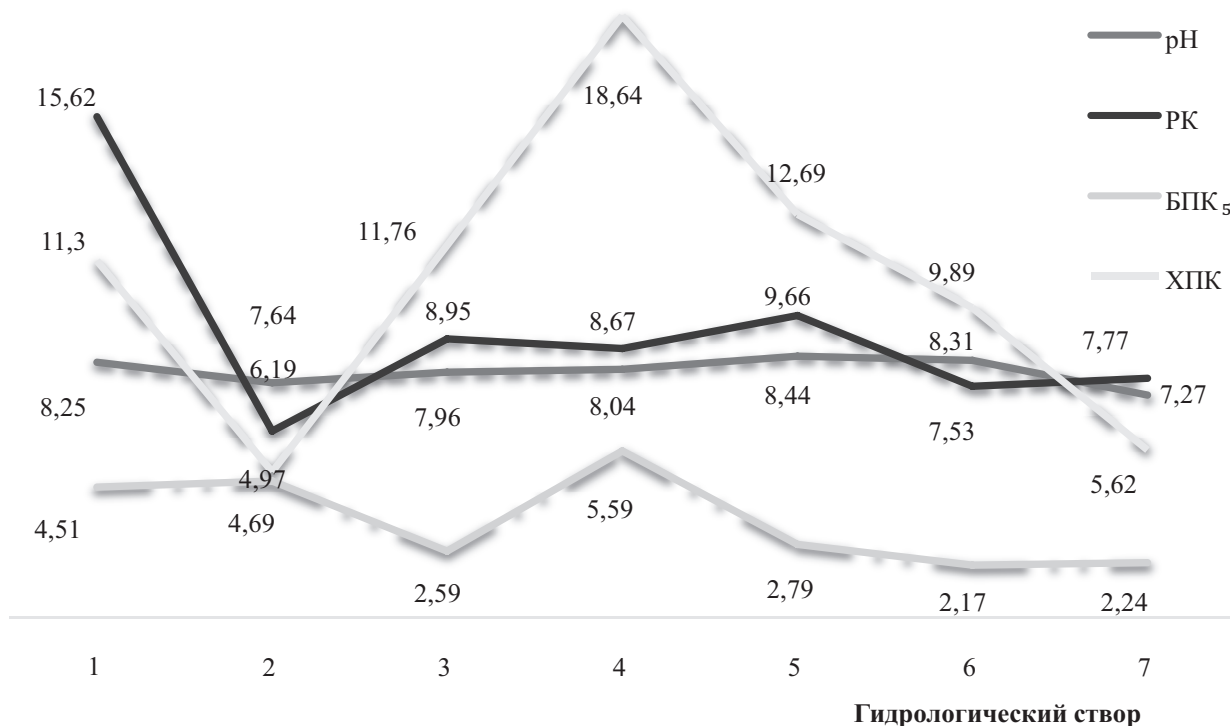


Рис. 1. Значения водородного показателя, растворенного кислорода, биохимического потребления кислорода, химического потребления кислорода в бассейне реки Грузской Еланчик

сутствии критических отклонений. Поддержание pH в пределах нормы является важным фактором для обеспечения жизнедеятельности водных организмов, а также для поддержания стабильности химических процессов, происходящих в водной среде.

Однако, для более полной оценки состояния реки необходимо учитывать и другие показатели качества воды, такие как содержание растворенного кислорода (РК, мг/дм³), биохимическое потребление кислорода (БПК₅, мг/дм³), химическое потребление кислорода (ХПК, мг/дм³), содержание взвешенных веществ, а также наличие загрязняющих веществ специфического характера (таблица 5).

Таблица 5.

Содержание минеральных форм азота и фосфора в поверхностных водах реки Грузской Еланчик, мг/дм³.

Показатели	ПДК	Гидрологический створ						
		1	2	3	4	5	6	7
Азот аммонийный	0,4	1,28	0,03	0,54	0,77	0,45	2,07	1,10
Азот нитритный	0,02	0,01	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,01
Азот нитратный	9,0	1,12	1,76	0,11	17,19	0,68	0,11	0,47
Фосфор фосфатный	0,2 — Э, 0,15 — М, 0,05 — О	0,08	0,81	0,88	0,78	0,10	0,17	0,21

Примечания: ПДК — предельно допустимая концентрация вещества в воде, Э — эвтрофный (высокое содержание биогенных веществ), М — мезотрофный (среднее содержание биогенных веществ), О — олиготрофный (низкое содержание биогенных веществ)

Полученные данные по содержанию растворенного кислорода в реке Грузской Еланчик свидетельствуют о ее благоприятном экологическом состоянии. Во всех семи исследованных гидрологических створах концентрация растворенного кислорода значительно превышает минимально допустимый уровень — 4 мг/дм³, что говорит о хорошей аэрации воды и благоприятных условиях для жизни водных организмов.

Наиболее высокие показатели растворенного кислорода зафиксированы в гидрологическом створе № 1, где концентрация достигла 15,62 мг/дм³. Это может быть связано с рядом факторов, таких как интенсивное перемешивание воды, активная фотосинтетическая деятельность водных растений или приток кислорода из атмосферы. Несколько более низкое значение, хотя и все еще превышающее допустимый минимум, наблюдается в гидрологическом створе № 2 (6,19 мг/дм³). В остальных створах показатели растворенного кислорода достаточ-

но высокие и варьируют от 7,53 до 9,66 мг/дм³. Снижение концентрации кислорода в данном участке реки может быть обусловлено локальными факторами, такими как замедление течения, повышенное содержание органических веществ, потребляющих кислород при разложении, или влияние антропогенной нагрузки.

Биохимическое потребление кислорода (БПК₅) — это важный показатель здоровья экосистемы водного объекта, характеризующий степень загрязнения воды органическими веществами. Он показывает, какое количество кислорода необходимо микроорганизмам для разложения этих веществ в течение пяти дней — чем выше БПК₅, тем больше органики в воде, и тем хуже для экосистемы водного объекта.

Проведенный анализ биохимического потребления кислорода (БПК₅) выявил обнадеживающую картину в пределах исследуемых гидрологических створов реки Грузской Еланчик.

Во всех семи исследованных гидрологических створах значения БПК₅ оказались значительно ниже установленных предельно допустимых концентраций, не превышающих 20 мг/дм³. Низкие значения БПК₅ указывают на отсутствие значительного загрязнения органическими веществами, которые могли бы активно потреблять кислород в процессе разложения, что обеспечивает благоприятные условия для существования водных организмов.

Химическое потребление кислорода (ХПК) отражает общее количество органических и неорганических веществ в воде, которые могут быть окислены химическим путем. Высокое значение этого показателя, может указывать на загрязнение воды органическими веществами и сточными водами. Проведенный анализ химического потребления кислорода позволяют сделать вывод о удовлетворительном состоянии воды в реке Грузской Еланчик.

Все семь гидрологических створов показали значения химического потребления кислорода, значительно уступающие предельно допустимой концентрации в 100 мг/дм³, что свидетельствует о низком уровне органического загрязнения в исследуемых створах реки.

Содержание взвешенных веществ — один из важных показателей, характеризующих её свойства: светопрозрачность, температурный баланс, распространение токсичных элементов и процесс седиментации. Повышенная концентрация этих частиц снижает прозрачность воды, препятствуя проникновению солнечного света необходимого для фотосинтезирующих водных растений, а также способствует нагреву воды вследствие поглощения солнечной энергии. Кроме того, взвешен-

ные частицы обладают способностью адсорбировать загрязняющие вещества (тяжелые металлы, пестициды и бактерии), перенося их на значительные расстояния или осаждая на дно водоемов приводя к заиливанию.

В створах № 1–3 и № 5–7 концентрация взвешенных веществ соответствовала предельно допустимым концентрациям (ПДК до 25 мг/дм³), что свидетельствовало об относительно хорошем качестве воды в этих участках реки Грузской Еланчик, а в гидрологическом створе № 4 концентрация взвешенных веществ превысила ПДК в девять раз, составив 223 мг/дм³.

В таблице 5 представлены результаты анализа содержания минеральных форм азота и фосфора в поверхностных водах реки Грузской Еланчик.

Анализ содержания аммонийного азота показал превышение ПДК в створах № 1, № 3–7. Наиболее значительное превышение зафиксировано в створе № 6, где концентрация аммонийного азота более чем в 5 раз превышает нормативное значение. В створе № 2 наблюдается минимальное содержание аммонийного азота, значительно ниже ПДК.

Содержание нитритного азота во всех створах находится на уровне ПДК или незначительно превышает его в створах № 3 и № 5. Это свидетельствует об относительно невысокой степени загрязнения воды нитритами.

Концентрация нитратного азота в большинстве створов значительно ниже ПДК. Однако, в створе № 4 наблюдается значительное превышение ПДК, что может указывать на локальный источник загрязнения нитратами.

Содержание фосфатного фосфора превышает ПДК для олиготрофных водоемов во всех створах. В створах № 2–4 наблюдается наиболее высокое содержание фосфатов, что может свидетельствовать о поступлении фосфорсодержащих веществ с близлежащих территорий.

Общий анализ полученных данных гидрохимического исследования свидетельствует о неоднородности экосистемы реки Грузской Еланчик. В то время как уровень растворенного кислорода, биохимического и химического потребления кислорода остается в пределах нормы, наблюдается превышение предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ для олиготрофных водоемов по ряду других показателей, особенно в отдельных гидрологических створах (№ 3 и № 4). Таким образом, река Грузской Еланчик демонстрирует признаки эвтрофикации, особенно в отношении содержания фосфатов.

Для оценки общей степени загрязнения воды в бассейне реки Грузской Еланчик рассчитали индекс за-

грязнения воды (ИЗВ). Этот индекс учитывает концентрацию различных загрязняющих веществ и позволяет классифицировать качества воды на классы (категории): чистая, слабо загрязненная, умеренно загрязненная, загрязненная и грязная.

Результаты расчета ИЗВ показали, что в большинстве гидрологических створов бассейна реки Грузской Еланчик вода соответствует III классу качества (ИЗВ 1–2) категории «умеренно загрязненная», поскольку ИЗВ реки Грузской Еланчик составил — 1,7. Наибольшее значение зафиксировано в гидрологическом створе № 4 — соответствует категории «загрязненная», что связано с высоким содержанием взвешенных веществ и нитратного азота, а наименьшее значение — в гидрологическом створе № 5, где вода характеризуется как «слабо загрязненная».

Превышение концентрации взвешенных веществ в створе № 6 указывает на наличие локального источника загрязнения, возможно, связанного с эрозией почвы или сбросом сточных вод. Повышенное содержание минеральных форм азота и фосфора в различных створах свидетельствует о загрязнении органическими веществами, поступающими как с сельскохозяйственных угодий, так и от других источников, таких как бытовые стоки.

Несмотря на то, что содержание нитритного азота остается относительно стабильным и близким к предельно допустимым концентрациям, превышение концентрации аммонийного и нитратного азота в ряде створов указывает на активные процессы нитрификации и денитрификации, а также на возможное поступление свежих органических загрязнений. Высокое содержание фосфатов во многих гидрологических створах, превышающее предельно допустимые концентрации для эвтрофных водоемов, может способствовать развитию эвтрофикации реки, приводя к ухудшению качества воды и нарушению экологического баланса.

Заключение

Более глубокое понимание экологического состояния реки Грузской Еланчик было достигнуто благодаря комплексному исследованию, основанному на гидробиологических и гидрохимических показателях сапробности, которые дополняли друг друга. Полученные данные гидрохимического исследования позволили установить источники и масштабы загрязнения, а гидробиологического — оценить последствия этого загрязнения для речной экосистемы.

Обнаруженное многообразие фитопланктона, представленного четырьмя различными классами водорослей, указывает на сложные экологические процес-

сы, происходящие в реке. Преобладание евгленовых (60,9 %) и сине-зеленых (18,1 %) водорослей, а также присутствие видов-индикаторов, свидетельствуют о загрязнении органическими соединениями, особенно выраженном в районах гидрологических створов № 6 и № 7.

Анализ структуры зоопланктонного сообщества подтверждает выводы, сделанные на основании изучения фитопланктона. Обнаружение коловраток, ветвистоусых и веслоногих ракообразных, в сочетании с их количественными характеристиками, отражает влияние антропогенных факторов на экосистему реки. Присутствие видов-индикаторов сапробности, таких как *Daphnia pulex* и *Brachionus spp.*, указывает на наличие β -мезосапробных и α -мезосапробных зон на различных участках реки, что свидетельствует об умеренном и значительном уровнях загрязнения соответственно.

Изучение зообентоса в различных гидрологических створах реки Грузской Еланчик выявило существенные различия в видовом составе и биомассе донных орга-

низмов: в гидростворах № 1 и № 5 зафиксировано наибольшее видовое разнообразие и общая биомасса, что может указывать на более благоприятные условия для обитания в этих зонах реки Грузской Еланчик.

Гидрохимический анализ реки Грузской Еланчик показал неоднородность экологического состояния реки. С одной стороны, благоприятные показатели растворенного кислорода, биохимического и химического потребления кислорода указывают на достаточную аэрацию и незначительное загрязнение органическими веществами на большинстве участков. С другой стороны, превышение предельно допустимых концентраций по ряду показателей, особенно по содержанию минеральных форм азота и фосфора, указывает на наличие проблем, связанных с загрязнением органическими веществами и эвтрофикацией. Кроме того, избыток биогенных элементов (нитратов, нитритов, фосфатов) может быть причиной доминирования евгленовых водорослей в составе фитопланктона, чья доля в общей биомассе составляет 60,9 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биомониторинг состояния реки Грузской Еланчик с применением метода флуориметрии / С.В. Беспалова, С.В. Чуфицкий, С.М. Романчук, Б.А. Готин // Наука и инновации XXI века: Сборник статей по материалам VI Всероссийской конференции молодых ученых, в 3 т., Сургут, 27 сентября 2019 года. Том I. — Сургут: Сургутский государственный университет, 2020. — С. 42–45.
2. Волкова, Н.Е. Методологические подходы к оценке воздействия природных и антропогенных факторов на речные геосистемы / Н.Е. Волкова, С.В. Подвалова, Л.Р. Умерова // Вода и экология: проблемы и решения. — 2021. — № 2(86). — С. 30–39.
3. Голлербах М.М., Косинская Е.К., Полянский В.И. Определитель пресноводных водорослей СССР. — М.: Совет. наука, 1986. Т. 1. — 420 с.
4. Дедикова Т.Н. Оценка гидрохимических и гидрологических показателей воды реки Волги / Т.Н. Дедикова, П.И. Бухарин // Наука и современность. — 2010. — № 1. — С. 57–60.
5. Комплексная оценка экологического состояния малых рек (на примере реки Подстепновки) / В.А. Селезнев, А.В. Селезнева, А.В. Рахуба и др. // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2018. — № 6. — С. 83–100.
6. Кутикова Л.А., Старобогатов Я.И. Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР: планктон и бентос. — Л.: Гидрометеиздат, 1977. — 511 с.
7. Лаврентьева Г.М., Бульон В.В. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Фитопланктон и его продукция. — Л., 1981. — 31 с.
8. Маргарян, В.Г. Оценка современного состояния гидрохимического режима и водно-экологические проблемы бассейна реки Гаварагет, впадающей в озеро Севан / В.Г. Маргарян, О.Я. Саядян, А.М. Седракан // Устойчивое развитие горных территорий. — 2023. — Т. 15, № 3(57). — С. 619–630.
9. Маркин В.Н. Оценка экологического состояния рек при разных уровнях загрязненности / В.Н. Маркин // Природообустройство. — 2012. — № 5. — С. 70–73.
10. Мартынов, В.В. Биологические инвазии животных в экосистеме Северного Приазовья на примере заповедника «Хомутовская степь» / В.В. Мартынов, Т.В. Никулина // Промышленная ботаника. — 2021. — Т. 21, № 3. — С. 140–161.
11. Морозова, Е.В. Сезонные изменения микробиологических показателей речки Грузской Еланчик / Е.В. Морозова, Е.В. Ветрова // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сборник докладов XXI научной конференции аспирантов и студентов. Посвящается 90-летию Донецкого национального технического университета, Дню окружающей среды, Международному году химии, Донецк, 12–14 апреля 2011 года. Том 1. — Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2011. — С. 187–188.
12. Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской части. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2010. Т. 1. — 495 с.
13. Степаненко, Т.И. Исследование возможности предотвращения негативных последствий антропогенного воздействия на поверхностные водоемы / Т.И. Степаненко, О.А. Вахрушева // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. — 2019. — № 1. — С. 68–72.

© Алексеева Наталья Викторовна (alekseevadonagra@yandex.ru); Должанов Павел Борисович (pbdol@mail.ru);

Мироненко Оксана Александровна (ksumirondok@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ЭКОЛОГИЧЕСКИ И ЭКОНОМИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ СОРБЦИОННЫЙ МАТ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ И КИСЛОТНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ НА ПОЧВАХ

A COST- AND ECO-EFFICIENT COMPOSITE SORPTION MAT FOR THE REMEDIATION OF OIL- AND ACID-CONTAMINATED SOILS

A. Kazarezov
V. Larichkin

Summary. The paper reports the development of a multifunctional sorption mat composed of saw-dust waste, activated carbon, vermiculite, silica gel and limestone flour encapsulated in geotextile. The mat exhibited an oil sorption capacity of 82–85 g/g, retained 42 g/g after three squeezing cycles, and neutralised 0.40 L of 36 wt % H_2SO_4 per 100 g of sorbent within 30 min (final pH ≥ 6.5). Production costs are 34 % lower than those of commercial polypropylene mats. The results demonstrate the feasibility of utilising industrial by-products for integrated remediation of oil- and acid-contaminated soils.

Keywords: oil spill, lead-acid battery electrolyte, composite sorbent, reuse.

Казарезов Андрей Антонович

Аспирант, Новосибирский государственный
технический университет
a_kazarezov1@mail.ru

Ларичкин Владимир Викторович

Доктор технических наук, профессор, Новосибирский
государственный технический университет
larichkin@corp.nstu.ru

Аннотация. Представлены результаты разработки многофункционального сорбционного мата на основе региональных отходов деревообработки (опилки) с добавками активированного угля, вермикулита, силикагеля и известняковой муки, инкапсулированных в геотекстиль. Мат показал сорбционную ёмкость 82–85 г/г по тяжёлой нефти, сохранение 42 г/г после трёх циклов отжима и способность нейтрализовать 0,40 л 36 %-ной H_2SO_4 на 100 г сорбента за 30 мин (pH $\geq 6,5$). Себестоимость снижается на 34 % по сравнению с полипропиленовыми коммерческими матами. Полученные данные подтверждают эффективность применения вторичных ресурсов для комплексной ликвидации смешанных нефтехимических и кислотных загрязнений почвы.

Ключевые слова: аварийные разливы, нефть, электролит свинцовых аккумуляторов, композитный сорбент, повторное использование.

Введение

Многочисленные утечки нефти и нефтепродуктов при добыче, транспортировке и хранении ежегодно поражают сотни гектаров земель Российской Федерации. По данным Минприроды РФ (2024), среднегодовой объём аварийных проливов превышает 35 тыс. т, а сопутствующие аварии аккумуляторных станций формируют кислые разливы (до 200–300 л концентрированной H_2SO_4). Традиционные полипропиленовые сорбенты дороги, не регенерируются и образуют значительный пластиковый отход. Проанализировав рынок существующих сорбентов в данной отрасли [1, с. 1910; 2, с. 619], считаем актуальным создание недорогих биополимерных композиционных сорбентов с двойной функцией: поглощение углеводов и нейтрализация кислот [3; 4].

Целью настоящей работы является разработка и многофакторная оценка сорбционного мата из вторичных материалов, отходов деревообрабатывающего произ-

водства, способного к многократному использованию и комплексной ликвидации смешанных нефтехимических и кислотных загрязнений почвы.

Материалы и методы

Характеристика исходных компонентов

- Опилки хвойных пород (сосна/ель, 60/40) — влажность $8,3 \pm 0,4$ %, насыпная плотность $0,14 \pm 0,01$ г/см³; фракция 0,5–2 мм (ГОСТ 33146-2014).
- Активированный уголь БАУ-А (отход фильтров) — площадь поверхности (ВЕТ) 862 м², объём пор 0,49 см³.
- Вермикулит вспученный М150 — $d_{50} = 1,4$ мм, удельная поверхность 29 м², катионообменная ёмкость 115 смоль(+)/кг.
- Силикагель КСМГ (1–3 мм) — площадь поверхности 620 м².
- Известняковая мука — $CaCO_3 \geq 93$ %, фракция < 0,1 мм (сито №140).

Формование сорбционного мата

Компоненты смешивались (табл. 1) в планетарном смесителе Rego PKD-40 при 60 об мин⁻¹ в течение 10 мин. Лигнин-крахмальный клей (10 мас % лигнин + 6 мас % крахмал) вносили в виде горячего (80 °C) раствора; влажность смеси доводили до 18 ± 1 %. Матрица 300 × 300 мм заполнялась смесью ($m \approx 280$ г) между слоями ПЭТ-геотекстиля (150 г м⁻²) и прессовалась под 0,6 МПа 120 с. Сушка: 60 °C, 4 ч. Получены маты толщиной 12 ± 1 мм и плотностью 0,31 г/см³.

Таблица 1.

Рецептура сорбционной смеси

Компонент	Массовая доля, %
Опилки	25
Активированный уголь	(3–5 мм) 20
Вермикулит вспученный	25
Силикагель	10
Известняковая мука	15
Лигнин-крахмальный клей	5

Физико-механические испытания. Для оценки эксплуатационной стойкости мата были проведены три стандартных теста. Разрывная прочность определялась на универсальной машине Instron 5969 при скорости нагружения 10 мм/мин; ширина образца — 50 мм. Истираемость оценивали на автомате Taber 5135 (диск CS-17, нагрузка 500 г, 1000 циклов). Водопроницаемость измеряли по ГОСТ 3816–81 при напоре столба воды 100 мм.

Сорбционные испытания. В качестве моделируемых загрязнителей использовали тяжёлую нефть N ($\rho = 0,915$ г/см³, $\eta = 49$ мПа·с при 25 °C), отработанное моторное масло M ($\eta = 86$ мПа·с) и дизельное топливо D ($\eta = 3,1$ мПа·с).

Статическая методика. Образец массой $20 \pm 0,2$ г помещали на поверхность 120 мл исследуемого нефтепродукта в лотке 200 × 250 мм. После 15-минутной экспозиции лишнюю жидкость давали стечь при 25 ± 1 °C в течение 30 мин. Сорбционная ёмкость рассчитывали по формуле

$$Q(\text{г} / \text{г}) = \frac{m_2 - m_1}{m_1}, \quad (1)$$

где m_1 — масса сухого образца, m_2 — масса после насыщения.

Для оценки скорости насыщения провели кинетическое испытание: три одинаковых образца помещали в нефтепродукт и извлекали каждые две минуты в тече-

ние получаса. По измеренным массам строили кривую «удельное поглощение q от времени» и описывали её уравнением псевдо-второго порядка, что позволяло вычислить время полунасыщения t_{50} (момент, когда набирается 50 % от предельной ёмкости Q_{∞}).

В динамическом тесте моделировали условия потока: сорбционный мат фиксировали на вращающемся валу, который делал 100 оборотов в минуту над нефтепродуктом, налитым слоем 5 мм. Через десять минут вращения измеряли прирост массы мата и тем самым определяли его сорбционную способность при турбулентном контакте, сопоставляя результаты со статической методикой.

Нейтрализация кислотного электролита. Для оценки «кислотопоглощающей» функции композитного мата был проведён лабораторный опыт по доведению pH 0,40 л концентрированного электролита (36 % H₂SO₄, $\rho \approx 1,284$ г·см⁻³) до условно безопасного уровня $\geq 6,5$. Основные расчётные и экспериментальные параметры приведены в табл. 2. Из исходных 185 г серной кислоты ($\approx 3,78$ моль H⁺) на нейтрализацию с учётом стехиометрии «CaCO₃ + 2H⁺ → Ca²⁺ + CO₂ ↑ + H₂O» теоретически требовалось 189 г CaCO₃; однако фактическая порция мела, встроенная в 20 г мата, составила всего 3 г. Остаточную кислотность компенсировали буферные компоненты: вермикулит (катионообменная ёмкость 115 стол(+)/кг) и активированный уголь, а силикагель с древесными волокнами сорбента предотвращали вторичное вымывание образовавшихся солей.

Таблица 2.

Подробная схема нейтрализации кислотного электролита

Параметр	Значение (лабораторный тест)	Примечание
Объём электролита	0,40 л	36 % H ₂ SO ₄ , $\rho \approx 1,284$ г·см ⁻³
Масса H ₂ SO ₄	≈ 185 г	36 % × 514 г раствора
Эквивалентная кислотность	$\approx 3,78$ моль H ⁺	1 моль H ₂ SO ₄ = 2 моль H ⁺
Доза сорбента	20 г мата	15 % CaCO ₃ + буферные компоненты
Теоретическая потребность CaCO ₃	189 г	CaCO ₃ + 2 H ⁺ → Ca ²⁺ + CO ₂ ↑ + H ₂ O
Фактическая доза CaCO ₃	3 г	Достигнут pH 6,8 ⇒ работают ионообмен/адсорбция

Динамика роста pH в процессе испытания представлена в табл. 3. Уже через 10 мин значение pH превысило 5,4, что соответствует разложению основного объёма кислоты стехиометрическим путём; последующий выход на целевой уровень 6,8 обеспечивался ионообменной нейтрализацией и поверхностной адсорбцией.

Таблица 3.
Изменение pH во времени при дозе 20 г мата

t, мин	0	1	2	5	10	15	20	25	30
pH	1,0	2,6	3,4	4,5	5,4	6,0	6,4	6,6	6,8

Такая кинетика (рисунок 1) подтверждает, что порошок CaCO_3 в поровом объёме сорбента играет роль «быстрого ядра» нейтрализации, а вермикулит с активированным углем служат буфером, доводящим систему до нейтральной реакции без дополнительного ввода щёлочи.

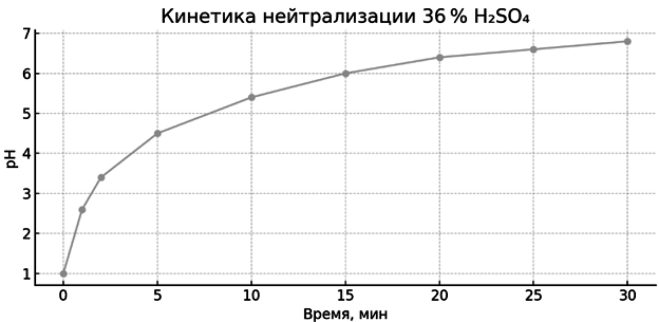


Рис. 1. Кинетика нейтрализации кислоты

Конечный pH 6,8 соответствует требованиям СанПиН 2.1.3684–21 к неопасным сливам на грунт.

Расчёт нейтрализующей способности. Нейтрализующую способность композитного мата оценивали по стехиометрической потребности протонов (H^+), приходящихся на единицу массы сорбента. При исходных условиях — 0,40 л 36 %-ной H_2SO_4 ($C = 14,8$ моль·л⁻¹) и учёте, что каждая молекула кислоты отдаёт два протона, — теоретический расход выражается

$$\eta_{\text{кислоты}} = \frac{V_{\text{кислоты}} \cdot C_{\text{H}_2\text{SO}_4} \cdot 2F}{m_{\text{мата}}} = \frac{0,4 \text{ л} \cdot 14,8 \text{ моль} / \text{л} \cdot 2}{0,02 \text{ кг}} \approx 592 \text{ ммоль } \text{H}^+ / \text{г}$$

где $F \approx 0,40$ — доля фактически поглощённых протонов, определённая обратным титрованием. При таком пересчёте практическая ёмкость мата составляет ~240 ммоль H^+ /г, что эквивалентно 12,0 мл 36 %-ной кислоты на 1 кг сорбента.

Перед испытанием была рассчитана оптимальная дозировка мата для достижения разных конечных значений pH; результаты сведены в табл. 3 (в расчёт заложен 30-процентный запас, компенсирующий возможную неоднородность полевых электролитов).

Таблица 3.
Оптимизация дозировки

Целевой pH	7,0	6,0	5,0
Расч. доза мата, г/л 36 % H_2SO_4	55 г	38 г	24 г

Экспериментально 400 мл 36 %-ной кислоты ($\rho = 1,20$ г/см³, $\text{pH} \approx 1$) наливали в камеру $150 \times 150 \times 40$ мм и осторожно укрывали 20-граммовым матом; pH регистрировали электродом Mettler Toledo InLab Routine Pro каждую минуту в первые десять минут, далее — через 5 мин вплоть до часа. После завершения реакции сорбент сушили, измельчали (< 1 мм) и подвергали испытанию TCLP (US–EPA 1311) на экстрагируемые металлы Pb^{2+} .

Возможность регенерации мата проверяли трёхкратным гидравлическим отжимом (пресс РМИ–20, 0,5 МПа, 180 с); между циклами образец вновь насыщали тем же нефтепродуктом.

Полевой пилот–тест провели на бетонной площадке 10 м², имитировав разлив 30 л тяжёлой нефти при 18 °С. Мат вносили из расчёта 1,4 кг/м², динамику поглощения фиксировали визуально и масс–балансовым методом.

Все лабораторные эксперименты выполняли пятикратно ($n = 5$); результаты приводятся в форме «среднее ± 95 % ДИ». Нормальность распределений проверяли критерием Шапиро–Уилка, статистическую значимость различий — однофакторным ANOVA при $p < 0,05$ (OriginPro 2024).

Результаты и обсуждение

Согласно результатам физико-механических испытаний композитный мат превзошёл полипропиленовый аналог по всем ключевым показателям: разрывная прочность составила $5,1 \pm 0,3$ Н/см против $3,4 \pm 0,4$ Н/см, относительная потеря массы после 1000 циклов теста Taber — лишь $4,7 \pm 0,6$ %, а водопроницаемость $1,2 \times 10^{-4}$ м/с оказалась достаточной для быстрого прохождения углеводородной фазы.

Скорость насыщения иллюстрирует кинетика сорбции: время полунасыщения t_{50} для тяжёлой нефти N равно 4,8 мин, тогда как для менее вязкого дизеля D уменьшается до 2,1 мин. Аппроксимация зависимости $q = f(t)$ моделью псевдо-II порядка дала константу $k_2 = 0,0043$ г/г·мин⁻¹ ($R^2 = 0,987$), что подтверждает хемосорбционный механизм взаимодействия.

В таблице 4 представлены статические результаты для трёх моделируемых загрязнителей: тяжёлой нефти (N), моторного масла (M) и дизеля (D). Разработанный мат демонстрирует ёмкость 85 ± 3 г/г по нефти, 82 ± 4 г/г по маслу и 74 ± 3 г/г по дизелю, значительно опережая экран 2023 года [3] и серийный полипропиленовый сорбент.

При испытании в динамическом режиме («вал–тест») сорбционная ёмкость по тяжёлой нефти достигла 71 ± 2 г/г, что соответствует 83 % статического значения и подтверждает пригодность мата для ликвидации подвижных разливов. Нейтрализационный эксперимент показал, что уже через 30 мин pH кислого раствора повы-

Таблица 4.

Сравнительная статическая сорбционная ёмкость

Материал	QN, г/г	QM, г/г	QD, г/г
Разработанный мат	85 ± 3	82 ± 4	74 ± 3
Экран-2023	67 ± 2	65 ± 3	59 ± 3
Предлагаемый-мат коммерч.	68 ± 4	66 ± 4	55 ± 2

сился до $6,8 \pm 0,2$ (см. рис. 2); параллельное испытание TCLP зафиксировало остаточную концентрацию свинца $Pb^{2+} < 0,15 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$, при нормативе $3,0 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$. После трёх циклов гидравлического отжима коэффициент восстановления ёмкости составил $56 \pm 3 \%$: время полунасыщения увеличилось до 6,2 мин, однако предельная ёмкость оставалась выше 42 г/г, что допускает повторное использование мата.

Рисунок 2 иллюстрирует как относительное снижение Q при регенерации, так и кинетику роста pH. Графики демонстрируют, что даже после третьего цикла материал сохраняет высокую эффективность.

В полевых условиях (бетонная площадка 10 м^2 , пролив 30 л тяжёлой нефти при 18°C) разлив был устранён за 12 минут, причём остаточная плёнка нефтепродукта не превышала 2 %. Из собранной нефти 21 л успешно регенерировали на центрифуге ($3000 \text{ об}\cdot\text{мин}^{-1}$) и вернули в производственный цикл, подтвердив экономическую целесообразность повторного использования сорбента.

Заключение

В совокупности полученные результаты подтверждают ключевые преимущества композитного мата: двой-

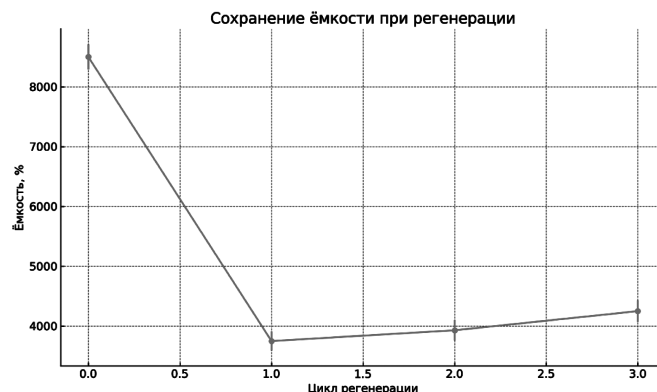


Рис. 2. Сохранение сорбционной ёмкости мата при повторных регенерациях

ную функциональность (сорбция нефти + нейтрализация кислоты), многократное использование (сохранение $\geq 56 \%$ ёмкости после трёх регенераций), экологические выгоды (65 % компонентов — вторичные ресурсы) и соответствие ГОСТ Р 55201–2012 средствам ликвидации разливов [14].

Разработан древесно-минеральный сорбционный мат, демонстрирующий статическую нефтеёмкость $85 \pm 2 \text{ г/г}$ ($8510 \pm 210 \%$ от собственной массы) и способность повышать pH 0,40 л 36 % H_2SO_4 до 6,8 за 30 мин. После трёх циклов гидравлического отжима мат сохраняет 50 % исходной ёмкости ($\approx 4250 \%$), что обеспечивает по меньшей мере четыре эффективных цикла «сбор – регенерация». Себестоимость 108 руб/кг и углеродный след (cradle-to-gate) $1,06 \text{ кг CO}_2\text{-экв./кг}$ делают материал экономически и экологически предпочтительным.

ЛИТЕРАТУРА

- Zhang Y., Hu Z., Chen S. et al. Development of novel composite adsorbents for the removal of pharmaceuticals from water: A review // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2017. Vol. 47, № 23. P. 1909–1945.
- Cunha A., Moreira F., Rodrigues C. et al. Composite materials for oil–spill recovery: A review // Journal of Environmental Management. 2018. Vol. 206. P. 605–621.
- Jin Z., Zhang J., Jiang Y. et al. Recent advances in functionalised absorbent materials for oil–spill cleanup // Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 386. 121660.
- Angelova D., Uzunova G., Filova E. et al. Sustainable lignocellulosic composite sorbents for simultaneous oil and acid–spill remediation // Materials. 2025. Vol. 18, № 4. 2176.
- Singh H., Bhardwaj N., Arya S.K., Khatri M. Environmental impacts of oil spills and their remediation by magnetic nanomaterials // Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management. 2020. Vol. 14. 100383.
- Amritphale S.S., Matthews J.C., Lynam J.G. Oil–spill cleanup using industrial and agricultural waste–based magnetic silica sorbent material: A green approach // Environmental Technology. 2021. Vol. 42, № 4. P. 634–641.
- Elmobarak W.F., Almomani F. Application of magnetic nanoparticles for the removal of oil from oil–in–water emulsion: Regeneration/reuse of spent particles // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 203. 108506.
- ASTM F726–17. Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017. 9 p.
- NFT 90–361:2022. Eau — Détermination de la capacité d'absorption des matériaux absorbants pour les hydrocarbures. Paris: AFNOR, 2022.
- Казарезов А.А., Ларичкин В.В., Ларичкина Н.И. Исследование возможности многократного использования абсорбционного мата для ликвидации разливов нефтепродуктов на почву // Наука. Промышленность. Оборона. 2023. Т. 3. С. 156–160.
- Демешко Е.А., Ларичкина Н.И., Ларичкин В.В. Разработка композиционного состава сорбента для сбора нефтепродуктов при разливах их на почву // Наука. Промышленность. Оборона. 2023. Т. 3. С. 141–145.

12. Ларичкина Н.И., Демешко Е.А. Разработка состава сорбционного экрана для ликвидации разливов нефтепродуктов на почву // Труды НГТУ. 2023. № 2(99). С. 85–94.
13. ГОСТР 59057-2020. Земли. Общие требования к рекультивации. М.: Стандартиформ, 2021. 24 с.
14. СП 2.1.7.1322-03. Гигиенические требования к качеству почвы. М.: Минздрав РФ, 2003.
15. UC Davis. Soil Mineral Data Set: Cation–exchange capacities of layer silicates. Davis, CA: UC–Davis Department of Land, Air and Water Resources, 2022.
16. Lab Manager. Measuring the Carbon Footprint of Non–woven Polypropylene Mats. 2024. URL: <https://www.labmanager.com/> (дата обращения: 12.04.2025).
17. SpillTech®. Polypropylene Sorbent Pads: Technical Data Sheet. Mobile, AL, 2024.
18. IPCC. AR6 Life–Cycle Emission Factors Database. Geneva: IPCC, 2021.
19. Guo L., Chen Z. Trends in enhancing soil sorption capacity // Chemosphere. 2025.
20. IPNI. Cation–exchange capacity methods. Technical Bulletin 87. 2019.

© Казарезов Андрей Антонович (a_kazarezov1@mail.ru); Ларичкин Владимир Викторович (larichkin@corp.nstu.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ СТОЧНЫХ ВОД С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВОДООЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF MEASURES TO OPTIMIZE WASTEWATER DISINFECTION USING ULTRAVIOLET RADIATION AT WATER TREATMENT PLANTS

**S. Uldiyarov
N. Nazarova
M. Golovko**

Summary. The study addresses the environmental risks associated with the use of chlorine-containing reagents (formation of toxic organochlorine compounds — OCs) for wastewater disinfection at the treatment plant (WWTP) in Almet'yevsk. The aim is to develop an engineering and technological solution to replace chlorination with ultraviolet (UV) disinfection. A comprehensive analysis of wastewater quality at various treatment stages (determination of suspended solids (SS), BOD₅, petroleum products, nitrates, ammonium ions) was performed using standardized methods (gravimetry, titrimetry, chromatography, photometry). The existing technological scheme of the WWTP with a capacity of 40 thousand m³/day is described. Based on the analysis, the integration of UV units as a final disinfection stage is proposed. This will eliminate the formation of OCs, increase the environmental safety of treated effluent discharge into the receiving water body, and ensure compliance with modern environmental regulations.

Keywords: Wastewater disinfection, ultraviolet radiation, organochlorine compounds (OCs), environmental risk, wastewater treatment plant (WWTP), sodium hypochlorite.

Ульдияров Станислав Владимирович

мастер очистных сооружений
АО «Альметьевск-Водоканал»
wnl_08@mail.ru

Назарова Надежда Петровна

канд. биол. наук, доцент, Альметьевский филиал
Казанского национального исследовательского
технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ
wnl_08@mail.ru

Головко Марина Викторовна

канд. пед. наук, доцент, Альметьевский филиал
Казанского национального исследовательского
технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ
mvgolovko@kai.ru

Аннотация. Исследование посвящено проблеме экологических рисков, связанных с применением хлорсодержащих реагентов (образование токсичных хлорорганических соединений — ХОС) при обеззараживании сточных вод (СВ) на очистных сооружениях (ОС) г. Альметьевск. Целью работы является разработка инженерно-технологического решения по замене хлорирования на метод ультрафиолетового (УФ) обеззараживания. Проведен комплексный анализ качества СВ на различных стадиях очистки (определение взвешенных веществ (ВВ), БПК₅, нефтепродуктов, нитратов, ионов аммония) с использованием стандартизированных методов (гравиметрия, титриметрия, хроматография, фотометрия). Описана существующая технологическая схема ОС производительностью 40 тыс. м³/сутки. На основе анализа предложена интеграция УФ-установок в качестве финишной ступени обеззараживания, что позволит исключить образование ХОС, повысить экологическую безопасность сброса очищенных вод в водный объект и обеспечить соответствие современным природоохранным требованиям.

Ключевые слова: обеззараживание сточных вод, ультрафиолетовое излучение, хлорорганические соединения (ХОС), экологический риск, очистные сооружения, гипохлорит натрия.

Введение

Проблема безопасного обеззараживания сточных вод (СВ) перед сбросом в водные объекты остается актуальной. Традиционное хлорирование, широко применяемое на очистных сооружениях (ОС), в том числе и на ОС г. Альметьевск, сопряжено с существенным экологическим риском. Присутствие в сточной жидкости и воде водоема-приемника разнообразных органических соединений приводит к их взаимодействию

с активным хлором (гипохлоритом натрия, NaClO) с образованием токсичных хлорорганических соединений (ХОС). Поступление стойких ХОС в водную экосистему вызывает дисбаланс в развитии гидробионтов (планктона, бентоса, рыб) и нарушает сложившиеся трофические связи [12]. Данный фактор, наряду с потенциальным образованием других хлорсодержащих токсикантов (например, тригалометанов), является ключевым аргументом для поиска и внедрения альтернативных, более безопасных методов обеззараживания.

Одним из наиболее перспективных и экологически чистых методов является обеззараживание ультрафиолетовым (УФ) излучением [2, 11]. Принцип действия основан на бактерицидном эффекте УФ-лучей с длиной волны 200–300 нм (оптимум ~254 нм), которые повреждают ДНК и РНК микроорганизмов, приводя к их инактивации. К преимуществам УФ-метода относятся: отсутствие образования токсичных побочных продуктов дезинфекции, высокая эффективность против широкого спектра патогенов (бактерии, вирусы, простейшие), компактность установок, простота эксплуатации и безопасность для персонала [3, 11].

Цель исследования — разработка инженерно-технологического решения, направленного на оптимизацию процессов водоподготовки с интеграцией УФ установок в систему обеззараживания, обеспечивающих повышение эффективности и экологической безопасности водочистных комплексов.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в 2024–2025 гг. на базе лаборатории АО «Альметьевск-Водоканал». Организацию и проведение режимных наблюдений за состоянием воды в реке Мурат осуществляли в соответствии с [18]. Для выявления морфологических аномалий у особей *Carassius carassius*, используемых в качестве тест-объектов при биоиндикации, применяли стандартизированные методы исследования возраста и роста рыб, изложенные в руководстве Н.И. Чугуновой (1959) [10]. Объектом исследования являлись сточные воды, поступающие на очистные сооружения г. Альметьевск производительностью 40 тыс. м³/сутки. Для оценки качества СВ на различных стадиях очистки и обоснования внедрения УФ-обеззараживания применялся комплекс стандартизированных физико-химических методов:

1. Определение концентрации взвешенных веществ (ВВ) в пробах СВ определялась гравиметрическим методом. Принцип метода: Отделение взвешенных частиц фильтрованием пробы СВ через предварительно подготовленный мембранный фильтр с известной массой. Количественное определение основано на измерении прироста массы фильтра после высушивания осадка до постоянной массы при температуре 105±2°C.

Оборудование и материалы: мембранные фильтры (диаметр пор 0,45 мкм, диаметр 47 мм), аналитические весы (точность ±0,0001 г), сушильный шкаф (термостатируемый, 105±2°C), эксикатор, вакуумный насос и фильтровальная установка, мерный цилиндр (емкость 100–1000 мл).

Процедура:

1. Подготовка фильтра: мембранный фильтр помещался в сушильный шкаф на 60 минут при тем-

пературе 105±2°C. После высушивания фильтр охлаждался в эксикаторе до комнатной температуры и взвешивался на аналитических весах (масса *b*).

2. Отбор пробы: измерялся объем пробы сточной воды (*V*, мл). Для проб с высокой мутностью использовался объем 1000 мл.
3. Фильтрование: отмеренный объем пробы фильтровался через подготовленный фильтр под вакуумом.
4. Сушка осадка: фильтр с осадком помещался в сушильный шкаф на 60 минут при 105±2°C, затем охлаждался в эксикаторе до комнатной температуры.
5. Взвешивание: фильтр с осадком взвешивался на аналитических весах (масса *a*).

Полученную концентрацию ВВ рассчитывали по формуле (1):

$$C = \frac{(a - b) \times 1000 \times 1000}{V}, \quad (1)$$

где: *a* — вес фильтра с осадком, 20 г;
b — вес фильтра без осадка, 8,8 г;
V — объем сточной воды, взятой для анализа, мл;
 1000 — пересчет на л;
 1000 — пересчет на мг.

2. Определение показателя биохимическое потребление кислорода за 5 суток (БПК₅). Концентрация БПК определялась стандартным титриметрическим (или манометрическим) методом [13, 17] в модификации Винклера. Измерялся дефицит растворенного кислорода (РК) до и после 5-суточной (120±0,5 ч) инкубации проб в темноте при 20±1°C. Концентрация РК определялась йодометрическим титрованием. БПК₅ рассчитывалось как разность по формуле 2:

$$\text{БПК}_5 = X_{\text{н}} - X_{\text{к}}, \quad (2)$$

*X*_н — массовая концентрация РК в анализируемой пробе (начальная концентрация), мг/л;

*X*_к — массовая концентрация РК в инкубированной в течение 5 суток пробе, мг/л.

3. Определение содержания нефтепродуктов: выполнялось методом жидкостно-адсорбционной хроматографии на оксиде алюминия (активность Brockmann I) с гравиметрическим окончанием согласно [14, 16]. Нефтепродукты экстрагировались из пробы гексаном (3×50 мл), экстракт очищался на хроматографической колонке с Al₂O₃. После отгонки растворителя на водяной бане (~80°C) и досушивания при 80±2°C, масса нефтепродуктов определялась взвешиванием.

Массу нефтепродуктов (A) вычисляли по формуле (3) по разности массы стаканчика с остатком (A_{T1}) и пустого стаканчика (A_{2T1}):

$$A = A_{T1} - A_{2T1}, \quad (3)$$

Содержание нефтепродуктов (X_{Tn} , млн^{-1}) вычисляли по формуле (4):

$$X_{T1} = \frac{A_{T1}}{B_{T1}} \times 1000, \quad (4)$$

A_{T1} — найденное количество нефтепродуктов (для T1), мг;

B_{T1} — навеска образца, взятая для анализа (для T1), г.

4. Определение нитрат-анионов (NO_3^-): осуществлялось экспресс-колориметрическим методом с использованием коммерческих тест-полосок, основанным на реакции диазотирования [15]. Фильтрованная проба (мембранный фильтр 0,45 мкм) анализировалась путем погружения тест-полоски, инкубации 5 мин и сравнения развившейся окраски со стандартной шкалой визуально или с помощью рефлектометра.
5. Определение ионов аммония (NH_4^+): проводилось стандартным фотометрическим методом с реактивом Несслера ($\text{K}_2[\text{HgI}_4]$) [5]. После фильтрации про-

бы (0,45 мкм) и при необходимости предварительной обработки (удаление сульфидов, коррекция мутности), к 50 мл пробы добавлялись буферный раствор (ЭДТА или цитрат Na/КОН, pH 9,5–10,0) и реактив Несслера. Через 10 мин оптическая плотность раствора измерялась на спектрофотометре при $\lambda=425$ нм. Концентрация NH_4^+ определялась по калибровочному графику, построенному для стандартных растворов (0,0–2,0 мг/л).

Расчет концентрации ионов аммония производили по формуле (5):

$$X = \frac{A \times 1000}{V}, \quad (5)$$

X — содержание ионов аммония, мг/л;

А — содержание ионов аммония, найденное по калибровочному графику или шкале стандартных растворов, мг:

V — объем пробы, взятой для анализа, мл

Результаты и обсуждение

Характеристика объекта исследования. Ключевым источником хозяйственно-питьевого водоснабжения региона является поверхностный водозабор из реки Кама, что подчеркивает важность минимизации антропогенной нагрузки, в том числе от сброса очищенных СВ ОС г. Альметьевск. Существующая схема ОС канализации

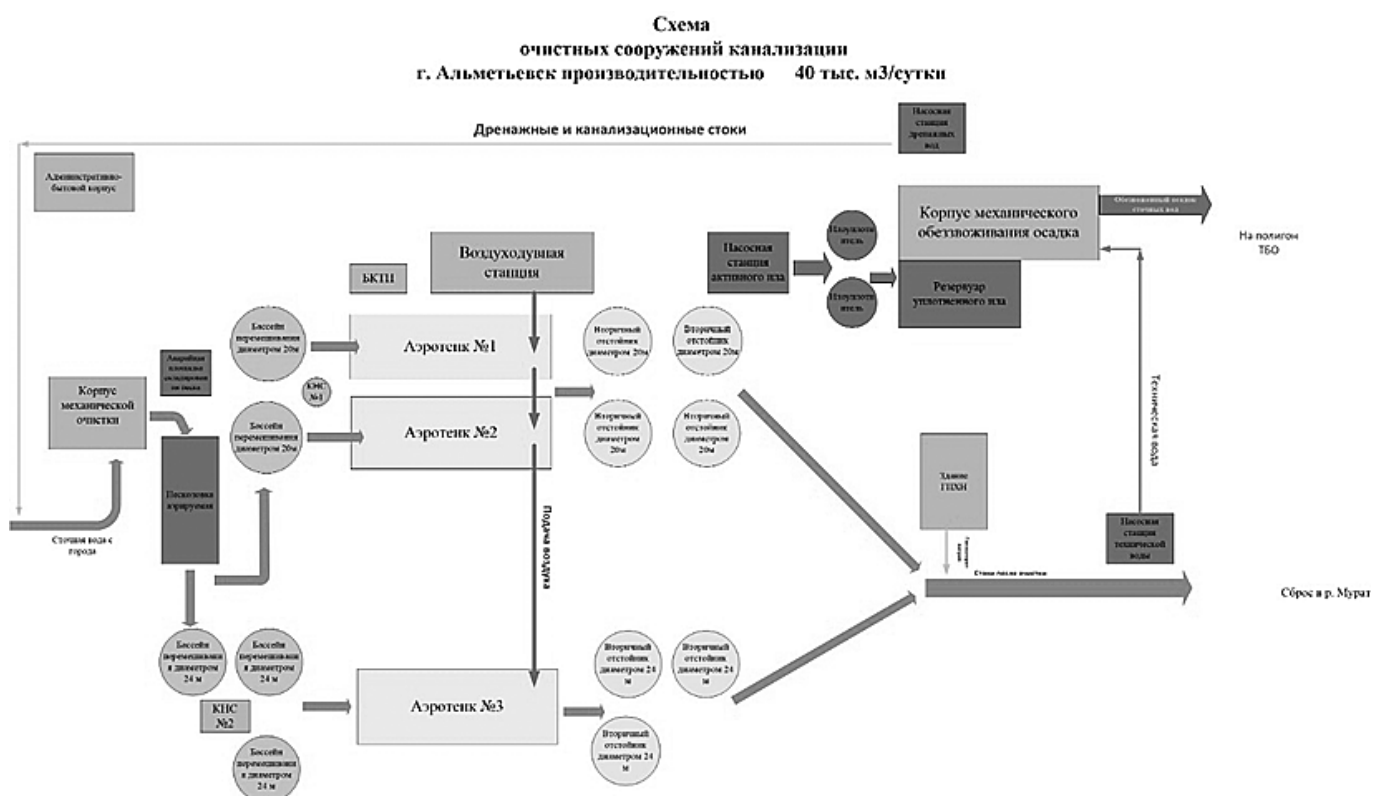


Рис. 1. Схема очистных сооружений канализации г. Альметьевск производительностью 40 тыс. м³/сутки

производительностью 40 тыс. м³/сутки включает следующие основные стадии (Рис. 1):

1. Прием и механическая очистка: СВ поступают по двум коллекторам в приемную камеру. Крупные отбросы задерживаются механическими решетками, прессуются и вывозятся на полигон ТКО. Предварительно очищенный сток направляется в аэрируемые песколовки для удаления минеральных включений (песок, шлак) путем седиментации в винтовом потоке. Обессоленный песок промывается и обезвреживается.
2. Первичное отстаивание: Осветленные в песколовках СВ поступают в распределительную чашу первичных отстойников.
3. Биологическая очистка: Сток из первичных отстойников направляется в бассейны перемешивания, функционирующие как зона денитрификации за счет рециркуляции нитратсодержащей смеси из аэротенков. Далее смесь СВ, активного ила и рецикла подается в систему аэротенков (два аэротенка по четыре коридора, один — по три коридора), где происходит основное окисление органических загрязнений и нитрификация.
4. Вторичное отстаивание: Иловая смесь из аэротенков разделяется во вторичных отстойниках. Осветленная вода — очищенные СВ — направляется на стадию обеззараживания.
5. Обеззараживание: В существующей схеме применяется химическая дезинфекция гипохлоритом натрия (NaClO) для инактивации патогенной микрофлоры перед сбросом в водный объект. Контролируемый параметр остаточного хлора составляет $\leq 0,3$ мг/л [19].

4. Характеристика точки сброса. Сброс очищенных и обеззараженных сточных вод (СВ) осуществляется через береговой выпускной узел в акватории реки Мурат (координаты: 54°55'41" с.ш., 52°14'40" в.д.). Локализация в 1,3 км выше зоны бифуркации с рекой Степной Зай минимизирует антропогенное воздействие на устьевые экосистемы.

5. Оценка эффективности очистки СВ

В Таблице 1 представлены результаты мониторинга ключевых физико-химических и микробиологических показателей: концентрации загрязняющих веществ во входной СВ (сырьевая смесь), концентрации загрязняющих веществ в очищенных и обеззараженных СВ на выходе с ОСК и установленные нормативы предельно допустимых концентраций (ПДК) для сброса очищенных СВ в водные объекты рыбохозяйственного значения (ПДС).

Эффективность элиминации взвешенных веществ из СВ достигла 90 %, при этом концентрация на выходе (9,8 мг/дм³) соответствовала предельно допустимому значению (ПДС = 10,0 мг/дм³). Данный результат подтверждает высокую производительность механических (фильтрация, отстаивание) и биологических (биопленки, активный ил) этапов очистки, обеспечивающих седиментацию и биodeградацию частиц. Концентрация нитратов возросла на 45 % (с 0,84 до 1,22 мг/дм³), что обусловлено процессами нитрификации — окисления аммония (NH₄⁺) до нитратов под действием нитрифицирующих бактерий (род *Nitrobacter*, *Nitrosomonas*) в аэробных условиях. Полученное значение не превышало ПДС (7,24 мг/дм³), что исключает риск эвтрофикации водоёмов. Концентрация нитритов на выходе (0,25 мг/дм³) соответствовала верх-

Таблица 1.

Качественный состав сточных вод на входе на ОСК, на выходе с ОСК и нормативы ПДС

Наименование показателей	Единицы измерения	Концентрация на входе	Концентрация на выходе	ПДС в сточных водах	Эффективность (%)
Взвешенные вещества	мг/дм ³	98,5	9,8	10,0	90
Азот нитратов (NO ₃ ⁻ -N)	мг/дм ³	0,84	1,22	7,24	-45,2**
Азот нитритов (NO ₂ ⁻ -N)	мг/дм ³	0,19	0,25	0,25	-31,6**
БПК полн	мг/дм ³	103,5	27,1	24,00	73,8*
Нефтепродукты	мг/дм ³	2,35	1,03	1,42	56,2
Фосфаты (PO ₄ ³⁻)	мг/дм ³	2,31	0,88	1,22	61,9
Хлориды (Cl ⁻)	мг/дм ³	75,22	73,17	75,63	2,7
Ион аммония (NH ₄ ⁺ -N)	мг/дм ³	20,4	15,2	18,165	25,5
Коли-индекс (общие колиформные)	Ед/л		<1000	1000	—**

Примечание: *Превышение ПДС на 12,9 %; **Рост концентрации из-за нитрификации

ней границе ПДС, что свидетельствовало о частичной нитрификации или кратковременной перегрузке системы. Учитывая токсичность NO_2^- для гидробионтов, требуется коррекция режима аэрации для завершения окисления нитритов до нитратов. Снижение БПК₅ на 73,8 % (со 103,5 мг $\text{O}_2/\text{л}$ до 27,1 мг $\text{O}_2/\text{л}$) указывало на недостаточную эффективность биодеградации органического субстрата, так как выходное значение превышало ПДС (24,0 мг $\text{O}_2/\text{л}$) на 12,9 %. Вероятными причинами таких значений являются гипоксия в аэротенках (дефицит растворенного кислорода), сниженная метаболическая активность микрофлоры активного ила или высокая органическая нагрузка. Для оптимизации рекомендовано увеличение времени гидравлического удержания и интенсификация аэрации. Эффективность деструкции нефтепродуктов составила 56,2 % (с 2,35 до 1,03 мг/дм³), что соответствовало ПДС (1,42 мг/дм³). Основные механизмы очистки СВ на очистных сооружениях включают флотацию и микробное разложение углеводов. Для предотвращения вторичного загрязнения необходима регулярная ревизия нефтеуловителей. Концентрация фосфатов снижена на 61,9 % (с 2,31 до 0,88 мг/дм³), что близко к значению ПДС (1,22 мг/дм³). Осаждение фосфора солями $\text{Fe}^{3+}/\text{Al}^{3+}$ требует строгого контроля дозировки коагулянтов для минимизации остаточных концентраций. Минимальное снижение хлоридов (2,7 %, с 75,22 до 73,17 мг/дм³) подтверждает неэффективность традиционных методов очистки для ионов Cl^- . Накопление хлоридов в водоёмах может индуцировать рост минерализации, что диктует необходимость внедрения мембранных технологий (обратный осмос).

Эффективность удаления ионов аммония составляла 25,5 % (с 20,4 до 15,2 мг/дм³), при этом выходная концентрация приближалась к значению ПДС (18,165 мг/дм³). Низкая степень нитрификации связана с дефицитом растворённого кислорода или субоптимальными температурными условиями. В связи с этим нами рекомендована модернизация аэрационных систем и терморегуляция. Показатель коли-индекса (<1000 ед./л) соответствовал нормативам (ПДС = 1000 ед./л), что подтверждает эффективность дезинфекции (гипохлорирование). Для предотвращения резистентности микрофлоры необходим периодический мониторинг и ротация дезинфектантов.

Таким образом, в ходе анализа нами было установлено, что наибольшая эффективность в очистке СВ на очистных сооружениях достигнута для взвешенных веществ (90 %) и нефтепродуктов (56,2 %). Проблемными параметрами СВ стали БПК (превышение ПДС) и ион аммония (низкая эффективность очистки). Высокое значение БПК может вызывать дефицит кислорода в водоемах. Пограничные значения нитритов и аммония требуют постоянного контроля, так как превышение их концентраций может спровоцировать ухудшение санитарного состояния водного объекта. В качестве рекомен-

дательных мер были предложены оптимизация аэрации в биологических реакторах, внедрение дополнительных ступеней очистки для фосфатов (химическое осаждение) и БПК (анаэробные процессы), модернизация для удаления хлоридов.

6. Проектирование УФ-установки. Проектирование УФ установок для обеззараживания воды основывалась на корреляции между дозой бактерицидного облучения (мДж/см²) и микробиологической нагрузкой (КОЕ/мл). Согласно [2–4], минимальная эффективная доза составляет 16 мДж/см², обеспечивающая 99,9 % инактивацию вегетативных форм бактерий. Для устойчивых патогенов (споры, вирусы) требуются повышенные дозы: кишечная палочка (*E. coli*): 10–20 мДж/см²; энтеровирусы: 25–40 мДж/см²; *Cryptosporidium parvum*: ≥40 мДж/см².

Расчет дозы (D) учитывает интенсивность излучения (I , Вт/м²), время экспозиции (t , с) и УФ-трансмиссию воды (T , %) и рассчитывался по формуле (6):

$$D = I \times t \times T \times 10^{-3}, [\text{мДж/см}^2], \quad (6)$$

Производительность установки (Q) зависит от количества ламп (n), их мощности (P , Вт) и КПД системы (η), согласно выражению (7):

$$Q = \frac{n \times P \times \eta}{D}, [\text{м}^3/\text{ч}], \quad (7)$$

Проектирования УФ-системы проводили в несколько этапов: определяли целевую степень обеззараживания на основе эпидемиологических рисков, производили расчет требуемой дозы с учетом оптической плотности воды, осуществляли подбор типа ламп (низкого давления (ЛНД, 254 нм) для малых расходов; амальгамные (200–350 Вт) для производительности до 3000 м³/ч).

Расчет количество необходимых ламп для объекта с $Q=1300 \text{ м}^3/\text{ч}$, $D=100 \text{ мДж/см}^2$, ЛНД (60 Вт, $\eta = 35 \%$), ЛВД (200 Вт, $\eta = 45 \%$) проводили посредством преобразования формулы (3):

$$n = \frac{Q \times D}{P \times \eta} = \frac{1300 \times 100}{60 \times 0,35} \approx 6000 \text{ шт ЛНД}$$

$$n = \frac{Q \times D}{P \times \eta} = \frac{1300 \times 100}{200 \times 0,45} \approx 1400 \text{ шт ЛВД}$$

ЛВД демонстрируют на 15 % меньшее удельное энергопотребление (кВт·ч/м³) по сравнению с ЛНД, что связано с высокой плотностью мощности излучения и уменьшением количества ламп на единицу производительности.

Проектирование УФ установок для обеззараживания воды требует соблюдения баланса между техни-

ко-экономической эффективностью и бактерицидной мощностью. Ключевым аспектом является оптимизация количества и мощности УФ-ламп для минимизации капитальных затрат при обеспечении заданной производительности. Качество исходной воды, включая параметры биохимического (БПК) (до 10 мг O_2 /л) и химического (ХПК) потребления кислорода (до 50 мг O_2 /л), концентрацию взвешенных веществ (до 10 мг/л), железа (до 1 мг/л) и нефтепродуктов (до 0,2 мг/л), напрямую влияет на целесообразность применения УФ-технологий. Коллоидные и взвешенные частицы (>30 мг/л) снижают эффективность обеззараживания за счет рассеивания УФ-излучения, что требует предварительной механической или коагуляционной обработки. Следовательно, максимальный предел содержания взвешенных веществ, при котором расчет имеет технико-экономическую целесообразность, не должен превышать 30 мг/л.

Определение общей требуемой бактерицидной мощности излучателей (F_B) производили по выражению (8):

$$F_B = - \frac{Q_{\text{час}} \times \alpha \times k \times \lg(P / P_0)}{1563,4 \times n_{\cdot} \times n_0}, [\text{Вт}] \quad (8)$$

где $Q_{\text{час}}$ — требуемая производительность, $\text{м}^3/\text{час}$;

α — коэффициент поглощения обрабатываемой воды (поверхностные и подземные источники), $\alpha = 0,2-0,6$ для поверхностных источников.

k — коэффициент безопасности, $k = 2500$.

P_0 — исходная концентрация микроорганизмов на 1 м^3 , $P_0 = 1000 \text{ КОЕ}/\text{м}^3$.

P — конечная концентрация микроорганизмов (после обработки), $P = 1 \text{ КОЕ}/\text{м}^3$.

n_0 — коэффициент облучения, зависящий от показателей воды и толщины ее слоя, $n_0 = 0,9$.

n_{\cdot} — коэффициент бактерицидного потока для погружного излучателя, $n_{\cdot} = 0,9$.

$$F_B = - \frac{1300 \times 0,3 \times 2500 \times \lg\left(\frac{1}{1000}\right)}{1563,4 \times 0,9 \times 0,9} = 2310 \text{ Вт}$$

Следовательно, для $Q = 1300 \text{ м}^3/\text{ч}$ требуемая бактерицидная мощность излучателей составит 2310 Вт.

В проектировании УФ систем обеззараживания ключевым параметром является доза бактерицидного облучения (D , $\text{мДж}/\text{см}^2$), рассчитываемая по формуле (1). Механизм действия предлагаемой установки сводится к тому, что Среднее время пребывания воды в обеззараживающей камере рассчитывалось нами по формуле (9) [4]:

$$t = \frac{S \times L}{278 \times Q}, \quad (9)$$

где S — поперечное сечение камеры обеззараживания в см, $S = 950 \text{ см}$;

L — длина камеры обеззараживания в см, $L = 10 \text{ м}$;

Q — расход воды в $\text{м}^3/\text{ч}$;

278 — коэффициент пересчета размерности единиц.

Следовательно, получили результаты расчета времени экспозиции t (с):

$$t = \frac{950 \text{ см} \times 1000 \text{ см}}{278 \times 1300} = \frac{950000}{361400} \approx 3 \text{ сек}$$

Доза облучения, согласно выражению (1), составила:

$$D = 80 \times 3 = 240 \text{ мДж}/\text{см}^2.$$

Для установок доза в $240 \text{ мДж}/\text{см}^2$ является максимальной дозой облучения для суточного объема $31500 \text{ м}^3/\text{сут}$ воды. Следовательно, доза $240 \text{ мДж}/\text{см}^2$ обеспечивает инактивацию устойчивых патогенов (например, вирусов гепатита А, требующих $\geq 100 \text{ мДж}/\text{см}^2$). Суточный объем 31500 м^3 соответствовал производительности установки при времени контакта $t = 3 \text{ с}$ и площади сечения камеры $S = 15 \text{ м}^2$ (расчет по формуле $Q = S \times v$, где v — скорость потока).

8. Система биомониторинга

Разработан биоконкомплекс с использованием *Carassius carassius* (рис. 2). Принцип работы системы основывался на том, что пробы из вторичного отстойника проходили доочистку (войлочный фильтр + УФ) перед подачей в аквариум (Вторичный отстойник → Вибрационный насос → Войлочный фильтр → УФ-модуль → Аквариум с *C. carassius* → Аэратор + Термостат). В качестве критериев, согласно [1, 6, 7, 9, 10] оценки выбраны поведенческие реакции (двигательная активность, ориентация), выживаемость (>95 % за 24 ч) и морфологические аномалии (чешуя, плавники). При возникновении угрожающих реакций инициировался химико-аналитический контроль.

Следовательно, при регистрации аномальных поведенческих реакций (снижение активности, дезориентация) [9] инициируется отбор проб для углубленного химико-аналитического контроля. Отсутствие негативных реакций у тест-организмов в течение экспозиции свидетельствует о достижении нормативных показателей безопасности, разрешающих сброс воды в природные водоемы.

В рамках исследования проведен сравнительный анализ эффективности УФ обеззараживания и химической дезинфекции гипохлоритом натрия (NaClO). Методология исследования включала оценку степени элиминации микробиологических (колиформные бактерии, энтерококки) и химических (БПК₅, нефтепродукты) загрязнителей. Данные систематизированы в Таблице 2, отражающей динамику снижения концентраций загрязняющих веществ на различных этапах очистки.



а)



б)

Рис. 2. Очистка сточных вод

(а) — система биомониторинга качества сточных вод, б) — УФ-лампа для доочистки в биокомплексе

Таблица 2.

Сравнительная эффективность гипохлорита натрия и УФ-облучения

Параметр	NaClO, мг/л	УФ, мг/л	Норматив, мг/л	Преимущество метода
Взвешенные вещества	11,2	9,0	12,5	УФ ($\Delta = 20\%$)
БПК ₅	1,8	1,3	2,9	УФ ($\Delta = 28\%$)
Нефтепродукты	0,025	0,008	0,05	УФ ($\Delta = 68\%$)
Нитрат-анион	0,072	0,051	0,087	УФ ($\Delta = 29\%$)
Фторид-анион	<0,1	0,03	0,05	УФ (в рамках ПДК)
Аммоний-ион	1,02	0,91	1,05	УФ ($\Delta = 11\%$)

Примечание:

Δ — разница в эффективности между методами.

Для фторид-аниона значение NaClO (<0,1 мг/л) приближено к нормативу,

УФ — значительно ниже.

Таблица 2 демонстрирует значимые различия в эффективности двух методов обеззараживания СВ. При УФ-обработке снижала концентрацию взвешенных веществ до 9 мг/л (норматив: 12,5 мг/л), гипохлорит — до 11,2 мг/л. Следовательно, УФ обработка на 20% эффективнее в удалении взвешенных частиц. По показателю БПК₅ значение УФ обработки было на 28 % эффективнее, чем гипохлорит и составило 1,3 мг/л (при нормативе

= 2,9 мг/л), гипохлорит: 1,8 мг/л. «Степень разрушения нефтепродуктов при УФ-облучении зависит от состава и молярной массы веществ и снижается с ростом их начальной концентрации. Предварительная фильтрация техногенной воды не только снижает начальное содержание в ней нефтепродуктов, но и повышает эффективность УФ деструкции до 80 % [8]. Согласно, нашим исследованиям, эффективность очистки с помощью УФ при содержании нефтепродуктов выше в 3 раза за счет фотоокисления углеводородов, чем при применении гипохлорита. Также прослеживалась эффективность на 29 % УФ обработки в контроле нитратов, по сравнению с гипохлоритом. Лучшая нитрификация за счет активации аэробных бактерий была также отмечена при обработке УФ по сравнению с применением гипохлорита натрия.

Заключение

Проведенное компаративное исследование продемонстрировало, что УФ облучение (длина волны 254 нм) оказывает статистически значимое влияние ($p < 0,05$) на эффективность деструкции микробиологических и органических загрязнителей в СВ. Установлено, что фотохимические реакции, индуцированные УФ-излучением, приводят к дозозависимому снижению коли-индекса (на 99,9 %) и окислению устойчивых ксенобиотиков за счет генерации реактивных форм кислорода (OH^\cdot , O_3). Полученные данные, верифицированные в соответствии с методиками ГОСТ Р 56237–2014, подтверждают целесообразность внедрения УФ-дезинфекции в качестве третичной ступени очистки для обеспечения

соответствия требованиям СанПиН 1.2.3685–21 и минимизации экотоксикологических рисков.

1. Существующая система очистки обеспечивает соответствие ПДС по большинству параметров, но требует оптимизации:
 - Превышение БПК₅ (27,1 мг/л) и пограничные значения NH₄⁺ (15,2 мг/л).
 - Риск образования токсичных NO₂⁻ при сбоях нитрификации.

2. УФ-обеззараживание демонстрирует преимущества перед хлорированием:

- На 20–68 % выше эффективность по ключевым загрязнителям.
- Доза 240 мДж/см² гарантирует инактивацию устойчивых патогенов.
- Отсутствие экологических рисков от ХОС.

3. Внедрение биомониторинга с *Carassius carassius* позволяет оперативно детектировать токсикологические угрозы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горлачева Е.П., Афонин А.В. Серебряный карась *Carassius auratus gibelio* (Bloch, 1782) как индикатор состояния экосистемы озера Кенон // Ученые записки ЗабГУ. Сер. Биологические науки. 2017. Т. 12, № 1. С. 6–12.
2. Матафонова Г.Г., Батоев В.Б. Применение ультразвука и ультрафиолетового излучения в гибридных методах обеззараживания воды. Электронная обработка материалов, 2019. № 55(4). с. 20–25. DOI: 10.5281/zenodo.3369702
3. Медведева И.В., Медведева О.М., Студенок А.Г., Студенок Г.А., Цейтлин Е.М. Новые композитные материалы и процессы для химических, физико-химических и биохимических технологий водоочистки. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66. Вып. 1. С. 6–27.
4. МУ 2.1.5.732–99. Санитарно-эпидемиологический надзор за обеззараживанием сточных вод ультрафиолетовым излучением: Методические указания. — М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 1999. — 16 с.
5. ПНДФ 14.1:2:3.1–95. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации ионов аммония в природных водах фотометрическим методом с реактивом Нesslera: дата введения 2015-05–12 // Центр метрологии и сертификации «СЕРТИМЕНТ» Уральского отделения РАН — Москва. 2017 г. — 26 с.
6. Правдин И.Ф. Руководство по изучению рыб (преимущественно пресноводных). М., из-во «Пищевая промышленность», 1939.
7. Соломонов Н.М., Ньюканов А.М. Патоморфологические изменения у рыб на участке бассейна реки Вилюй // Проблемы региональной экологии. 2019. №4. С. 25–29.
8. Соснина Н.А., Штарева А.В. Фотолитическая деструкция как способ очистки сточных вод от органических соединений. Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2011. №3(22). С. 75–84.
9. Чеснокова С.М. Биологические методы оценки качества объектов окружающей среды: учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 2. Методы биотестирования / С.М. Чеснокова, Н.В. Чугай; Владим. гос. ун-т. — Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. — 92 с.
10. Чугунова Н.И. Руководство по изучению возраста и роста рыб. М., 1959. 164 с
11. Tara E. Randall T.E., Linden Y.S., Gamboa J., Real B. and others. Bacterial repair and recovery after UV LED disinfection: implications for water reuse. Environmental Science Water Research & Technology. The Royal Society of Chemistry. 2022. file:///C:/Users/HUAWEI/Downloads/RandallRepairUVLEDReuseESWRT2022.pdf
12. Richardson S.D., Plewa M.J. (Eds.). Disinfection By-Products in Drinking Water, Recycled Water and Wastewater: Formation, Detection, Toxicity and Health Effects: Preface. Journal of Environmental Sciences. V.58. 2017. DOI: 10.1016/j.jes.2017.07.017 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1001074217320806?via%3Dihub>
13. ГОСТ 31957–2012 (ISO 5815:2003). Вода. Методы определения биохимического потребления кислорода. <https://docs.cntd.ru/document/1200096960>
14. ГОСТ 31953–2012 (ISO 9377–2:2000) Вода. Определение нефтепродуктов методом газовой хроматографии.
15. ГОСТ ISO 10304–1–2016. Качество воды. Определение содержания растворенных анионов методом жидкостной ионообменной хроматографии. Часть 1. Определение содержания бромидов, хлоридов, фторидов, нитратов, нитритов, фосфатов и сульфатов. <https://www.akvilon.ru/methodology/kachestvo-vody-opredelenie-soderzaniya-rastvorenykh-anionov-metodom-zhidkostnoi-ionoobmennoi-xromatografii-cast-1-opredelenie-soderzaniya-bromidov-xloridov-ftoridov-nitratov-nitritov-fosfatov-i-sulfatov>
16. МУ 2.1.4.719–98 Питьевая вода и водоснабжение населенных мест <https://docs.cntd.ru/document/1200030958>
17. РД 52.24.476–95. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой концентрации хлоридов в поверхностных водах суши газохроматографическим методом. / Росгидромет. — Ростов-на-Дону: ГУ ГХИ, 1995.
18. РД 52.24.309–2016. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши. <https://docs.cntd.ru/document/495872993>.
19. СанПиН 2.1.5.980–00. 2.1.5. Водоотведение населенных мест, санитарная охрана водных объектов. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. <https://docs.cntd.ru/document/1200006938>.

© Ульдияров Станислав Владимирович (wnl_08@mail.ru); Назарова Надежда Петровна (wnl_08@mail.ru);

Головки Марина Викторовна (mvgolovko@kai.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ГЕНЕТИКА ПРОСТЕЙШИХ,
ПАТОГЕННЫХ ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХCOMPARATIVE GENETICS OF PROTOZOA,
PATHOGENIC TO HUMANS AND ANIMALS**N. Fokina
A. Grinev**

Summary. The polyphyletic group Protozoa includes unicellular eukaryotic organisms, many of which are parasites of humans and animals. Their molecular-genetic features, however, are only weakly studied. The aim of this work is to systematize and analyze the main quantitative indicators that characterize the genetic features of representatives of the polyphyletic group Protozoa that are pathogenic to humans and animals, as well as some specific characteristics inherent to their individual clades.

Keywords: Protozoa, protozoans, genetics, invasive diseases, host-parasite system.

Фокина Наталья Юрьевна

Аспирант, ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова
Минздрава России (Сеченовский Университет)
retrospector@yandex.ru

Гринев Александр Борисович

Кандидат биологических наук,
ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова
Минздрава России (Сеченовский Университет)
sagrinev@yandex.ru

Аннотация. Полифилетическая группа Protozoa включает в себя одноклеточные эукариотные организмы, многие из которых являются паразитами человека и животных. При этом их молекулярно-генетические особенности изучены слабо. Целью настоящей работы является систематизация и анализ основных количественных показателей, характеризующих генетические особенности патогенных для человека и животных представителей полифилетической группы Protozoa, а также некоторых частных характеристик, присущих их отдельным кладам.

Ключевые слова: Protozoa, простейшие, генетика, инвазионные болезни, система «паразит-хозяин».

Введение

Многие простейшие являются паразитами человека и животных. Причем, важное значение для этиологии и патогенеза инвазионных заболеваний имеют молекулярно-генетические особенности паразита. Целью настоящей работы является сравнительный анализ организации геномов наиболее распространенных представителей полифилетической группы Protozoa, которые вызывают паразитарные заболевания у человека и животных. В работе будут рассмотрены таксоны, традиционно относимые к простейшим, за исключением входящих в настоящее время в иные царства (т.е. типов Microsporidia и Muxosporidia), с учетом их современного систематического положения.

Материалы и методы

Материалом для исследования выступали данные о строении геномов простейших, паразитирующих на человеке и других животных, которые к настоящему моменту были секвенированы и имеются в открытом доступе. Информация была получена из базы данных GenBank. Сравнение проводилось по основным количественным показателям [2, с. 150].

Результаты

Ниже подробно проанализированы результаты, полученные при сравнении вышеупомянутых показателей, а также описаны специфические молекулярно-генетические особенности, присущие отдельным кладам в составе полифилетической группы Protozoa.

1. Супергруппа SAR

Супергруппа SAR (Stramenopiles, Alveolata, Rhizaria) включает в себя таких представителей, как *Plasmodium* spp. — возбудителей малярии, возбудителей токсоплазмоза (*Toxoplasma gondii*), пироплазмозов (отряд Piroplasmida); паразитических инфузорий типа Ciliophora, вызывающих такие заболевания, как балантидиаз и ихтиофтириоз, а также многих других патогенных для человека и животных простейших [5, с. 320].

1.1. Надтип Alveolata

Тип Apicomplexa. Род *Plasmodium*

Род *Plasmodium* является одним из наиболее изученных таксонов из числа простейших. В первую очередь, это связано с высокой заболеваемостью смертностью от малярии. У человека это заболевание вызывают пять видов плазмодиев.

Таблица 1.

Сравнительная характеристика геномов
паразитических простейших (по данным GenBank)

	Кол-во хромосом	Размер генома	Кол-во белков	GC- состав
Супергруппа SAR, надтип Alveolata				
Тип Apicomplexa				
<i>Plasmodium falciparum</i>	14+MT+API	23.4945	5929	19.8551
<i>Plasmodium knowlesi</i>	14+MT+API	24.3599	5194	38.6189
<i>Plasmodium malariae</i>	14+MT+API	31.9252	5960	24.7
<i>Plasmodium ovale</i>	14+MT+API	35.0868	8098	28.7513
<i>Plasmodium vivax</i>	14+MT+API	29.0402	6381	39.7917
<i>Babesia bovis</i>	2+MT+API	8.17971	3674	41.6972
<i>Babesia divergens</i>	н/д	9.65187	н/д	42.45
<i>Babesia microti</i>	4+MT+API	6.43801	3601	36.3
<i>Cytauxzoon felis</i>	н/д	9.10917	н/д	31.8
<i>Theileria equi</i>	2+MT+API	10.7328	5327	40.2168
<i>Toxoplasma gondii</i>	11-14+MT+API	64.5312	9376	52.3
Тип Ciliophora				
<i>Ichthyophthirius multifiliis</i>	н/д	48.8	16112	15.95
Супергруппа SAR, надтип Rhizaria				
<i>Paramikrocytos cancri</i>	н/д	15.2329	н/д	30.7
Надцарство Excavata				
<i>Leishmania braziliensis</i>	36+~10K _{max} +~10 ³ K _{min}	33.7558	8202	57.3627
<i>Leishmania chagasi</i>	36+~10K _{max} +~10 ³ K _{min}	31.9248	н/д	59.4283
<i>Leishmania donovani</i>	36+~10K _{max} +~10 ³ K _{min}	32.445	8014	59.1146
<i>Leishmania infantum</i>	36+~10K _{max} +~10 ³ K _{min}	32.1221	8338	59.5625
<i>Leishmania major</i>	36+~10K _{max} +~10 ³ K _{min}	32.7976	8412	59.6469
<i>Leishmania mexicana</i>	34+~10K _{max} +~10 ³ K _{min}	32.0829	8147	59.7896

	Кол-во хромосом	Размер генома	Кол-во белков	GC- состав
<i>Leishmania panamensis</i>	35+~10K _{max} +~10 ³ K _{min}	30.9764	7748	57.444
<i>Leishmania tropica</i>	36+~10K _{max} +~10 ³ K _{min}	32.2807	н/д	59.6
<i>Trypanosoma brucei</i>	10+~10K _{max} +~10 ³ K _{min}	26.9917	8758	46.2229
<i>Trypanosoma cruzi</i>	40+~10K _{max} +~10 ³ K _{min}	30.4226	13965	50.6
<i>Trypanosoma equiperdum</i>	н/д	26.228	7668	45.7
<i>Trypanosoma evansi</i>	10+~10K _{max} +~10 ³ K _{min}	25.4322	н/д	46.5285
<i>Trichomonas elongata</i>	н/д	55.0605	н/д	34.15
<i>Lambliа intestinalis</i>	5+MT	11.4675	4986	47.3
<i>Naegleria fowleri</i>	н/д	27.7913		
Надцарство Amoebozoa				
<i>Entamoeba histolytica</i>	≥15	17.8483	7406	24.95
<i>Entamoeba invadens</i>	н/д	40.88	11997	30.3
<i>Entamoeba nutalli</i>	н/д	14.4	6187	25.1
<i>Acanthamoeba castellanii</i>	~30+MT [6]	40.88	14969	30.3
<i>Acanthamoeba triangularis</i>	н/д	66.4284	н/д	58.6
<i>Acanthamoeba quina</i>	н/д	83.589	н/д	59.2
<i>Balamuthia mandrillaris</i>	н/д	55.9637	н/д	46.7966

Прим. API — геномапикопласта, MT — митохондриальный геном, K — геном кинетопласта: K_{max} — максикольца, K_{min} — миникольца, н/д — нет данных. Количество максикольцев и миникольцев указано сточностью до порядка. Если не указано иное, каждая из внеядерных органелл содержит одну хромосому

Геномы *P. falciparum* и *P. vivax* достаточно хорошо изучены. Их кариотип насчитывает 14 хромосом, а также имеются две хромосомы в составе митохондрии и апи-копласта. Характерной особенностью генома является низкое содержание гуанина и цитозина в ДНК. В то вре-

мя как у *P. vivax* оно составляет около 40 %, у *P. falciparum* содержание гуанина и цитозина вдвое меньше и составляет менее 20 %, что является одним из наименьших показателей среди всех живых организмов [9, с. 280]. Причины подобного явления до сих пор неизвестны, однако филогенетический анализ показал, что геном общего предка *Plasmodium* spp. также был крайне богат аденином и тиминном.

Крайне важное значение для обеспечения жизнедеятельности организма имеет регуляция уровня экспрессии генов. Одним из них является наличие у *P. falciparum* механизма, сходного с РНК-интерференцией. В работе было показано, что необходимые для протекания РНК-интерференции структуры отсутствуют у всех изученных представителей рода *Plasmodium*. Тем не менее, было установлено, что необходимые белки вместе с микроРНК импортируются извне, из клеток человека [1, с. 200]. Такой механизм совершенно нетипичен для простейших и чаще всего встречается у высших растений. В 2012 году было установлено, что микроРНК человека способны проникать в организм плазмодия и комплексно связываться с иРНК последнего, в результате чего образуются дуплексы, препятствующие трансляции белков, кодируемых данными иРНК.

Род *Toxoplasma*

Род *Toxoplasma* имеет в своем составе единственный вид — *T. gondii*, возбудителя токсоплазмоза. Заболевание очень широко распространено: уровень серопревалентности составляет 25.7 % по всему миру. Геном *T. gondii* является одним из самых крупных среди простейших и достаточно GC-насыщенным — его размер составляет около 64.5 млн пар нуклеотидов, GC-состав — 52.3 %. По сравнению с размером генома, количество белок-кодирующих генов относительно невелико и насчитывает менее 9.5 тысяч генов [6, с. 100].

T. gondii — один из немногих представителей типа Apicomplexa, у кого подтверждено наличие стандартного механизма РНК-интерференции. Биогенез микроРНК из их предшественников у *T. gondii* достаточно хорошо изучен, в т.ч. проводилось моделирование взаимодействий выявленных микроРНК с иРНК организма и экспериментальное подтверждение построенной модели, используя доступные данные секвенирования РНК. Однако, стоит отметить, что, так же, как и в случае заболевания малярией, при инвазии *T. gondii* в пораженных тканях человека наблюдается изменение уровней содержания некоторых микроРНК, а именно, miR-146a, miR-155, miR-132, а также микроРНК кластера miR-17-92. Более того, токсоплазма способна экзоцитировать микроРНК и взаимодействовать посредством них с макроорганизмом, вызывая дерегуляцию таких его ключевых сигнальных путей, как STAT и NF-κB, а также онкогена c-myc.

Отряд Piroplasmida

Геномы пироплазмид — одни из самых небольших среди паразитических простейших. Вместе с тем, белок-кодирующие гены расположены в них достаточно плотно [8, с. 250]. Например, количество белок-кодирующих генов у *Theileria equi* сопоставимо с таковым у большинства представителей рода *Plasmodium*, хотя размер генома последних в 2–3 раза крупнее, чем у тейлерий.

За почти полутора вековую историю изучения, систематика пироплазмид претерпела множество изменений. Например, различных представителей рода *Babesia* в разное время относили к родам *Piroplasma*, *Nuttallia*, *Microbabesia*, *Babesiella*, *Gonderia* и *Francaielli*. В настоящее время, как правило, выделяют три рода в составе отряда: *Babesia*, *Theileria* и *Cytauxzoon*, но с появлением новых данных, систематика регулярно подвергается пересмотру. Пироплазмидозами болеют многие домашние и сельскохозяйственные животные: крупный и мелкий рогатый скот, лошади, собаки, кошки [1, с. 24]. Известны случаи заболевания бабезиозом у человека; возбудителями могут выступать четыре вида бабезий: *B. divergens*, *B. microti*, *B. duncani*, *B. venatorum*.

Тип Ciliophora

Тип Ciliophora включает в себя ресничных инфузорий. Большая часть из них относится к свободноживущим организмам, однако около 30 % ведут паразитический образ жизни [15, с. 143]. Почти все они паразитируют на беспозвоночных и рыбах. Для человека патогенным является только один вид ресничных инфузорий, *Balantidium coli*.

Геном достаточно крупный, как по размеру, так и по количеству белок-кодирующих генов, крайне бедный гуанином и цитозином: они составляют лишь около 16 % от всех нуклеотидов в геноме.

Отличительной особенностью типа Ciliophora, с точки зрения организации генома, является ядерный диморфизм. Из-за большого количества т.н. внутренних элиминированных последовательностей (internally eliminated sequences, IES), в т.ч. транспозонов, в составе микронуклеуса, он практически постоянно находится в неактивном состоянии [10, с. 160]. Поддержание генетического разнообразия обеспечивается посредством конъюгации. Установлено, что паразитические инфузории утратили до 40% генов, отвечающих за конъюгацию.

1.2. Надтип Rhizaria

Надтип морфологически неоднороден, среди входящих в состав ризарий паразитических простейших — классы Ascetosporea и Phytomyxea, однако последние

являются паразитами растений, оомицетов, диатомовых и бурых водорослей, а потому их рассмотрение выходит за рамки настоящей работы [3, с. 55].

Класс Ascetosporea

Для животных патогенны представители трех порядков в составе класса: *Harposporida*, *Mikrocytida* и *Paramyxida*. Они представляют собой внутриклеточных паразитов морских беспозвоночных: турбеллярий, аннелид, моллюсков, ракообразных. К настоящему времени секвенирован геном лишь одного организма, относящегося к данному типу, *Paramikrocytos canceri*, паразитирующего на ракообразных. Структура генома изучена относительно слабо: количество хромосом и количество белок-кодирующих генов неизвестно [7, с. 90]. Однако, исходя из имеющихся данных, она является типичной для большинства простейших: размер генома невелик и составляет около 15 млн пар нуклеотидов, доля гуанина и цитозина составляет 30.7 %.

2. Надцарство Excavata

Большое значение при выделении экскават в отдельную группу, как и в случае ризарий, имели молекулярно-генетические данные. Однако, в отличие от последних, у большинства экскават также имеются общие морфологические особенности. Большинство экскават имеет два, четыре или более жгутиков [12, с. 210]. Один из них направлен назад и расположен в вентральной борозде, из-за наличия которой таксон и получил свое название.

2.1. Тип Euglenozoa

Род *Trypanosoma*

Семейство *Trypanosomatidae*, к которому принадлежат трипаномы, включает в себя возбудителей таких заболеваний человека, как африканский трипаномоз, который вызывается простейшими вида *T. brucei*, и болезнь Шагаса (возбудитель *T. cruzi*). У других животных, например, у лошадей и других представителей семейства *Equidae*, а также верблюдов, собак и ряда других животных, *T. ninaekohljakimovae* (= *evansi*) вызывает заболевание су-ауру (сурра). Еще одним заболеванием, которому подвержены одомашненные непарнокопытные, является т.н. случная болезнь лошадей.

Для представителей семейства *Trypanosomatidae* характерна полицистронная организация генома, однако, в отличие от оперонов прокариот, гены, транскрибирующиеся совместно, могут быть функционально не связаны друг с другом. Кроме того, в геноме трипаносоматид практически полностью отсутствуют интроны и межгенные промежутки, что обуславливает высокую информационную плотность генома данных организмов.

Характерной особенностью представителей рода *Trypanosoma* является наличие у них явления транссплайсинга [14, с. 250]. В то время как у большинства эукариотных организмов сплайсинг представляет собой цис-реакцию, для формирования зрелой, способной к трансляции иРНК у трипаносом первичному транскрипту необходимо соединиться с т.н. сплайсированным лидером — 37-нуклеотидной молекулой РНК. Эта молекула закодирована в повторяющихся участках генома. Она транскрибируется в виде РНК со сплайсированным лидером (СЛ РНК) длиной до 100 нуклеотидов. Общий принцип данного механизма проиллюстрирован на рисунке 1.

Как и другие представители отряда *Kinetoplastida*, трипаномы имеют крупную видоизмененную митохондрию, содержащую компартмент, называемый кинетопластом. Он содержит ДНК, представленную т. н. макси- и миникольцами. Максикольца, которых в кинетопласте имеется несколько десятков, содержат белок-кодирующие гены, а миникольца, в количестве нескольких тысяч на кинетопласт, содержат гены, кодирующие направляющую РНК, которая необходима для регуляции экспрессии генов, содержащихся в максикольцах.

Виды, относящиеся к роду *Trypanosoma*, сильно отличаются как с точки зрения организации генома, так и особенностей функционирования молекулярно-генетического аппарата.

К примеру, исключительно у возбудителя сонной болезни *T. brucei* имеется вариабельный поверхностный гликопротеид (ВПГ), позволяющий паразиту избегать иммунную систему хозяина. ВПГ образуют димеры, плотно расположенные на поверхности клетки и скрывающие инвариантные эпитопы от связывания с антителами хозяина.

Еще одной особенностью является неканоническое использование трипаносоматидами РНК-полимеразы 1, область применения которой у большинства эукариотных организмов ограничена лишь трансляцией рибосомной РНК. Однако у *T. brucei* с помощью данной РНК-полимеразы также транскрибируются информационные РНК, в частности, кодирующие вариабельные поверхностные белки и белок проциклин.

Род *Leishmania*

Совместно с трипаносомами, лейшмании входят в класс *Kinetoplastida* типа *Euglenozoa*.

В отличие от трипаносом, лейшмании обладают гораздо большим единообразием в организации генома [4, с. 180]. Геном лейшманий имеет размер около 32 млн пар нуклеотидов и включает в себя 36 хромосом. Коли-

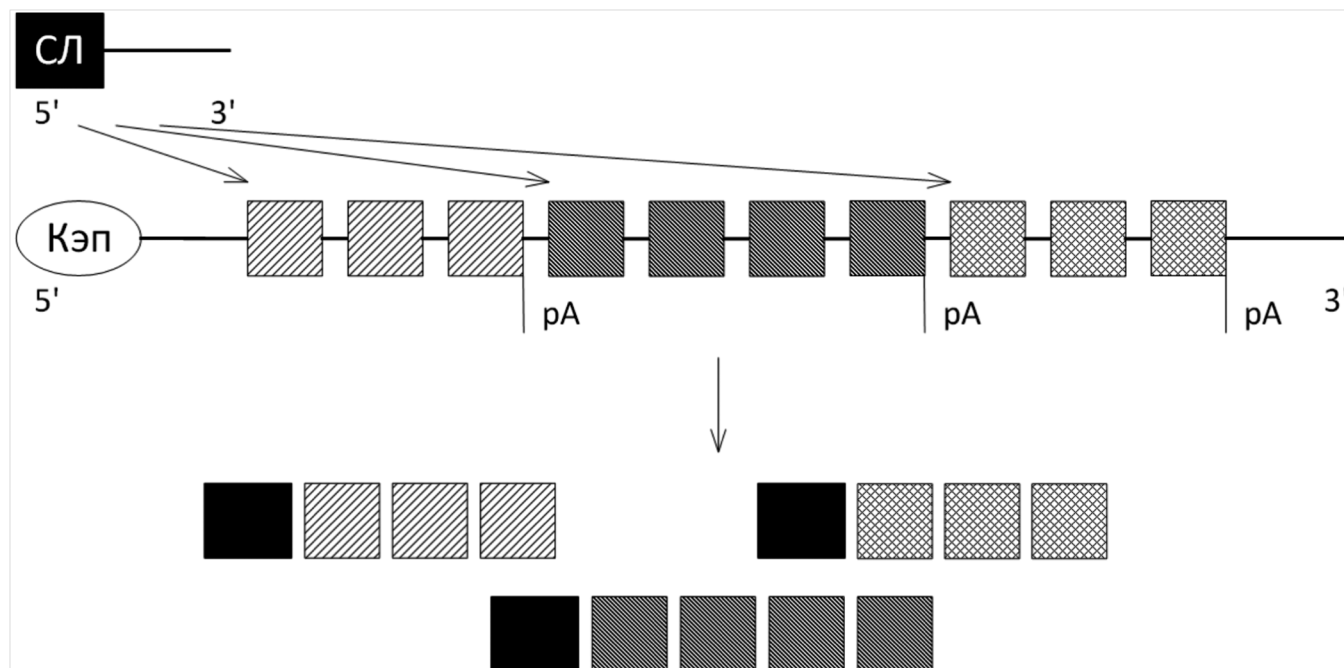


Рис. 1. Принципиальная схема транс-сплайсинга у *T. brucei*; символами СЛ обозначен сплайсированный лидер, pA — присоединение полиаденилового фрагмента, квадратами с различной штриховкой обозначены экзоны разных генов

чество белок-кодирующих генов составляет от 8 до 9 тысяч экземпляров. Геномы лейшманий крайне GC-богаты: на долю гуанина и цитозина приходится более 59% нуклеотидов в геноме.

2.2. Тип Percolozoa

Род *Naegleria*

Несмотря на то, что большинство неглерий — свободноживущие организмы, один из видов в составе рода, *Naegleria fowleri*, является факультативным паразитом человека.

Геном неглерий включает в себя 12 хромосом, а также еще около 4000 внехромосомных плазмид, кодирующих рибосомные РНК. При том, что размер генома сравнительно невелик, как и у некоторых трипаносом, гены расположены очень плотно, и количество белок-кодирующих генов у них является одним из наибольших среди всех паразитических простейших.

3. Надцарство Amoebozoa

Преимущественно, для человека патогенны представители надцарства, относящиеся к двум родам: *Entamoeba* и *Acanthamoeba*.

Акантамебы, как правило, являются свободноживущими организмами, однако могут выступать в качестве факультативных паразитов, вызывающих амёбный кератит и амёбный менингоэнцефалит. Помимо представителей рода *Acanthamoeba*, гранулематозный амёбный

энцефалит могут вызывать и амёбы вида *Balamuthia mandrillaris*.

В отличие от большинства других простейших в целом и представителей надцарства Amoebozoa в частности, у *E. histolytica* вместо митохондрии имеется т.н. митосома — видоизмененная митохондрия, не содержащая ДНК. Это обусловлено тем, что дизентерийная амёба в организме хозяина является анаэробным микроорганизмом [13, с. 300].

Заключение

С течением времени наблюдается конвергенция различных признаков генетических аппаратов между некоторыми видами, относящимися к различным кладам простейших.

В то время, как строение геномов многих видов паразитических простейших изучено достаточно хорошо, того же нельзя сказать про их функциональные особенности, среди которых особенно выделяется регуляция экспрессии генов, в частности, посредством РНК-интерференции.

Несмотря на то, что направление активно развивается, и у части простейших предполагается либо экспериментально подтверждено наличие данного механизма, в ряде случаев, достаточно противоречивы. Кроме того, результаты многих исследований последних лет свидетельствуют о том, что нецелесообразно изучать механизм РНК-интерференции у паразитических простейших изолированно, вне системы «паразит-хозяин».

ЛИТЕРАТУРА

1. Агол И.И. Происхождение животных и человека. — 2-е изд. — Москва: [б. и.], 2012. — 200 с. — (Из наследия естественно-научной мысли: биология).
2. Буторина А.К., Калаев В.Н. Лекции по генетике человека: учебное пособие по курсу «Человек». — Воронеж: [б. и.], 2003. — 150 с.
3. Дунин И.М., Прудов А.И., Бороздин Э.К., Жигачев А.И. Современные проблемы генетики и селекции животных // Сельскохозяйственная биология. — 1987. — Т. 22, № 11. — С. 50–57.
4. Яковлев В.В. Происхождение человека на Земле. — СПб.: [б. и.], 2003. — 180 с.
5. Клёсов А.А., Тюняев А.А. Происхождение человека: по данным археологии, антропологии и ДНК-генеалогии. — Москва: [б. и.], 2010. — 320 с.
6. Захаров-Гезехус И.А. Сравнительная генетика животных: НИР: грант № НШ-3914.2008.4. — Москва: Совет по грантам Президента Российской Федерации, 2008. — 100 с.
7. Захаров-Гезехус И.А. Сравнительная генетика животных: НИР: грант № НШ-10122.2006.4. — Москва: Совет по грантам Президента Российской Федерации, 2006. — 90 с.
8. Клеточное и генетическое строение человека: иллюстрированный справочник. — Москва: [б. и.], 2009. — 250 с. — (Человеческое тело. Анатомия).
9. Клеточное и генетическое строение человека: самый полный справочник по анатомии человека. — Москва: [б. и.], 2008. — 280 с. — (Человеческое тело. Анатомия: иллюстрированный справочник).
10. Мяндина Г. И., Тарасенко Е.В. Биология: конспект лекций для иностранных студентов, обучающихся по специальности «Лечебное дело». — Москва: [б. и.], 2014. — 160 с.
11. Тетушкин Е.Я. Молекулярная и фенотипическая дивергенция приматов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук. — Москва: Институт общей генетики им. Н.И. Вавилова РАН, 2009. — 24 с.
12. Гнатик Е.Н. Генетика человека. Былое и грядущее. — Москва: [б. и.], 2007. — 210 с.
13. Актуальные проблемы генетики, селекции и воспроизводства сельскохозяйственных животных: сборник научных трудов. — Санкт-Петербург; Павловск: [б. и.], 2011. — 300 с.
14. Гендон Ю.З. Генетика вирусов человека и животных. — Москва: [б. и.], 1967. — 250 с.
15. Медникова М.Б. Современная концепция биологического вида и происхождение человека // Орус: Междисциплинарные исследования в археологии / ред. А.П. Бужилова. — Москва: [б. и.], 2008. — С. 141–152.

© Фокина Наталья Юрьевна (retrospector@yandex.ru); Гринев Александр Борисович (sagrinev@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПАТОГЕННЫЕ БАКТЕРИИ В ТЕРАПИИ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

PATHOGENIC BACTERIA IN ANTITUMOR THERAPY

**E. Sheyko
D. Sytnikov
O. Shihaleva**

Summary. There has been a resurgence of interest in the development of bacterial-based biotherapies for cancer in the last decade which is linked to advances in genetic engineering and a deep understanding of the mechanisms of infection and immunity. Cancer bacterial therapy can be used both as a monotherapy and in combination with other anti-cancer treatments to achieve the best clinical results. The purpose of this review is to consider the current status and prospects for the development and use of live pathogenic bacteria drugs for malignant tumors. The review presents data on the evaluation of experimental models of antitumor potential of different species and strains of bacteria; the most significant results of clinical trials of bacterial antitumor agents; modern directions of the construction of bacterial strains as means for targeted delivery of drug substances into tumors. We also discuss how various pathogenic bacteria have been modified with genetic engineering to develop the ability to cause tumor regression, and prospects for bacterial antitumor therapy. It was concluded that the development of bacterial agents for cancer therapy is a promising area of experimental oncology.

Keywords: oncological diseases; bacterial therapy; bacteriotherapy; bacteria targeting the tumor; cancer immunotherapy; therapeutic bacteria.

Шейко Елена Анатольевна

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет
имени В.И. Вернадского», г. Симферополь
lenasheyko@mail.ru

Сытников Денис Михайлович

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет», г. Севастополь
sytnikov@list.ru

Шихалева Олеся Константиновна

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет
имени В.И. Вернадского», г. Симферополь
Olesia230683@gmail.com

Аннотация. В последнее десятилетие отмечается возрождение интереса к разработке средств биотерапии онкологических заболеваний на основе бактерий, что связано с прогрессом в области генной инженерии и глубоким познанием механизмов инфекционного процесса и иммунитета. Для достижения лучших клинических результатов бактериальная терапия рака может использоваться как в качестве монотерапии, так и в сочетании с другими противораковыми методами лечения. Целью настоящего обзора является рассмотрение современного состояния и перспектив разработки и применения препаратов на основе живых патогенных бактерий, предназначенных для лечения злокачественных опухолей. В обзоре представлены данные оценки на экспериментальных моделях противоопухолевого потенциала различных видов и штаммов бактерий; наиболее значимые результаты клинических испытаний бактериальных противоопухолевых средств; современные направления конструирования бактериальных штаммов как средств адресной доставки лекарственных субстанций в опухоли. Мы также обсуждаем, как различные патогенные бактерии были модифицированы с помощью генной инженерии для развития способности вызывать регрессию опухоли, и перспективы бактериальной противоопухолевой терапии. Сделано заключение о том, что разработка бактериальных средств терапии рака является перспективным направлением экспериментальной онкологии.

Ключевые слова: онкологические заболевания; бактериальная терапия; бактериотерапия; бактерии, нацеленные на опухоль; иммунотерапия рака; лечебные бактерии.

Побочные эффекты химиотерапии, лучевой терапии и альтернативных методов лечения рака, включая токсичность для здоровых клеток, неспособность химиотерапевтических препаратов проникать в глубокие слои опухоли и постоянное повышение лекарственной устойчивости опухолевых клеток увеличили потребность в разработке альтернативных подходов терапии с большей селективностью и эффективностью против опухолевых клеток. Бактериальные средства лечения злокачественных новообразований известны уже более

ста лет благодаря работам доктора William Coley [1]. Несмотря на достигнутые положительные результаты, разработанный W. Coley способ лечения вскоре после его смерти был забыт, что связано с неспособностью ученых того времени объяснить механизм терапевтического действия и снизить риск побочных реакций. Этому способствовало также широкое внедрение в клиническую практику радио- и химиотерапии, которые надолго вытеснили бактериальные средства из поля зрения онкологов.

В последние годы, благодаря развитию новых технологий и методов получения аттенуированных штаммов бактерий, исследования были в основном сосредоточены на биохимических и молекулярных методах, с помощью которых можно использовать бактерии в борьбе с раком [2]. Бактерии представляют особый интерес из-за их естественной способности к передвижению, которая позволяет им проникать в гипоксические участки опухоли и впоследствии размножаться внутри опухолевых клеток. Это решает проблему, с которой обычно сталкиваются при использовании химиотерапевтических препаратов, которые достигают главным образом васкуляризованных внешних краев опухоли, но не гипоксического центра. Кроме того, бактерии могут быть генетически модифицированы для переноса и экспрессии терапевтических белков и опухоль-ассоциированных антигенов (ТАА), доставки генов или транспорта химиотерапевтических веществ [3]. Прямая доставка препаратов с помощью бактерий к месту локализации опухоли усиливает специфическую терапию, направленную на опухоль, и ограничивает негативные эффекты лечения [4]. Бактерии также можно использовать для синтеза терапевтических веществ внутри опухолевых клеток. Несмотря на то, что наше понимание методов лечения рака значительно расширилось, все еще остается необходимость поиска более перспективных способов, возможно, посредством использования известных микроорганизмов. В доклинических и клинических исследованиях различные виды бактерий показали свою эффективность в активации противоопухолевого иммунитета путем инициации врожденных и адаптивных иммунных реакций, что повысило шансы на элиминацию опухоли без дополнительных побочных эффектов [5, 6]. Микроорганизмы содержат множество механизмов, потенциально способных помочь в лечении рака, многие из которых нам еще предстоит открыть и детально изучить. В последнее время многие бактериальные терапевтические средства были реализованы в клинических испытаниях на людях (фаза I/II) [7; 8].

1. *Salmonella* spp. *Salmonella enterica* серовар *Typhimurium* (*S. typhimurium*) — граммотрицательная бактерия, вызывающая гастроэнтерит у людей. Известно, что *S. typhimurium* является одним из наиболее перспективных микроорганизмов в иммунотерапии рака. Во многих исследованиях по разработке терапии рака *S. typhimurium* использовалась как отдельная терапевтическая единица, так и в сочетании с другими классическими методами лечения (химиотерапия или лучевая терапия) [9]. *S. typhimurium* является факультативным анаэробом и, следовательно, способна колонизировать негипоксические и гипоксические опухоли. Сальмонеллу часто используют в терапии онкологических заболеваний из-за ее иммуностимулирующего действия, а также существует множество данных в литературе применения *S. typhimurium* в качестве адресной доставки

терапевтических препаратов в разные области опухоли. Например, Loeffler и др. показали, что генетически модифицированный штамм *S. typhimurium* способен экспрессировать проапоптотический Fas-лиганд или CCL21 и хемокин с противоопухолевыми свойствами. Использование этих белков показало ингибирование первичных опухолей и уменьшение метастазов на моделях рака молочной железы *in vivo* [10]. Кроме того, был создан генно-модифицированный штамм *S. typhimurium*, способный синтезировать с TNF-зависимый, индуцирующий апоптоз (TRAIL) лиганд, контролируемый прокариотическим радиационно-индуцируемым промотором RecA. Будучи естественным индуктором апоптоза и гибели опухолевых клеток, TRAIL является цитокином, используемым в терапии онкологических заболеваний. Применение полученного штамма *S. typhimurium in vivo* показало ингибирование роста опухоли молочной железы и существенно увеличило показатели выживаемости [11]. Другие гены, такие как цитоллизин (HlyE), были успешно экспрессированы у *S. enterica* sv. *Typhimurium* под регуляцией промотора, индуцируемого гипоксией. Было показано, что цитоллизин как порообразующий токсин эффективен при опухолях молочной железы у мышей при специфическом воздействии на гипоксические области опухоли. Yoon и др. исследовали показали возможные противоопухолевые свойства TNF- α капсулы *Salmonella*. TNF- α является хорошо известным провоспалительным фактором и промотором рака, и в этом исследовании он продемонстрировал противоопухолевые эффекты при оценке на модели рака молочной железы *in vivo* (TNBC) [12]. В своем исследовании Li и др. показали, что плазмиды, совместно экспрессирующие ENDO-VEG151 и siRNA сурвивина, были успешно перенесены в аттенуированный штамм *S. typhimurium* SL7207. Оба гена перспективны для использования в лечении рака, поскольку сурвивин является ингибитором апоптоза, а ENDO-VEG151 является промотором антиангиогенеза. Применение данного штамма на модели мышей показало подавление опухоли в 90 % случаев [13]. Однако это не единственные гены, которые были исследованы в экспериментах на животных с использованием *S. typhimurium*. В мышинной модели 4T1 TNBC *S. typhimurium* использовали для экспрессии и секреции TGF α -PE38, мощного иммунотоксина. TGF α -PE38 состоит из нескольких компонентов, включая трансформирующий фактор роста альфа (TGF α) и рецептор эпидермального фактора роста (EGFR). PE38 использовался из-за его общих цитотоксических свойств; однако EGFR специфичен для лечения рака, поскольку обнаружено, что примерно половина TNBC и воспалительного рака молочной железы (PMЖ) сверхэкспрессируют этот ген, демонстрируя ингибирование роста солидных опухолей [14]. В недавней публикации Mansour и др. использовали *Salmonella typhimurium* VNP-20009 (VNP) для доставки полипептида Laz, присущего группе бактерий *Neisseria*. Полипептид Laz проникает через гематоэнцефалический барьер при инфекциях, вызванных

Neisseria. Однако в этом исследовании авторы ограничили свою систему экспрессией терапевтического белка Laz в области гипоксической опухоли под индуцируемым гипоксией промотором HIP-1, выбрав Laz для нацеливания на гипоксические опухоли [15]. Штамм сальмонеллы (KST0650) был разработан как окситолерантный аттенуированный вариант родительского штамма KST0649 (Δ ptsI Δ crr) с применением технологии радиационной мутации (RMT). Было показано, что этот недавно разработанный штамм имел в 20 раз более высокую скорость репликации в линиях раковых клеток (CT26) и был сравнительно менее вирулентным, чем родительский штамм KST0649 [16]. Хотя сальмонелла обладает множеством характеристик, необходимых для целенаправленного лечения рака, существует ряд ограничений по применению данной бактерии в терапии, связанных с ее высокой вирулентностью. Несмотря на то, что технологии продвинулись до такой степени, что теперь мы достаточно понимаем бактерии, чтобы манипулировать ими и ослаблять их для альтернативного использования, еще многое предстоит понять и раскрыть о роли сальмонеллы в лечении рака, прежде чем она сможет стать основой терапии.

2. *Escherichia spp.* Доказано, что, как и сальмонелла, *Escherichia coli* (*E. coli*) обладает способностью поражать и колонизировать гипоксические области опухолей. Генно-инженерный штамм *E. coli* K-12, секретирующий цитотоксин A (ClyA), вводился однократно внутривенно мышам с карциномой толстой кишки CT26, метастазирующим TNBC 4T1 и меланомой B16 [17]. Известно, что *E. coli* и *S. enterica* продуцируют гемолитический белок ClyA, белок массой 34 кД, который индуцирует апоптоз за счет своей порообразующей активности. В этом исследовании введение *E. coli* K-12, экспрессирующей ClyA, первоначально значительно снижало скорость роста опухоли, но позже рост опухоли прогрессировал. Этот результат можно улучшить, применяя дополнительные дозировки лечения или комбинируя его с другими методами лечения. *E. coli* в дальнейшем использовалась в качестве объекта для производства другого бактериального токсина — гена порообразующего белка (α -гемолизина) из *Staphylococcus aureus* (SA). В течение 24 часов высвободился α -гемолизин, что привело к гибели 93 % клеток, при этом объем опухоли 4T1 уменьшился всего до 9 % жизнеспособной ткани. Chiang и др. в своих исследованиях показали роль биобутирата, полученного с помощью генно-модифицированного штамма EcN-BUT, в терапии онкологических заболеваний [18]. Совсем недавно эффективность *E. coli* была повторно оценена при лечении рака на различных моделях рака молочной железы и других раковых заболеваний. Zhang и др. в своих исследованиях 2018 г. показали способность *E. coli* Nissle 1917 (EcN) проникать и реплицироваться с образованием миниклеток в области опухоли, находящейся на границе некротизированной и нормальной тканей [19].

В эксперименте миниклетки EcN были нагружены доксорубицином, распространенным химиотерапевтическим препаратом, который ингибирует деление раковых клеток, блокируя фермент топоизомеразу. Кроме того, EcN был дополнительно связан с пептидом rHLIP, который используется для доставки химиотерапевтических препаратов без необходимости дальнейшей модификации. Было показано, что миниклетки эффективно убивают клетки MCF7 и 4T1 *in vitro*, а также успешно проникают в гипоксическую и некротическую опухолевую ткань у мышей, зараженных клетками 4T1. В другой работе был создан штамм *E. coli* для высвобождения однодоменного антитела (нанотела), тройного к CD47 внутри опухоли. CD47, также известный как интегрин-ассоциированный белок (IAP), представляет собой трансмембранный белок с множеством функций, одна из которых — помощь в разрушении поврежденных клеток. Этот штамм был успешно проверен на нескольких моделях рака *in vivo*, включая TNBC 4T1, меланому B16 и мышиную лимфому A20 с замедлением прогрессирования опухоли и увеличением уровня инфильтрирующих опухоль Т-клеток [20].

3. *Listeria spp.* Одним из наиболее популярных векторов для иммунотерапии рака является *Listeria monocytogenes*. Было высказано предположение, что использование листерий для доставки химиотерапевтических препаратов в глубокие слои опухоли является очень перспективным благодаря способности листерий подавлять фагоцитоз и доставлять плазменную ДНК в цитоплазму клетки [21]. Был создан штамм *L. monocytogenes*, конъюгированный с наночастицами, который эффективно экспрессирует GFP в солидных опухолях человека [22]. Способность *L. monocytogenes* внедряться и размножаться в клетках опухоли была продемонстрирована в моделях *in vivo* [23]. Kim и др. получили штамм *L. monocytogenes*, соединенный с опухолеассоциированными антигенами (TAA), специфичными к MAGE-B, которые представляют особый интерес при раке молочной железы. Это также было оценено при TNBC 4T1, где было подтверждено, что лечение MAGE-B уменьшает метастазы и способствует гибели опухолевых клеток *in vivo* [24]. Важной особенностью листерий, является наличие порообразующего белка, листериолизина О (LLO), который обеспечивает транспортировку молекул ДНК из эндосом в цитоплазму клеток-мишеней. Эффективность LLO в отношении доставки химиотерапевтических препаратов в клетки опухоли исследовалась различными способами. Так, была создана двухкомпонентная система, состоящая из нейтральной липосомы, специфичной к HER2, присоединенной к LLO в сочетании с конденсированной плазмидной ДНК с катионным полиэтиленгликолем (PEG) и модифицированным полилизинном (PL/ДНК). При проникновении в эндосому LLO способен нарушать целостность эндосомы, что приводит к доставке в цитоплазму и экспрессии плазмидной ДНК. В конечном итоге это приводит к увеличению экспрессии в HER2-

положительных линиях клеток рака молочной железы [25]. Альтернативно, микросферы полилактогликолевой кислоты (PLGA) были включены в LLO для оптимизации цитозольной доставки к клеткам-мишеням [26]. Показано, что фагоцитирующие клетки легко усваивают комбинацию микросфер с LLO, что, как следствие, приводит к увеличению экспрессии пептида-MHC-I на клеточной мембране. Кроме того, обработка культуры Т-клеток микросферами с LLO приводило к последующей активации цитотоксических Т-клеток. Кроме того, LLO использовался со специфической противоопухолевой терапией для оценки эффективности лечения рака. В одном из исследований LLO был связан с PEG-ассоциированным дисульфидом полилизина, кодирующим люциферазу, в сочетании с моноклональными антителами, трастузумаб. В этой системе LLO был необходим для молекул ДНК в цитоплазму, в то время как трастузумаб позволял воздействовать на рецепторы HER2 при раке молочной железы. Исследования на линиях клеток рака молочной железы MCF7 и MCF7/Her18 продемонстрировали повышенную экспрессию активности люциферазы, что указывает на успешную доставку генов в опухолевые клетки [27]. Совсем недавно листерию исследовали как возможный источник получения наночастиц, доставляющих химиотерапевтические препараты. Функциональные наночастицы были получены из самособираю-

щегося ДНК-связывающего белка *Listeria innocua* (LiDps) в голодающих клетках, а затем подверглись дальнейшим манипуляциям с добавлением люциферазы и цинк-(II)-протопорфирина IX (ZnPP). Онкогенные клетки продемонстрировали эффективное поглощение конъюгата Gluc-LiDps-ZnPP, который действует против опухолей, производя активные формы кислорода посредством биолюминесцентного резонансного переноса энергии (BRET). В конечном итоге это привело к значительному подавлению миграции выживших клеток рака молочной железы SKBR3 [28]. Благодаря достижениям в области изучения листерий, эта бактерия стала самой перспективной в поиске более эффективных систем лечения.

Таким образом, применение бактерий в качестве основы для создания средств терапии онкологических заболеваний обладает существенными достоинствами, так как обеспечивает возможность одновременно прямой доставки и регулируемой экспрессии синтеза терапевтических субстанций непосредственно в опухолевой ткани. Полученные к настоящему времени результаты доклинических исследований и первых попыток использования бактерий для лечения больных позволяют считать, что разработка бактериальных средств терапии рака является перспективным направлением экспериментальной онкологии.

ЛИТЕРАТУРА

- McCarthy E.F. The toxins of William B. Coley and the treatment of bone and soft-tissue sarcomas / E.F. McCarthy // *Iowa Orthop. J.* — 2006. — Vol. 26. — P. 154–158.
- Lin I.Y. Live-Attenuated Bacterial Vectors: Tools for Vaccine and Therapeutic Agent Delivery / I.Y. Lin, T.T. Van, P.M. Smooker // *Vaccines.* — 2015. — N 3. — P. 940–972.
- Gardlik R., Fruehauf J.H. Bacterial vectors and delivery systems in cancer therapy // *IDrugs.* — 2010. — N 13. — P. 701–706.
- Łukasiewicz K. Microorganisms in the Treatment of Cancer: Advantages and Limitations / K. Łukasiewicz // *J. Pol. Immunol. Res.* — 2018. — Vol. 23. — P. 978–1008.
- Kalaora S. Identification of bacteria-derived HLA-bound peptides in melanoma / S. Kalaora, A. Nagler, D. Nejman, M. Alon, C. Barbolin, E. Barnea, S.L.C. Ketelaars, K. Cheng, K. Vervier, N. Shental // *Nature.* — 2021. — Vol. 592. — P. 138–143.
- Antonelli A.C. Bacterial immunotherapy for cancer induces CD4-dependent tumor-specific immunity through tumor-intrinsic interferon—signaling / A.C. Antonelli, A. Binyamin, T.M. Hohl, M.S. Glickman, G. Redelman-Sidi // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* — 2020. — N 117. — P. 18627–18637.
- Chen W. Bacteria-Driven Hypoxia Targeting for Combined Biotherapy and Photothermal Therapy / W. Chen, Y. Wang, M. Qin, X. Zhang, Z. Zhang, X. Sun, Z. Gu // *ACS Nano.* — 2018. — Vol. 12. — P. 5995–6005.
- Fritz S.E. A phase I clinical study to evaluate safety of orally administered, genetically engineered *Salmonella enterica* serovar Typhimurium for canine osteosarcoma / S.E. Fritz, M.S. Henson, E. Greengard, A.L. Winter, K.M. Stuebner, U. Yoon, V.L. Wilk, A. Borgatti, L.B. Augustin, J.F. Modiano // *Vet. Med. Sci.* — 2016. — Vol. 2. — P. 179–190.
- Mi Z. *Salmonella*-Mediated Cancer Therapy: An Innovative Therapeutic Strategy / Z. Mi, Z.C. Feng, C. Li, X. Yang, M.T. Ma, P.F. Rong // *J. Cancer.* — 2019. — N 10. — P. 4765–4776.
- Loeffler M. Inhibition of tumor growth using salmonella expressing Fas ligand / M. Loeffler, G. Le'Negrate, M. Krajewska, J.C. Reed. // *J. Natl. Cancer Inst.* — 2008. — Vol. 100. — P. 1113–1116.
- Ganai S. Tumour-targeted delivery of TRAIL using *Salmonella typhimurium* enhances breast cancer survival in mice / S. Ganai, R.B. Arenas, N.S. Forbes. // *Br. J. Cancer.* — 2009. — Vol. 101. — P. 1683–1691.
- Yoon W.S. Antitumor therapeutic effects of a genetically engineered *Salmonella typhimurium* harboring TNF- α in mice / W.S. Yoon, Y.S. Chae, J. Hong, Y.K. Park // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* — 2011. — Vol. 89. — P. 1807–1819.
- Li Z. Recombinant attenuated *Salmonella typhimurium* carrying a plasmid co-expressing ENDO-VEG151 and survivin siRNA inhibits the growth of breast cancer in vivo / Z. Li, P.H. Yin, S.S. Yang, Q.Y. Li, T. Chang, L. Fang, L.X. Shi, G.E. Fang // *Mol. Med. Rep.* — 2013. — Vol. 7. — P. 1215–1222.
- Lim D. Anti-tumor activity of an immunotoxin (TGF α -PE38) delivered by attenuated *Salmonella typhimurium* / D. Lim, K.S. Kim, H. Kim, K.C. Ko, J.J. Song, J.H. Choi, M. Shin, J.J. Min, J.H. Jeong, H.E. Choy // *Oncotarget.* — 2017. — Vol. 8. — P. 37550–37560.

15. Mansour M. Bacterial delivery of the anti-tumor azurin-like protein Laz to glioblastoma cells / M. Mansour, S.I. Smail, K. Abou-Aisha // *AMB Express*. — 2020. — Vol. 10. — P. 59–67.
16. Gao S. Development of Oxytolerant *Salmonella typhimurium* Using Radiation Mutation Technology (RMT) for Cancer Therapy / S. Gao, J.H. Jung, S.M. Lin, A.Y. Jang, Y. Zhi, K. Bum Ahn, H.J. Ji, J. Hyang Lim, H. Guo, H.E. Choy // *Sci. Rep.* — 2020. — Vol. 10. — P. 37–64.
17. Jiang S.N. Inhibition of tumor growth and metastasis by a combination of *Escherichia coli*-mediated cytolytic therapy and radiotherapy / S.N. Jiang, T.X. Phan, T.K. Nam, V.H. Nguyen, H.S. Kim, H.S. Bom, H.E. Choy, Y. Hong, J.J. Min // *Mol. Ther.* — 2010. — Vol. 18. — P. 635–642.
18. Chiang C.-J. In situ delivery of biobutyrates by probiotic *Escherichia coli* for cancer therapy / C.-J. Chiang, Y.-H. Hong // *Sci. Rep.* — 2021. — Vol. 11. P. 181 — 192.
19. Zhang Y.E. coli Nissle 1917—Derived Minicells for Targeted Delivery of Chemotherapeutic Drug to Hypoxic Regions for Cancer Therapy / Y. Zhang, W. Ji, L. He, Y. Chen, X. Ding, Y. Sun, S. Hu, H. Yang, W. Huang, Y. Zhang // *Theranostics*. — 2018. — Vol. 8. — P. 1690–1705.
20. Chowdhury S. Programmable bacteria induce durable tumor regression and systemic antitumor immunity / S. Chowdhury, S. Castro, C. Coker, T.E. Hinchliffe, N. Arpaia, T. Danino // *Nat. Med.* — 2019. — Vol. 25. — P. 1057–1063.
21. Wood L.M. Attenuated *Listeria monocytogenes*: A powerful and versatile vector for the future of tumor immunotherapy / L.M. Wood, Y. Paterson // *Front. Cell Infect. Microbiol.* — 2014. — Vol. 4. P. 51–64.
22. Akin D. Bacteria mediated delivery of nanoparticles and cargo into cells / D. Akin, J. Sturgis, K. Ragheb, D. Sherman, K. Burkholder, J.P. Robinson, A.K. Bhutia, S. Mohammed, R. Bashir // *Nat. Nanotechnol.* — 2007. — Vol. 2. — P. 441–449.
23. van Pijkeren J.P. A novel *Listeria monocytogenes*-based DNA delivery system for cancer gene therapy / J.P. van Pijkeren, D. Morrissey, I.R. Monk, M. Cronin, S. Rajendran, G.C. O'Sulli, C.G. van Gahan, M. Tangney // *Hum. Gene Ther.* — 2010. Vol. 21. P. 405–416.
24. Kim Y.J. Development of *Lactobacillus kimchicus* DCY51(T)-mediated gold nanoparticles for delivery of ginsenoside compound K: In vitro photothermal effects and apoptosis detection in cancer cells / Y.J. Kim, H. Perumalsamy, J. Markus, S.R. Balusamy, C. Wang, S. Ho Kang, S. Lee, S.Y. Park, S. Kim, V. Castro-Aceituno // *Artif. Cells Nanomed. Biotechnol.* — 2019. — N 47. — P. 30–44.
25. Kullberg M. Gene delivery to Her-2+ breast cancer cells using a two-component delivery system to achieve specificity / M. Kullberg, R. McCarthy, T.J. Anchordoquy. // *Nanomedicine*. — 2014. — Vol. 10. — P. 1253–1262.
26. Gilert A. PLGA-Listeriolysin O microspheres: Opening the gate for cytosolic delivery of cancer antigens / A. Gilert, L. Baruch, T. Bronshtein, M. Machluf // *Biomed. Microdevices*. — 2016. — Vol. 18. — P. 23–33.
27. Mann K. Trastuzumab-targeted gene delivery to Her2-overexpressing breast cancer cells / K. Mann, M. Kullberg // *Cancer Gene Ther.* — 2016. Vol. 23. — P. 221–228.
28. Al-Ani A.W. *Listeria innocua* Dps as a nanoplatfor for bioluminescence based photodynamic therapy utilizing *Gaussia princeps* luciferase and zinc protoporphyrin IX / A.W. Al-Ani, L. Zhang, L. Ferreira, L. Turyanska, T.D. Bradshaw, N.R. Thomas // *Nanomedicine*. — 2019. — Vol. 20. P. 102–118.

© Шейко Елена Анатольевна (lenasheyko@mail.ru); Сытников Денис Михайлович (sytnikov@list.ru);

Шихалева Олеся Константиновна (Olesia230683@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

К ИССЛЕДОВАНИЮ КВАЗИГАРМОНИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛЯТОРА ТИПА ВАН-ДЕР-ПОЛЯ МЕТОДОМ ПРИБЛИЖЕННЫХ ТОЧЕЧНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ

TO STUDY A QUASI-HARMONIC OSCILLATOR OF THE VAN DER POL TYPE BY THE METHOD OF APPROXIMATE POINT MAPPINGS

**O. Antonovskaya
A. Besklubnaya**

Summary. Oscillators are widely used in nature and technology. When considering nonlinear oscillators, it becomes necessary to use asymptotic methods, since, as a rule, there are no exact methods for solving the corresponding differential equations. This article presents the main points of application of the method of approximate point mappings to the study of the dynamics of a quasi-harmonic oscillator of the Van der Pol type. The approximate point mapping is based on the method of successive approximations. Since the sequence functions of the constructed point mapping are explicit, the problem admits of an analytical solution. And the question of the existence of a periodic solution for a quasi-harmonic oscillator is solved as a question of the existence for an approximately constructed point mapping fixed points with one or another type of stability.

Keywords: quasi-harmonic oscillator, point mapping method, phase space, secant plane, asymptotic research methods.

Антоновская Ольга Георгиевна

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

Бесклубная Антонина Вячеславовна

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

Аннотация. Осцилляторы получили широкое распространение в природе и технике. При рассмотрении нелинейных осцилляторов возникает необходимость применения асимптотических методов, поскольку, как правило, точных методов решения соответствующих дифференциальных уравнений не существует. В настоящей статье излагаются основные моменты применения метода приближенных точечных отображений к изучению динамики квазигармонического осциллятора типа Ван-дер-Поля. Приближенное точечное отображение строится на основе метода последовательных приближений. Поскольку функции последования построенного точечного отображения являются явными, задача допускает аналитическое решение. А вопрос о существовании у квазигармонического осциллятора периодического решения решается как вопрос существования у приближенно построенного отображения неподвижных точек с тем или иным характером устойчивости.

Ключевые слова: квазигармонический осциллятор, метод точечных отображений, фазовое пространство, секущая плоскость, асимптотические методы исследования.

Введение

Сегодня нет необходимости специально обосновывать значение колебательных процессов в современной физике и технике. Невозможно найти такой области этих наук, где колебания не играли бы той или иной роли. Более того, ряд областей физики и техники всецело базируется на колебательных явлениях. И здесь прежде всего следует отметить радиотехнику [1]. При этом анализ колебательных явлений показал, что между колебаниями различной физической природы очень много общего. Конкретные колебательные системы, с которыми приходится иметь дело специалистам

в технике совершенно различны, однако колебательно-волновые явления и процессы в них происходящие, подчиняются общим закономерностям и описываются едиными колебательными моделями.

Следует отметить, что до сих пор особый интерес представляет изучение систем, близких к гармоническому осциллятору (квазигармонический осциллятор [1, С.659-663], [2, С. 19-21]. Одним из важных достоинств такой системы является возможность использовать хорошо известные свойства процессов колебаний гармонического осциллятора с медленно меняющейся частотой в различного вида задачах: от задач обработки сигналов

[3] до изучения поведения морских динамических систем [4] и исследования неравновесных экономических систем [5].

В настоящей работе приводится пример исследования квазигармонического осциллятора с полиномиальной нелинейностью методом приближенных точечных отображений [6], [7]. Вопрос о его синхронизации сводится к решению вопроса о существовании неподвижных точек точечного отображения [8], при построении которого используются асимптотические методы. Обсуждается вопрос о локальной применимости результатов приближенного исследования.

Как показано в работах [6], [7], при изучении динамики синхронизируемого осциллятора, описываемого уравнением

$$\ddot{x} + x = \mu f\left(x, \dot{x}, \frac{t}{p}\right), \quad (1)$$

в котором $0 < \mu \ll 1$, а $2p\pi$ — период внешней силы, методом точечных отображений [8], исследование поведения траекторий (1) может быть сведено к исследованию поведения траекторий точечного отображения T секущей поверхности $t = \left[\frac{t}{2p\pi}\right] 2p\pi$ фазового пространства $x, y = \dot{x}, t$ в себя [6], порожденного траекториями системы. При этом с точностью до величин порядка μ^2 точечное отображение T может быть приближенно представлено с помощью точечного отображения \tilde{T} с функциями последования

$$\tilde{x} = \left[x_0 - \mu F_1(x_0, y_0) \right] \cos 2p\pi + \left[y_0 + \mu F_2(x_0, y_0) \right] \sin 2p\pi, \quad (2)$$

$$\tilde{y} = -\left[x_0 - \mu F_1(x_0, y_0) \right] \sin 2p\pi + \left[y_0 + \mu F_2(x_0, y_0) \right] \cos 2p\pi, \quad (3)$$

где

$$F_1(x_0, y_0) = \int_0^{2p\pi} f\left(x_0 \cos t + y_0 \sin t, -x_0 \sin t + y_0 \cos t, \frac{t}{p}\right) \sin t dt, \quad (4)$$

$$F_2(x_0, y_0) = \int_0^{2p\pi} f\left(x_0 \cos t + y_0 \sin t, -x_0 \sin t + y_0 \cos t, \frac{t}{p}\right) \cos t dt. \quad (5)$$

Заметим, что формулы (2)–(5) явные, поэтому изучение условий существования синхронного режима может быть проведено с помощью изучения условий существования и характера устойчивости простой неподвижной точки $\tilde{x} = x_0 = x^*$, $\tilde{y} = y_0 = y^*$ приближенного точечного отображения \tilde{T} .

Одним из наиболее интересных примеров в этой области является уравнение Ван-дер-Поля с малым периодическим возмущением. Небольшая модификация электрической схемы, использованной Ван-дер-Полем [9] приводит к уравнению

$$\ddot{x} + x = \mu \left[\xi x + \eta \dot{x} + 2\beta x^2 + (\dot{x}^2 + x^2 - \beta x^4) \dot{x} + A \cos t \right], \quad (6)$$

где $0 < \mu \ll 1$, $\beta > 0$, $A > 0$, или, если ввести $y = \dot{x}$, системе двух уравнений первого порядка

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y, \\ \dot{y} &= -x + \mu \left[\xi x + \eta y + 2\beta x^2 + (x^2 + y^2 - \beta x^4) y + A \cos t \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Задача состоит в нахождении условий существования y (7) периодического решения с периодом 2π .

Функции последования точечного отображения \tilde{T} , приближающего точечное отображение T секущей поверхности $t = \left[\frac{t}{2\pi}\right] 2\pi$ фазового пространства $x, y = \dot{x}, t$ в себя, порожденного траекториями системы (7), с точностью до величин порядка μ^2 будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= x_0 + \mu \pi \left[x_0 \left(\eta + (x_0^2 + y_0^2) - \frac{\beta}{8} (x_0^2 + y_0^2)^2 \right) - \xi y_0 \right], \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \tilde{y} &= y_0 + \mu \pi \left[y_0 \left(\eta + (x_0^2 + y_0^2) - \frac{\beta}{8} (x_0^2 + y_0^2)^2 \right) + \xi x_0 + A \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Условия существования неподвижной точки отображения (8)–(9) определяют соотношения

$$\begin{aligned} x^* &= -\frac{A\xi}{\left(\eta + \rho - \frac{\beta\rho^2}{8}\right)^2 + \xi^2}, \\ y^* &= -\frac{A\left(\eta + \rho - \frac{\beta\rho^2}{8}\right)}{\left(\eta + \rho - \frac{\beta\rho^2}{8}\right)^2 + \xi^2}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\rho = x^{*2} + y^{*2} > 0$ находится из уравнения

$$\rho \left[\left(\eta + \rho - \frac{\beta\rho^2}{8} \right)^2 + \xi^2 \right] = A^2. \quad (11)$$

То есть факт существования неподвижных точек отображения (8)–(9) определяется фактом существования корней $\rho > 0$ уравнения (11). Детальный анализ уравнения (11) позволяет получить картину резонансных кривых при различных значениях параметров системы (см., например, рисунок 1). При малых значениях A следует

ожидать существование двух ветвей резонансной кривой, одна из которых является замкнутой. При увеличении A эти ветви, сближаясь сливаются в одну, т.е. образуется одна незамкнутая ветвь резонансной кривой.

Устойчивость неподвижных точек точечного отображения \tilde{T} в случае их существования, определяется корнями характеристического полинома

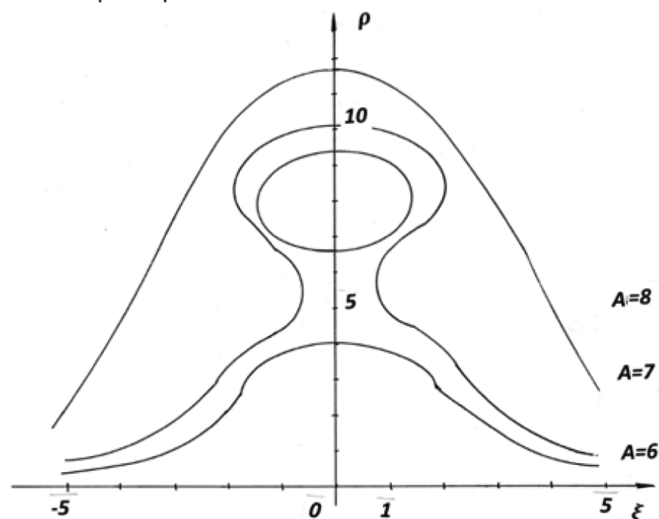


Рис. 1. Примерный вид резонансных кривых при $\eta = 1, \beta = 1$

$$P(z) = \left[z - \left(1 + \mu \pi \left(\eta + 2\rho - \frac{3\beta\rho^2}{8} \right) \right) \right]^2 + (\mu\pi)^2 \left(\xi^2 - \left(\frac{\beta\rho^2}{4} - \rho \right)^2 \right). \quad (12)$$

Поэтому границы области устойчивости $N_+(z=1)$, $N_-(z=-1)$ и $N_\phi(z=\pm e^{i\phi})$, определяются, соответственно, уравнениями:

$$\left(\eta + \rho - \frac{\beta\rho^2}{8} \right) \left(\eta + 3\rho - \frac{5\beta\rho^2}{8} \right) + \xi^2 = 0, \quad (13)$$

$$\left[2 + \mu \pi \left(\eta + \rho - \frac{\beta\rho^2}{8} \right) \right] \left[2 + \mu \pi \left(\eta + 3\rho - \frac{5\beta\rho^2}{8} \right) \right] + (\mu\pi)^2 \xi^2 = 0, \quad (14)$$

$$\left[\left(1 + \mu \pi \left(\eta + 2\rho - \frac{3\beta\rho^2}{8} \right) \right) \right]^2 + (\mu\pi)^2 \left(\xi^2 - \left(\frac{\beta\rho^2}{4} - \rho \right)^2 \right) = 1. \quad (15)$$

Кривые (13)–(14) являются замкнутыми и располагаются в ограниченной части плоскости, которая расширяется при $\mu \rightarrow +0$. Граница (15) соединяет точки их касания с границей N_ω

$$\xi^2 - \left(\frac{\beta\rho^2}{4} - \rho \right)^2 = 0, \quad (16)$$

соответствующей уходу пары корней характеристического полинома с действительной оси. Границы D -разбиения с соответствующей штриховкой в сторону выхода корней характеристического уравнения из единичного круга приведены на рисунке 2. Однократная штриховка соответствует бифуркации корней на действительной оси, двойная — бифуркации комплексно-сопряженных корней. Область $D=0$ есть область устойчивости.

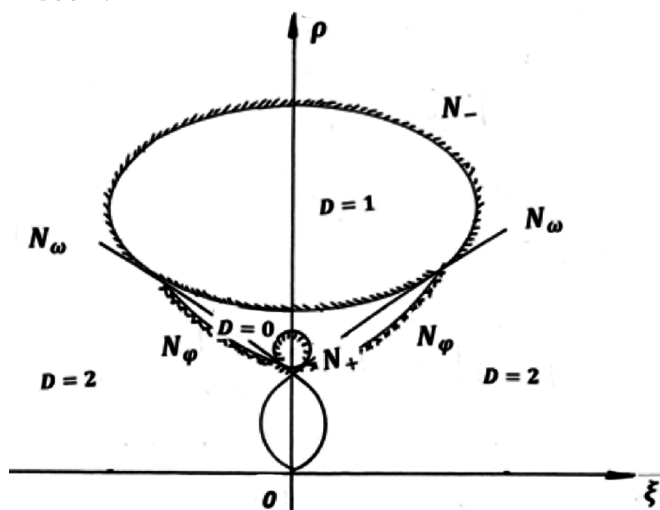
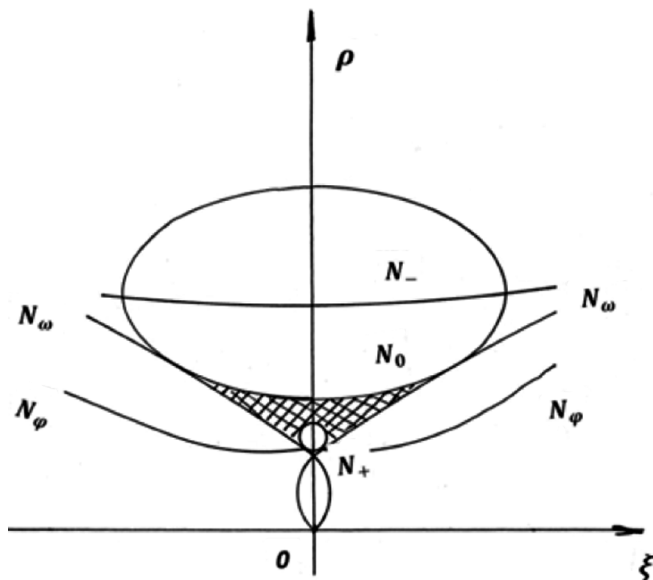
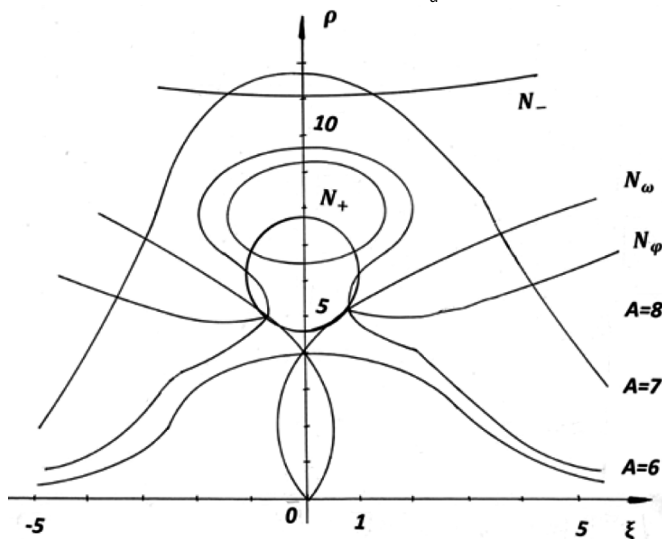


Рис. 2. Примерный вид границ D -разбиения при малых μ

Внутри области устойчивости можно выделить область аperiodической устойчивости D_a ($0 < z_{1,2} < 1$), которая располагается между границами N_+ и $N_0(z=0)$

$$\left[1 + \mu \pi \left(\eta + \rho - \frac{\beta\rho^2}{8} \right) \right] \left[1 + \mu \pi \left(\eta + 3\rho - \frac{5\beta\rho^2}{8} \right) \right] + (\mu\pi)^2 \xi^2 = 0, \quad (17)$$

а по бокам ограничена ветвями границы N_ω (рисунок 3). Именно для значений параметров из этой области следует ожидать аperiodических переходных процессов в системе, поскольку, как только хотя бы один из корней характеристического уравнения становится отрицательным, или же пара их уходит с действительной оси [10, с. 40–51], в системе возникает колебательность того или иного рода. Факт существования у отображения \tilde{T} неподвижных точек с некоторым характером устойчивости при $A = \text{const}$ и различных ξ может быть решен наложением картины существования неподвижных точек с различным характером устойчивости на плоскости ξ, ρ при заданном μ на плоскость с резонансной кривой при заданном A (рисунок 4).

Рис. 3. Область D_a Рис. 4. Наложение картины резонансных кривых на плоскость с границами области устойчивости при $\eta = 1, \beta = 1, \mu\pi = 0,05$

Кроме того, следует отметить, что для нелинейностей, входящих функции последования отображения \tilde{T} , имеет место соотношение

$$(\mu\pi)^2 \left[\left(x_0 \left(\eta + (x_0^2 + y_0^2) - \frac{\beta}{8} (x_0^2 + y_0^2)^2 \right) \right)^2 + \right. \\ \left. + \left(y_0 \left(\eta + (x_0^2 + y_0^2) - \frac{\beta}{8} (x_0^2 + y_0^2)^2 \right) \right)^2 \right] = \\ = (\mu\pi)^2 (x_0^2 + y_0^2) \left(\eta + (x_0^2 + y_0^2) - \frac{\beta}{8} (x_0^2 + y_0^2)^2 \right)^2, (18)$$

причем выражение в (18) при $(x_0^2 + y_0^2) \rightarrow +\infty$ стремится к бесконечности быстрее, чем $(x_0^2 + y_0^2)$. А значит [11] бесконечность в приближенной модели является устойчивой, а устойчивый режим в случае его существования имеет ограниченную область притяжения, которая расширяется при $\mu \rightarrow +0$.

Заключение

Следует отметить, что поведение системы (2) исследовалось с помощью асимптотического метода, каковым является метод приближенных точечных отображений, поскольку при построении приближенного точечного отображения используется метод Ван-дер-Поля [2, С. 371] и метод последовательных приближений. То есть актуальным является вопрос о применимости результатов приближенного исследования, а значит об обосновании метода приближенных точечных отображений, как асимптотического метода. Такое обоснование дано в работе [12], то есть можно вести речь о совпадении (по крайней мере, локальном) разбиений фазовых пространств на траектории при малых значениях параметра μ .

ЛИТЕРАТУРА

1. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. — М.: Физматгиз, 1959. — 915 с.
2. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. — М.: Наука, 1974. — 504 с.
3. Журавлев В.М., Миронов П.П., Летунев С.В. Построение огибающей и локальной частоты стохастического процесса на основе модели осциллятора с флуктуирующей частотой. // Изв. Вузов. Поволжский регион. Физико-математические науки. — 2013. — № 3(27). — С.159–169.
4. Ковалев Д.П., Ковалев П.Д. Хаотические колебания, бифуркация и синхронизация в морских динамических системах. — Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2021. — 114 с.
5. Ивинская Е.Ю. Теоретические аспекты исследования неравновесных экономических систем на основе модели гармонического осциллятора. // Теория и практика общественного развития. Экономические науки. — 2015. — № 21. — С. 57–59.
6. Антоновская О.Г. О влиянии насыщения нелинейности на результаты исследования принудительной синхронизации методом приближенных точечных отображений. // Математическое моделирование и оптимальное управление. Вестник ННГУ. — Нижний Новгород: ННГУ, 1999. — № 2(21). — С.198–208.
7. Антоновская О.Г., Зайцева М.Н. Об одном случае исследования принудительной синхронизации методом приближенных точечных отображений. // Международный научно-исследовательский журнал. — 2018. — № 8(74). — С. 7–14.
8. Неймарк Ю.И. Метод точечных отображений в теории нелинейных колебаний. — М.: Наука, 1972. — 472 с.

9. Калякин Л.А. Анализ модели синхронизации в неизохронной системе. // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2010. — Т. 50. — № 8. — С. 1408–1419.
10. Косякин А.А., Шамриков Б.М. Колебания в цифровых автоматических системах. — М.: Наука, 1983. — 336 с.
11. Антоновская О.Г., Бесклубная А.В. О влиянии характера нелинейности на результаты исследования синхронизации квазигармонического осциллятора методом приближенных точечных отображений. // Международный научно-исследовательский журнал. — 2021. — № 1(103). — С. 22–29.
12. Антоновская О.Г. Метод последовательных приближений в оценке близости приближенного и точного точечных отображений при учете неизохронности процессов в динамике систем ИФАПЧ. // Вестник ННГУ, Нижний Новгород. — 2013. — № 5(1). — С. 210–212.

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

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛНОВОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ

INVESTIGATION OF NUMERICAL METHODS FOR MODELING WAVEGUIDE PROPAGATION

V. Biryukov

Summary. The paper studies numerical methods for solving waveguide problems generated by a system of Maxwell's equations with given boundary conditions. The aim of the work was to develop and compare the finite-difference method and the finite element method modeling the propagation of eigensurface waves in a cylindrical dielectric weakly directional waveguide.

To achieve this goal, we described a mathematical model based on Maxwell's equations, implemented the methods and conducted a computational experiment in the Maple environment, compared the results in terms of accuracy, stability and computational costs, and analyzed the influence of geometry and model parameters.

We assumed that both methods provide comparable accuracy, but differ in stability and computational costs depending on the complexity of the geometry and model parameters.

The obtained values of the eigenfunction of both methods are in good agreement with each other, which is confirmed by the constructed graphs, allowing a visual comparison of the behavior of the solutions. It was found that the finite difference method is effective for simple geometry and requires fewer computational resources, while the finite element method is more versatile and stable when modeling in areas with complex boundaries.

Keywords: waveguides, Maxwell's equation, finite element method, finite difference method.

Бирюков Владислав Олегович

Аспирант, Российский университет дружбы народов
имени Патриса Лумумбы, г. Москва
vobiryukov12@gmail.com

Аннотация. В работе исследовали численные методы решения волноводных задач, порожденных системой уравнений Максвелла с заданными граничными условиями. Целью работы была разработка и сравнительный анализ конечно-разностного метода и метода конечных элементов, моделирующих распространение собственных поверхностных волн в цилиндрическом диэлектрическом слабонаправленном волноводе.

Для достижения поставленной цели описали математическую модель на основе уравнений Максвелла, реализовали методы и провели вычислительный эксперимент в среде Maple, сравнили результаты по точности, устойчивости и вычислительным затратам, проанализировали влияние геометрии и параметров модели.

Мы предположили, что оба метода обеспечивают сопоставимую точность, однако различаются по устойчивости и вычислительным затратам в зависимости от сложности геометрии и параметров модели.

Полученные значения собственной функции обоих методов хорошо согласуются между собой, что подтверждают построенные графики, позволяющие визуально сравнить поведение решений. Выявлено, что конечно-разностный метод эффективен при простой геометрии и требует меньших вычислительных ресурсов, тогда как метод конечных элементов более универсален и устойчив при моделировании в областях со сложной границей.

Ключевые слова: волноводы, уравнение Максвелла, метод конечных элементов, конечно-разностный метод.

Введение

Исследование систем, способных передавать волны в определенном направлении, называемых волноводами, проводится давно, но наибольший интерес к ним появился в связи с прогрессом в областях радиофизики и оптоэлектроники. А с развитием вычислительной техники и численных методов возникла возможность решать уравнения Максвелла численно. Уравнения Максвелла являются исходной точкой в задачах математического моделирования электромагнитных явлений. Эти уравнения, сформулированные более чем сто пятьдесят лет назад, по-прежнему востребованы среди инженеров и ученых по всему миру. Применяя подходящие граничные условия и вводя параметры среды в эти уравнения, можно моделировать распространение излучения в разнообразных средах.

Для решения уравнений Максвелла используется конечно-разностный метод в основе которого лежит дискретизация вычислительной области по временным и пространственным переменным и метод конечных элементов, применение которого сводит решение исходной задачи к решению системы алгебраических уравнений.

Целью работы является исследование и реализация конечно-разностного метода и метода конечных элементов, моделирующих распространение собственных поверхностных волн в цилиндрическом диэлектрическом слабонаправленном волноводе и проведение сравнительного вычислительного эксперимента в среде Maple для анализа точности, устойчивости и эффективности.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- Реализовать численные методы и провести вычислительный эксперимент в среде Maple
- Сравнить полученные численные результаты и оценить точность и эффективность каждого метода
- Построить графики значений собственной функции для визуального сопоставления/

1. Постановка задачи

Математическая модель задач волноводной дифракции описывается системой уравнений Максвелла:

$$\operatorname{rot} \tilde{\mathbf{E}} + i\omega \tilde{\mathbf{B}} = 0; \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \tilde{\mathbf{H}} - i\omega \tilde{\mathbf{D}} - \tilde{\mathbf{J}} = \tilde{\mathbf{J}}_0; \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \tilde{\mathbf{D}} = \rho; \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \tilde{\mathbf{B}} = 0; \quad (4)$$

$$\operatorname{div} \tilde{\mathbf{J}} - i\omega \rho = 0. \quad (5)$$

Или в линейном случае:

$$\tilde{\mathbf{D}} = \varepsilon \tilde{\mathbf{E}}; \quad (6)$$

$$\tilde{\mathbf{B}} = \mu \tilde{\mathbf{H}}; \quad (7)$$

$$\tilde{\mathbf{J}} = \delta \tilde{\mathbf{E}}. \quad (8)$$

Здесь введены следующие обозначения: $\tilde{\mathbf{E}}$ — напряженность электрического поля; $\tilde{\mathbf{D}}$ — электрическая индукция; $\tilde{\mathbf{H}}$ — напряженность магнитного поля; $\tilde{\mathbf{B}}$ — магнитная индукция; $\tilde{\mathbf{J}}$ — плотность тока; $\tilde{\mathbf{J}}_0$ — плотность тока источника; ρ — плотность электрических зарядов; ω — циклическая частота; ε — диэлектрическая проницаемость; μ — магнитная проницаемость; δ — электрическая проводимость.

Из (3), (5), (6) и (8) получим:

$$\operatorname{div}((\delta + i\omega\varepsilon)\tilde{\mathbf{E}}) = 0.$$

Учитывая (6)–(8), уравнения (1) и (2) получим уравнения второго порядка относительно $\tilde{\mathbf{E}}$

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{E}} + k^2 \tilde{\mathbf{E}} = -i\omega \tilde{\mathbf{J}}_0, \quad (9)$$

где $k^2 = i\omega\delta - \omega^2\varepsilon$.

Полагается, что на границе под областей Γ будут выполняться условия непрерывности:

$$[\tilde{\mathbf{n}} \times \tilde{\mathbf{E}}]_{\Gamma} = 0; \quad (10)$$

$$[\tilde{\mathbf{n}} \cdot (\delta + i\omega\varepsilon)\tilde{\mathbf{E}}]_{\Gamma} = 0. \quad (11)$$

Для определенности будем предполагать, что область ограничена идеально проводящим материалом, т.е. выполняется условие

$$[\tilde{\mathbf{n}} \times \tilde{\mathbf{E}}]_{\partial\Omega} = 0. \quad (12)$$

2. Методы

2.1. Метод конечных элементов

Методы конечных элементов претерпели значительные изменения, но по-прежнему в значительной степени подходят для численного моделирования в областях, характеризующихся простой геометрией (например, декартовой, цилиндрической или сферической). Тем не менее, растущие потребности фундаментальных и прикладных исследований требуют применения уравнений Максвелла для моделирования электромагнитных полей в областях со сложной геометрией границ [Mehdiyeva, Vagif, Mehriban, 2020]. Для решения этой задачи появились универсальные алгоритмы, использующие неструктурированные сетки в области моделирования [Абгарян, Хайбуллин, Шипило, 2022]. Эти алгоритмы используют либо метод конечных объемов, либо метод конечных элементов для численной дискретизации исходных уравнений Максвелла [Неведров, Пульников, Паньков, Матарыкин, 2024].

Для описания метода конечных элементов решения уравнения Максвелла рассмотрим векторную вариационную постановку.

Для области Ω введем пространства следующего вида:

$$H(\operatorname{rot}; \Omega) = \left\{ \tilde{\mathbf{v}} \in [L^2(\Omega)]^3 : \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{v}} \in [L^2(\Omega)]^3 \right\},$$

$$H_0(\operatorname{rot}; \Omega) = \left\{ \tilde{\mathbf{v}} \in [L^2(\Omega)]^3 : \tilde{\mathbf{v}} \times \tilde{\mathbf{n}}|_{\Gamma} = 0 \right\}$$

$$\text{с нормой } \|\tilde{\mathbf{u}}\|_{\operatorname{rot}, \Omega}^2 = \int_{\Omega} \tilde{\mathbf{u}} \cdot \tilde{\mathbf{v}}^* d\Omega + \int_{\Omega} \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{u}} \cdot \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{v}}^* d\Omega.$$

Скалярное произведение введем по следующему правилу:

$$(\tilde{\mathbf{u}}, \tilde{\mathbf{v}}) = \int_{\Omega} \tilde{\mathbf{u}} \cdot \tilde{\mathbf{v}}^* d\Omega.$$

Вариационная постановка задачи (9)–(12) примет вид: найти такое $\tilde{\mathbf{E}} \in H_0(\operatorname{rot}, \Omega)$, что для $\forall \tilde{\mathbf{v}} \in H_0(\operatorname{rot}, \Omega)$ выполняется

$$\left(\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{E}}, \tilde{\mathbf{v}} \right) + (k^2 \tilde{\mathbf{E}}, \tilde{\mathbf{v}}) = -i(\omega \tilde{\mathbf{J}}_0, \tilde{\mathbf{v}}). \quad (13)$$

Используя формулу Грина

$$\int_{\Omega} [p(\operatorname{rot} \tilde{\mathbf{u}} \cdot \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{v}}) - \tilde{\mathbf{u}} \cdot \operatorname{rot}(p \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{v}})] d\Omega =$$

$$= \int_{\partial\Omega} p[(\tilde{\mathbf{u}} \times \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{v}}) \cdot \tilde{\mathbf{n}}] dS,$$

перепишем уравнение (13) в виде:

$$\int_{\Omega} \operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{E}} \cdot \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{v}} d\Omega =$$

$$= \int_{\Omega} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{E}} \cdot \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{v}} d\Omega - \int_{\partial\Omega} \frac{1}{\mu} [(\tilde{\mathbf{v}} \times \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{E}}) \cdot \tilde{\mathbf{n}}] dS.$$

Учитывая, введенные пространства, очевидно, что

$$\int_{\partial\Omega} \frac{1}{\mu} [(\tilde{\mathbf{v}} \times \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{E}}) \cdot \tilde{\mathbf{n}}] dS = 0.$$

Тогда получится следующая вариационная постановка задачи: найти такое $\tilde{\mathbf{E}} \in H_0(\operatorname{rot}, \Omega)$, что для $\forall \tilde{\mathbf{v}} \in H_0(\operatorname{rot}, \Omega)$ выполняется

$$\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{E}}, \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{v}} \right) + (k^2 \tilde{\mathbf{E}}, \tilde{\mathbf{v}}) = -i(\omega \tilde{\mathbf{J}}_0, \tilde{\mathbf{v}}). \quad (14)$$

Согласно свойству вложения $\operatorname{grad} \phi \in H(\operatorname{rot}, \Omega)$, $\forall \phi \in L^2(\Omega)$ предположим, что $\tilde{\mathbf{v}} = \operatorname{grad} \phi$, $\phi \in L^2(\Omega)$. Тогда (14), с учетом условия разрешимости уравнений Максвелла $\operatorname{div} \tilde{\mathbf{J}}_0 = 0$ и свойством $\operatorname{rot} \operatorname{grad} \phi = 0$, примет вид:

$$([\omega^2 \varepsilon + i\omega \delta] \tilde{\mathbf{E}}, \operatorname{grad} \phi) = 0, \forall \phi \in L^2(\Omega).$$

Приведем пример расчетной схемы метода конечных элементов в гексаэдральной сетке на ячейках которой определены базисные функции, ассоциированные сребрами сетки подпространства $H^h(\operatorname{rot}; \Omega) \subset H(\operatorname{rot}; \Omega)$. Эти функции должны выполнять условия непрерывности компонент поля на границе, а также учитывать условие непрерывности компонент $\tilde{\mathbf{E}}$ на границе областей, имеющих разные свойства материала.

Уравнение (14) в дискретной вариационной постановке перепишем в виде:

$$\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{E}}^h, \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{v}}^h \right) + (k^2 \tilde{\mathbf{E}}^h, \tilde{\mathbf{v}}^h) = -i(\omega \tilde{\mathbf{J}}_0, \tilde{\mathbf{v}}^h).$$

Перепишем ее в виде системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{bmatrix} A + B & -C \\ C & A + B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_r \\ E_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_r \\ f_j \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Здесь E_r и E_j — разложение по базису действительной и мнимой компонент, $A = \|a_{i,j}\|_{i,j=1}^N$, $B = \|b_{i,j}\|_{i,j=1}^N$, $C = \|c_{i,j}\|_{i,j=1}^N$, $a_{i,j} = \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{N}}_i^h, \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{N}}_j^h \right)$, $b_{i,j} = -i(\varepsilon \omega^2 \tilde{\mathbf{N}}_i^h, \tilde{\mathbf{N}}_j^h)$, $c_{i,j} = (\delta \omega \tilde{\mathbf{N}}_i^h, \tilde{\mathbf{N}}_j^h)$, $N \in \mathbb{N}$. Базисные функции на единичном кубе можно задать в виде:

$$\tilde{\mathbf{N}}_1^e = (1-y)(1-z)\tilde{\mathbf{i}}, \quad \tilde{\mathbf{N}}_2^e = y(1-z)\tilde{\mathbf{i}},$$

$$\tilde{\mathbf{N}}_3^e = (1-y)z\tilde{\mathbf{i}}, \quad \tilde{\mathbf{N}}_4^e = yz\tilde{\mathbf{i}},$$

$$\tilde{\mathbf{N}}_5^e = (1-z)(1-x)\tilde{\mathbf{j}}, \quad \tilde{\mathbf{N}}_6^e = z(1-x)\tilde{\mathbf{j}},$$

$$\tilde{\mathbf{N}}_7^e = (1-z)x\tilde{\mathbf{j}}, \quad \tilde{\mathbf{N}}_8^e = zx\tilde{\mathbf{j}},$$

$$\tilde{\mathbf{N}}_9^e = (1-x)(1-y)\tilde{\mathbf{k}}, \quad \tilde{\mathbf{N}}_{10}^e = x(1-y)\tilde{\mathbf{k}}$$

$$\tilde{\mathbf{N}}_{11}^e = (1-x)y\tilde{\mathbf{k}}, \quad \tilde{\mathbf{N}}_{12}^e = xy\tilde{\mathbf{k}}.$$

Таким образом, для применения метода конечных элементов решения задач, порожденных волноводными дифракциями, необходимо составить систему линейных алгебраических уравнений (15) и решить ее удобным способом [Политов, Каленчук, Кузько, 2023]. Минусом этого метода является то, что система (15) является плохо обусловленной и несимметричной, поэтому для ее решения применение, к примеру, метода LU-разложения, не всегда дает истинного решения [Mock, 2023]. Также, при неудачном выборе базисных функций, применение метода может и не дать искомого результата.

2.2 Конечно-разностный метод

Наиболее изученным методом решения уравнения Максвелла (1)–(5) является семейство конечно-разностных методов, которые строятся с помощью дискретизации пространственных и временных аргументов вычислительной области [Tian, Wei, He, 2021]. При численном решении сеточных уравнений с использованием явной разностной схемы происходит переход от матричных алгоритмов к векторным. Эта схема обеспечивает повышенную гибкость при разработке алгоритмов [Xie, Fang, Huang, Wu, Ren, Feng, 2022], [Овчинникова, Шмачилин, Кондратьева, 2024]. В то время как матричные алгоритмы представляют область сетки в виде прямоугольного расположения вычислительных путей, векторные алгоритмы обеспечивают более гибкую структуру для структурирования вычислительного процесса.

Для иллюстрации метода, перепишем систему уравнений Максвелла в виде двумерной системы:

$$\begin{aligned}\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} &= -\frac{\partial E_x}{\partial z}; \\ \mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} &= \frac{\partial E_x}{\partial z}; \\ \varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} &= \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}.\end{aligned}\quad (16)$$

Здесь E_x, H_y, H_z — проекции векторов напряженности исследуемых полей (магнитного и электрического), через ε_0 и μ_0 обозначены электрическая и магнитная постоянные соответственно.

Будем рассматривать вычислительную область

$$D(0 \leq t \leq T, 0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq L_z), T, L_y, L_z \in \mathbb{R}$$

и граничные условия Дирихле

$$E_x(t, y, 0) = E_x(t, y, L_z) = E_x(t, 0, z) = E_x(t, L_y, 0) = 0.$$

Зададим дискретную область. Для этого разделим область D на $h \in \mathbb{N}$ равных частей и обозначим ее через D_h . Пусть сеточные проекции электрического поля $E_{x,n,k}^m$, магнитных полей $H_{y,n,k}^m$ и $H_{z,n,k}^m$ будут определены узлами

$$\left\{ \begin{aligned} (t_m, y_n, z_k) : t_m &= mh_t, m = \overline{0, \frac{T}{h_t}}, y_n = nh_y, \\ n &= \overline{0, \frac{L_y}{h_y}}, z_k = kh_z, k = \overline{0, \frac{L_z}{h_z}} \end{aligned} \right\},$$

а расстояния $h_t, h_y, h_z \in \mathbb{R}$.

Разностный аналог системы (16) имеет вид:

$$\begin{aligned}\mu_0 \frac{H_{y,n,k}^{m+1} - H_{y,n,k}^{m-1}}{2h_t} &= -\frac{E_{x,n,k+1}^m - E_{x,n,k-1}^m}{2h_z}; \\ \mu_0 \frac{H_{z,n,k}^{m+1} - H_{z,n,k}^{m-1}}{2h_t} &= \frac{E_{x,n+1,k}^m - E_{x,n-1,k}^m}{2h_y}; \\ \varepsilon_0 \frac{E_{x,n,k}^{m+1} - E_{x,n,k}^{m-1}}{2h_t} &= \frac{H_{z,n+1,k}^m - H_{z,n-1,k}^m}{2h_y} - \frac{H_{y,n,k+1}^m - H_{y,n,k-1}^m}{2h_z}.\end{aligned}\quad (17)$$

Такая разностная схема имеет порядок аппроксимации $O(h_t^2, h_y^2, h_z^2)$. Перепишем систему (17) в виде удобном для построения вычислительных алгоритмов:

$$\begin{aligned}H_{y,n,k}^{m+1} &= \alpha(E_{x,n,k+1}^m - E_{x,n,k-1}^m) + H_{y,n,k}^{m-1}; \\ H_{z,n,k}^{m+1} &= \beta(E_{x,n+1,k}^m - E_{x,n-1,k}^m) + H_{z,n,k}^{m-1}; \\ E_{x,n,k}^{m+1} &= \theta_y(H_{z,n+1,k}^m - H_{z,n-1,k}^m) - \\ &\quad - \theta_z(H_{y,n,k+1}^m - H_{y,n,k-1}^m) + E_{x,n,k}^{m-1}.\end{aligned}\quad (18)$$

$$\text{Здесь } \alpha = -\frac{h_t}{\mu_0 h_z}, \beta = \frac{h_t}{\mu_0 h_y}, \theta_y = \frac{h_t}{\varepsilon_0 h_y}, \theta_z = \frac{h_t}{\varepsilon_0 h_z}.$$

Неоспоримым достоинством применения формул (18) при их программной реализации является их простота алгоритмизации. Однако, к минусам можно отнести следующий факт. Одним из способов улучшения точности вычислений является прием увеличения количества узлов дискретизации на каждой из осей. При этом существенно возрастает количество итераций вычислительной схемы. Естественным образом значительно возрастает машинная погрешность вычислений. Очевидно, что требования к вычислительным мощностям машины, на которой производятся вычисления, также сильно увеличиваются [Титов, Мазур, 2021]. Обычно на практике при сильном сгущении области дискретизации также возрастают требования к объему памяти ЭВМ, на которой производятся вычисления [Cai, Yi, 2020].

3. Вычислительный эксперимент

В качестве иллюстрации применения изложенных выше численных методов рассмотрим задачу о собственных поверхностных волнах в цилиндрическом диэлектрическом слабонаправленном волноводе. Математическая модель такого процесса имеет вид:

$$\begin{aligned}\Delta u + q(n_j)u &= \lambda u, x \in S_j, j = \overline{1, 2}, \\ u|_{\Gamma} &= 0, \frac{\partial u}{\partial \nu}|_{\Gamma} = A > 0,\end{aligned}\quad (19)$$

где Δ — оператор Лапласа, $q(n_j) = k_0^2 n_j^2$, $k_0 > 0$, $n_1 > n_2 > 0$, $k_0^2 = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0$, n_1 и n_2 — показатели преломления волновода и окружающей изотропной среды, ε_0 — электрическая постоянная, μ_0 — магнитная постоянная, ω — частота электромагнитных колебаний, λ — собственное число, которое физически означает квадрат продольной постоянной распространения, $\frac{\partial u}{\partial \nu}$ — производная по внешней нормали к границе Γ области S_j .

Известно, что собственные числа задачи (19) существуют лишь в интервале $(q(n_2), q(n_1))$ и что эта задача имеет хотя бы одно простое вещественное собственное число, которому соответствует собственная функция u . Целью вычислительного эксперимента является найти разными методами значения собственной функции u , соответствующее заданному собственному числу λ , сравнить полученные значения, оценить вычислительную эффективность методов.

В вычислительной среде Maple была написана программа, позволяющая вычислять значения собственной функции u задачи (19) методом конечных элементов (обозначены — $\hat{u}(x_i)$), конечно-разностным методом (обозначены — $\tilde{u}(x_i)$). Пример, полученных разными методами в результате работы программы, значений

собственной функции u , соответствующей собственному числу $\lambda \approx 1,8$ при $A = 1$, $x \in [0,5]$, приведены в таблицах 1 и 2. Мантисса в программе задавалась равной 10.

Таблица 1.

Значения функции $u(x)$ задачи (26) при $q(n_1) = 2,31$, найденные разными методами

i	x_i	$\hat{u}(x_i)$	$\tilde{u}(x_i)$
1	0	0	0
2	0,357	0,3610275553	0,3608653177
3	0,714	0,7456679093	0,7449931359
4	1,071	1,1790782416	1,1774760954
5	1,429	1,6896055053	1,6865424712
6	1,786	2,3106404426	2,3054019645
7	2,143	3,0828014814	3,0744170109
8	2,5	4,0565913696	4,04371394779
9	2,857	5,2957002724	5,2764993036
10	3,214	6,8811713914	6,8531019571
11	3,571	8,9167015489	8,8762996656
12	3,929	11,5354234189	11,4779401427
13	4,286	14,908612992	14,8275749866
14	4,643	19,2568917827	19,1435341257
15	4,999	24,8646564533	24,7070229869

Таблица 2.

Значения функции $u(x)$ задачи (26) при $q(n_1) = 1,57$, найденные разными методами

i	x_i	$\hat{u}(x_i)$	$\tilde{u}(x_i)$
1	0	0	0
2	0,357	0,3553991825	0,3554712519
3	0,714	0,7003975779	0,7006837649
4	1,071	1,0248987789	1,0255279935
5	1,429	1,3194062307	1,3204875767
6	1,786	1,5753011484	1,5769166723
7	2,143	1,7850947443	1,7872922036
8	2,5	1,9426473917	1,9454402039
9	2,857	2,0433482991	2,0467054447
10	3,214	2,0842504461	2,0881052227
11	3,571	2,0641568278	2,0683998212
12	3,929	1,9836554856	1,9881426318
13	4,286	1,8451022981	1,8496579352
14	4,643	1,6525520361	1,6569739135
15	4,999	1,4116396993	1,4157110648

Из таблиц 1 и 2 и рисунка 1 видно, что результаты, полученные разными методами, хорошо согласуются между собой. Указанные численные методы восстанавливают значения функции в узлах дискретизации по предыдущим значениям. Точность можно увеличить, сделав шаг разбиения сетки больше. Однако, это при-

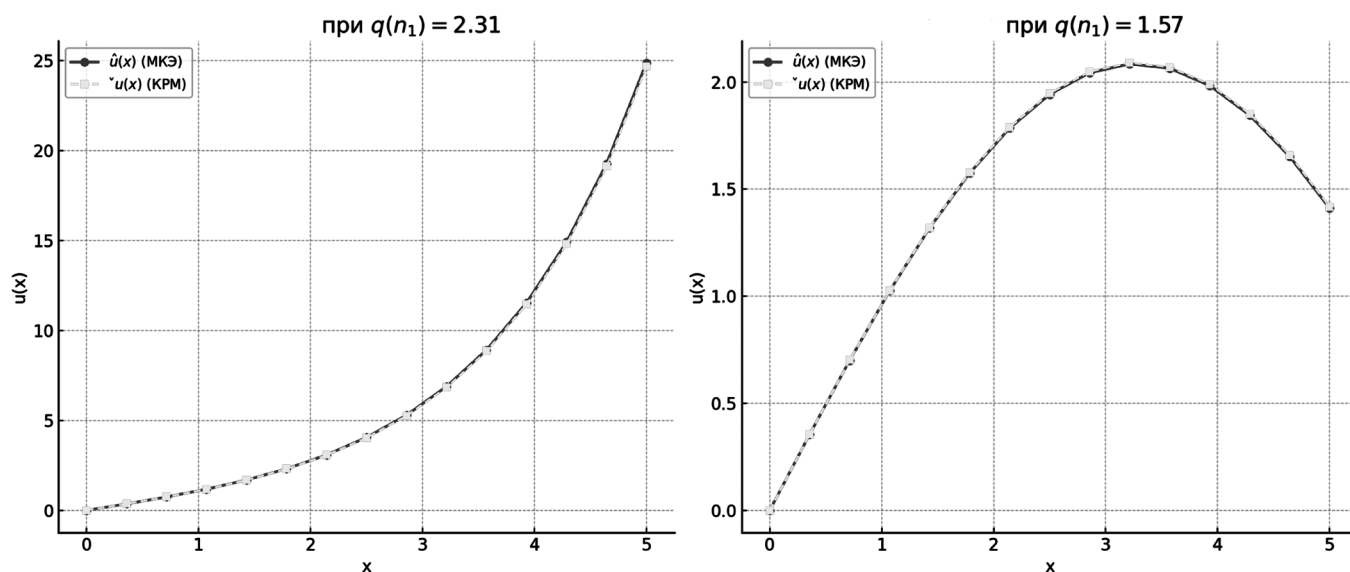


Рис. 1. Сравнение значений собственной функции

ведет к увеличению количества итераций реализации алгоритма. Это не только приведет к затратам памяти вычислительной машины, но и накопит машинную погрешность. Методы ведут себя достаточно устойчиво для задач с простой областью. Если граница области имеет сложную геометрию, то для применения численных методов границу возможно сегментировать. При этом сегментация сложной области производится для каждой задачи индивидуально.

Заключение

Математический аппарат и набор численных методов для задач волноводной дифракции, порожденных уравнением Максвелла, достаточно развит и разнообразен. Метод конечных разностей имеет довольно несложный алгоритм при программной реализации, однако,

весьма чувствителен к геометрии области, на которой определена задача. Метод конечных элементов не так чувствителен к виду области определения исходной задачи, но неудачный выбор базисных функций может существенно сказаться на точности вычислений либо совсем не дать результата.

Результаты вычислительных экспериментов показывают, что современные модификации численных методов дают достаточно точный результат их реализации для дальнейшего инженерного использования. Также, как показывает вычислительный эксперимент, в силу специфики методов конечных разностей и конечных элементов, их точность возможно увеличить путем увеличения шага разбиения сетки и увеличения количества базисных функций соответственно, при этом заказав достаточно большое значение мантииссы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mehdiyeva G., Vagif I., Mehriban I. Application of the Finite Differences Methods to Computation of Definite Integrals. DOI:10.37394/23202.2020.19.1 // Wseas Transactions on Systems. 2020. Vol. 19. P. 1–6.
2. Абгарян, Г.В. Метод частичных областей в задаче дифракции электромагнитной волны на продольной перегородке в бесконечном волноводе / Г.В. Абгарян, А.Н. Хайбуллин, А.Э. Шипило // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. — 2022. — № 4(64). — С. 3–16. — DOI 10.21685/2072-3040-2022-4-1. — EDN OZZLTO.
3. Неведров В.Р. Модуль метода конечных элементов APM FEM в системе трехмерного моделирования КОМПАС-3D. Расчет напряжений / В.Р. Неведров, И.В. Пульников, А.Д. Паньков, К.А. Матарыкин // Молодежь и системная модернизация страны: Сборник научных статей 8-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых. В 4-х томах, Курск, 16–17 мая 2024 года. — Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. — С. 111–114. — EDN UFRKYS.
4. Политов, Р.Е. Основы метода конечных элементов и его применение для прочностного анализа детали в САПР КОМПАС-3D / Р.Е. Политов, В.И. Каленчук, А.В. Кузько // Школа молодых новаторов: сборник научных статей 4-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых, Курск, 13 июня 2023 года / Северо-Кавказский федеральный университет, Пятигорский институт. Том 2. — Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2023. — С. 320–322
5. Mock A. Multiorde Harmonic Analysis of Time-Varying Media Using Time-Domain Simulation, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023, 71(2), 561–569.
6. Tian W., Wei B., He X. Improved FDTD Method for Coupling Analysis of a Dielectric-Coated Wire Above Rough Soil Surface Under HPDM Pulse, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2021, 64(1), 129–138.
7. Xie G., Fang M., Huang Z., Wu X., Ren X., Feng N. A Numerical Study of Lossy Multipole Debye Dispersive Media Using a Recursive Integral-FDTD Method, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 71(3), 1009–1018.
8. Овчинникова Е.В. Применение метода конечных разностей во временной области для расчета направленных свойств двумерных излучающих структур / Е.В. Овчинникова, П.А. Шмачилин, С.Г. Кондратьева [и др.] // Труды МАИ. — 2024. — № 137.
9. Титов, Е.В. Анализ способов компьютерного моделирования электромагнитного поля на объектах с излучающими источниками / Е.В. Титов, Д.Р. Мазур // Актуальные вопросы энергетики: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Омск, 14–15 мая 2021 года / Редакция: П.А. Батраков (отв. ред.) [и др.]. — Омск: Омский государственный технический университет, 2021. — С. 188–191.
10. Cai W. Yi, Y. Optimal error estimates of finite difference time domain methods for the Klein-Gordon-Dirac system, IMA Journal of Numerical Analysis, 2020, 40(2), 1266–1293.

© Бирюков Владислав Олегович (vobiryukov12@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

О МЕТОДИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЯХ ОЦЕНКИ СЛОВЕСНОЙ РАЗБОРЧИВОСТИ РЕЧИ ПРИ ОЦЕНКЕ ЗАЩИЩЁННОСТИ ПОМЕЩЕНИЯ

POSSIBLE ERRORS IN THE METHODOLOGY FOR ASSESSING SPEECH INTELLIGIBILITY WHEN ASSESSING THE SECURITY OF PREMISES

**A. Bushmanov
A. Lozhkova**

Summary. Protecting acoustic information during confidential negotiations with representatives of third-party organizations is an important task in the field of information security. In a market economy, industrial espionage is becoming increasingly common, and timely detection and prevention of possible acoustic data leakage channels is becoming particularly relevant.

In this paper, we develop and simulate the process of sound waves passing through enclosing structures using the COMSOL Multiphysics complex. Our goal is to investigate the interaction of sound waves with various types of building materials and structures, analyze their acoustic characteristics, and evaluate the sound insulation of the protected room. The article discusses methodological errors that may occur when assessing the security of speech information by the criterion of verbal intelligibility. The values of verbal intelligibility obtained using the «Whisper-M1» system are adjusted, taking into account additions to the standard methodology. The strengths and weaknesses of the verbal intelligibility assessment methodology are analyzed, and the proposed additions to it are described.

Keywords: intelligibility of speech, technical channels of information leakage, inaccuracies, protected premises, confidential negotiations.

Бушманов Александр Вениаминович

канд. тех. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Амурский
государственный университет», г. Благовещенск

Ложкова Анна Александровна

Аспирант, ФГБОУ ВО «Амурский государственный
университет», г. Благовещенск

zabolashka@bk.ru

Аннотация. Обеспечение защиты акустической информации во время конфиденциальных переговоров с представителями сторонних организаций — важная задача в области информационной безопасности. Необходимо своевременно обнаруживать и блокировать потенциальные акустические каналы утечки данных, поскольку промышленный шпионаж становится всё более распространённым в условиях рыночной экономики. В данной работе осуществляется разработка и моделирование процесса прохождения звуковых волн через ограждающие конструкции с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics с целью исследования взаимодействия звуковых волн с различными типами строительных материалов и конструкций, анализа их акустических характеристик, а также оценки звукоизоляции защищаемого помещения. Описываются методические погрешности, которые могут возникать при оценке защищённости речевой информации, осуществляется корректировка значений словесной разборчивости, полученных с помощью системы «Шепот-М1», с учётом дополнений к стандартной методике. Приводятся итоги анализа сильных и слабых сторон методики оценки словесной разборчивости, описываются дополнения к ней.

Ключевые слова: разборчивость речи, технические каналы утечки информации, погрешности, защищаемое помещение, конфиденциальные переговоры.

Введение

В современных условиях обеспечения информационной безопасности особую актуальность приобретает проблема оценки защищённости помещений от утечки речевой информации. Одним из ключевых показателей при проведении таких оценок является словесная разборчивость речи, которая позволяет определить степень возможного перехвата конфиденциальной информации.

Актуальность исследования обусловлена тем, что существующие методики оценки словесной разборчивости речи имеют ряд методических погрешностей, которые могут приводить к существенным ошибкам

при определении уровня защищённости помещений. Это создает риски неправильной оценки безопасности объектов и может привести к серьезным последствиям в сфере защиты информации.

Цель исследования заключается в выявлении и анализе методических погрешностей при оценке словесной разборчивости речи, а также разработке рекомендаций по их устранению для повышения точности оценки защищённости помещений.

Согласно Приказу ФСТЭК от 29 апреля 2021 г. № 77 «Об утверждении порядка организации и проведения работ по аттестации объектов информатизации на соответствие требованиям о защите информации огра-

ниченного доступа, не составляющей государственную тайну», помещения, предназначенных для ведения конфиденциальных переговоров (далее — защищаемые помещения) требуют оценки их защищенности, прохождения аттестации на соответствие требованиям по защите информации. Для оценки защиты помещений от утечки информации по акустическому и виброакустическому каналам [1, с. 22] применяются различные методики. Они основаны на анализе интегрального критерия — разборчивости речи, а также на положениях формантной теории [2, с. 88].

В современной практике обеспечения информационной безопасности основным инструментом оценки защищенности речевой информации служит методика, базирующаяся на подходе Н.Б. Покровского [3, с. 91].

Несмотря на наличие определенных преимуществ, данный метод имеет ряд существенных ограничений:

- отсутствие учета современных способов перехвата информации, включая использование направленных микрофонов повышенной чувствительности;
- игнорирование возможности применения технических средств фильтрации и очистки сигнала, позволяющих существенно повысить качество перехваченной речевой информации;
- значительные методические погрешности при определении словесной разборчивости, обусловленные отсутствием учета частотной зависимости при расчете коэффициента восприятия речи.

Указанные недостатки существенно ограничивают точность и достоверность получаемых результатов оценки защищенности речевой информации, что требует разработки усовершенствованных методик анализа.

Первым этапом работы являлось проектирование структурно-пространственной модели помещения [4, с. 2].

Вторым этапом работы является проектирование модели распространения звука в защищаемом помещении посредством программного комплекса COMSOL Multiphysics. Многофакторный анализ воздушных потоков в области расположения модели помог определить и наглядно продемонстрировать их основные параметры, такие как скорость движения воздуха, кинетическую энергию турбулентности и давление на элементы конструкции. Это позволило:

- оценить воздействие ветровой конвекции на теплозащитные свойства дверей и окон, функционирующих как теплопроводные элементы;
- проанализировать аэродинамические характеристики поверхности модели;
- провести акустическое исследование помещения;

— рассчитать нагрузки на структурных компонентах конструкции.

В результате было получено комплексное представление о взаимодействии воздушных потоков с конструкцией здания и их влиянии на функциональные характеристики объекта.

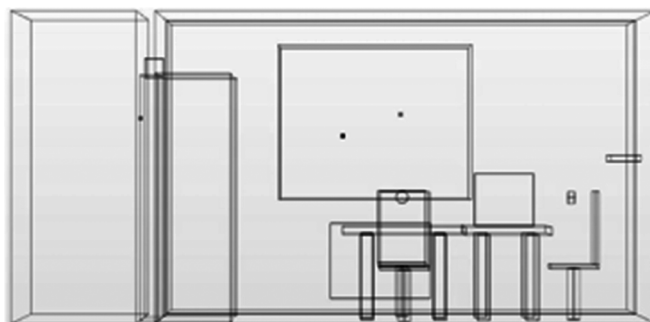


Рис. 1. Итоговая геометрия исследуемого помещения относительно осей YZ

Следующим этапом работы является разработка интерьера (наполнение интерьера мебелью с указанием основных свойств материалов, из которых состоят элементы) (рисунок 2, рисунок 3), инженерных конструкций (рисунок 4) посредством программного обеспечения Autodesk Revit 2024.

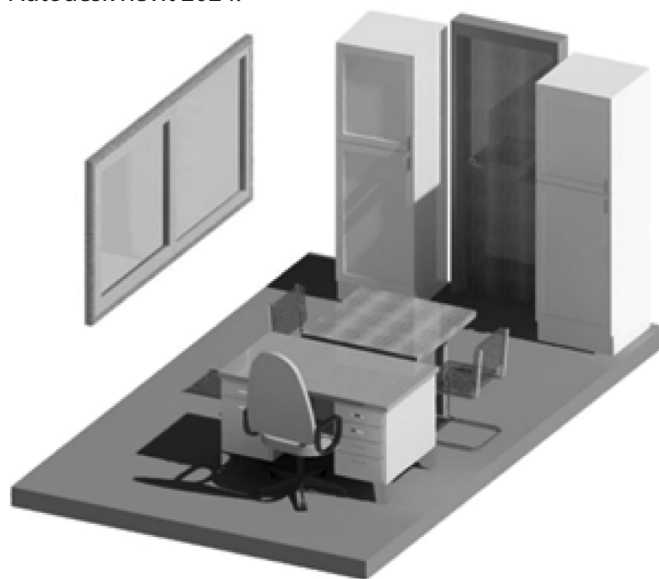


Рис. 2. Модель исследуемого помещения

Задание параметров источников акустического воздействия (источников шума и речи) (таблица 1) в программном комплексе COMSOL Multiphysics в целях моделирования звукового давления [5, с. 44].

Следующий этап работы — это разбиение помещения на элементарные ячейки (рисунок 5) в целях организации комплексной защиты помещения для конфиденциальных переговоров. Этот процесс позволяет:

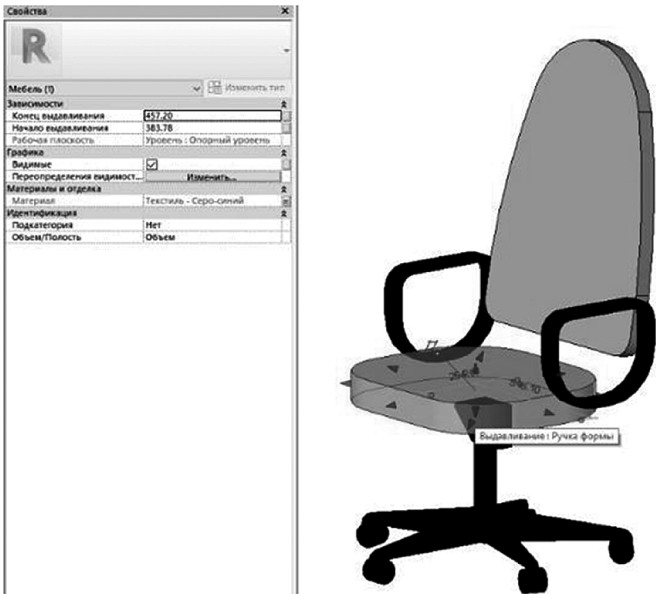


Рис. 3. Моделирование отдельных элементов

- определить критические зоны утечки информации;
- рассчитать необходимое количество защитных средств;
- оптимизировать размещение оборудования;
- обеспечить равномерное покрытие помеховыми сигналами.

Таблица 1.

Акустические показатели с использованием системы «Шепот-М1»

№	Описание	ПК	Речь двух дикторов		Речь диктора		Речь собеседника	
			С ПК	Без ПК	С ПК	Без ПК	С ПК	Без ПК
1	В кабинете	54	58	57	54	52	59	58
2	За перегородкой	25	32	28	25	18	32	23
3	За дверью	36	45	43	41	36	40	36
4	За окном	31	29	26	31	26	27	22

При разбиении помещения на ячейки учтены следующие факторы:

- акустические характеристики помещения (размеры, форма, материалы отделки);
- конструктивные особенности (наличие окон, дверей, вентиляционных систем);
- расположение коммуникаций (электрические сети, системы отопления);
- места размещения сотрудников во время переговоров.

Процесс разбиения включает:

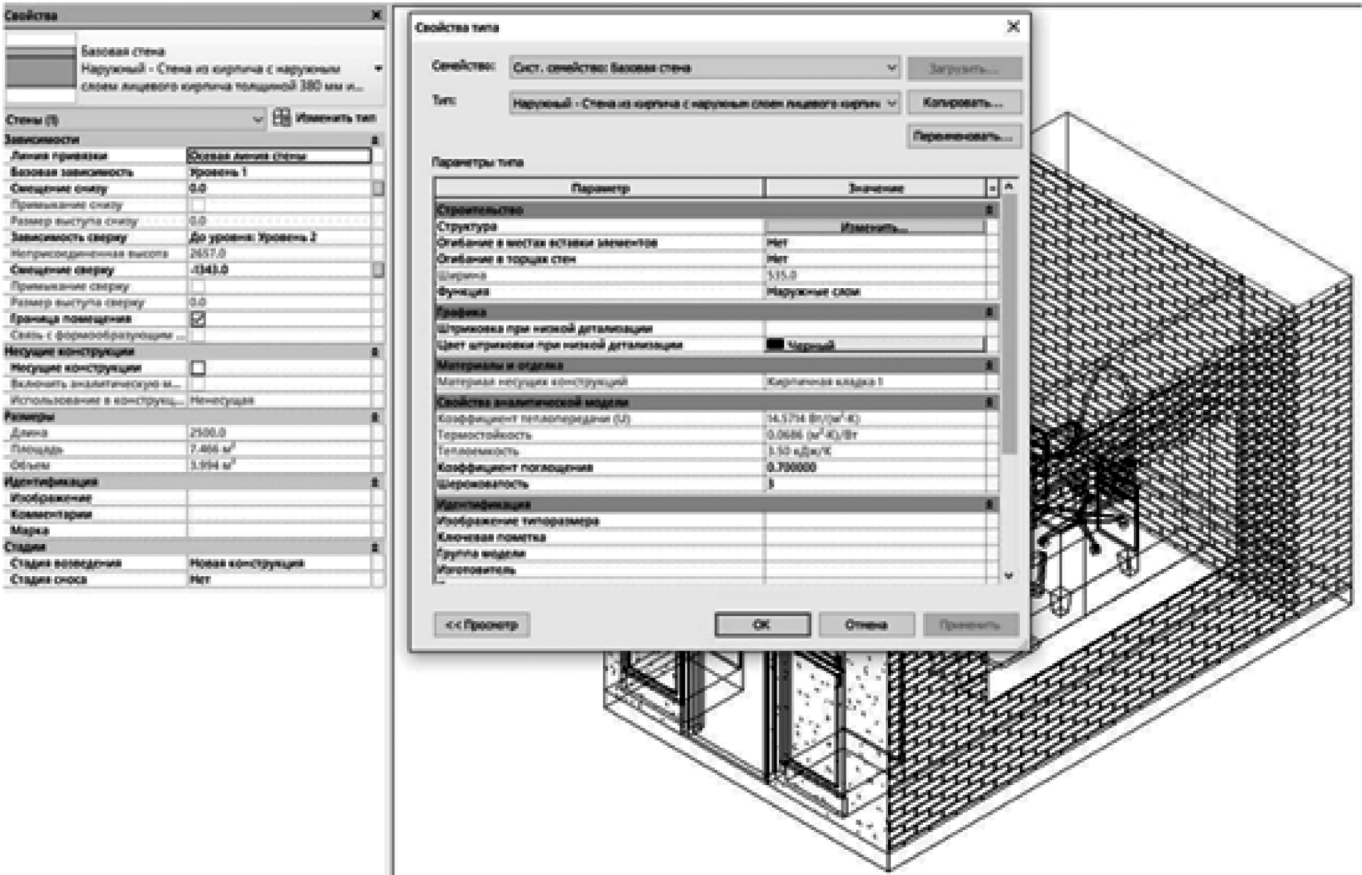


Рис. 4. Моделирование инженерных конструкций

- Первичное деление помещения на основные зоны:
 - рабочая зона (место проведения переговоров)
 - периферийная зона (стены, окна, двери)
 - коммуникационная зона (системы отопления, вентиляции)
 - детальное разбиение каждой зоны на элементарные ячейки:
 - размер ячейки определяется исходя из требуемой точности защиты
 - ячейки должны перекрываться для исключения "мертвых зон"
- Анализ каждой ячейки по следующим параметрам:
 - вероятность утечки информации
 - необходимые методы защиты
 - требуемая интенсивность защитных мероприятий
- Составление карты защищаемого помещения с указанием:
 - границ всех ячеек;
 - необходимых защитных мероприятий для каждой ячейки;
 - места размещения защитного оборудования.

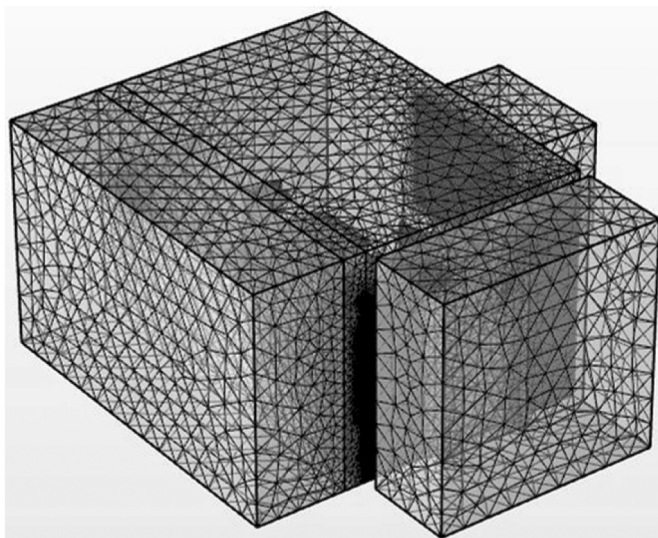


Рис. 5. Модель помещения

После разбиения помещения на ячейки проводится расчет необходимого количества защитных средств для каждой зоны с учетом специфики распространения акустических и электромагнитных сигналов в конкретных ячейках. Это позволяет создать эффективную систему защиты с оптимальным использованием ресурсов.

Завершающим этапом является моделирование процесса распространения звука и выработка рекомендаций обеспечения информационной безопасности защищаемого помещения [6, с. 61]. Осуществляется применение таких параметров как сила голоса каждого собеседника, шум персонального компьютера, коэффициент поглощения. В ходе работы были смоделированы

несколько различных ситуаций: диалог двух человек, влияние включенного/выключенного компьютера, результаты моделирования представлены на рисунках 6,7.

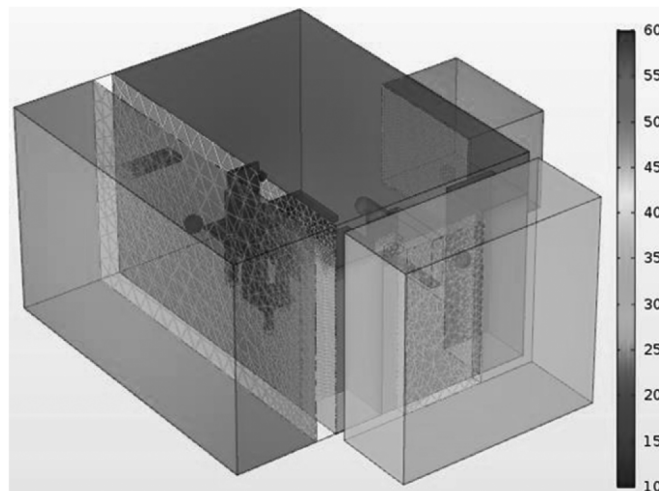


Рис. 6. Распространение звукового давления в дБ (ситуация, когда присутствует речь обоих дикторов при включенном ПК)

Визуально, видно, что внутри помещения уровень звука более 60 дБ. В зонах окна и гипсокартонной перегородки 35–40 дБ, дверь 35–40 дБ.

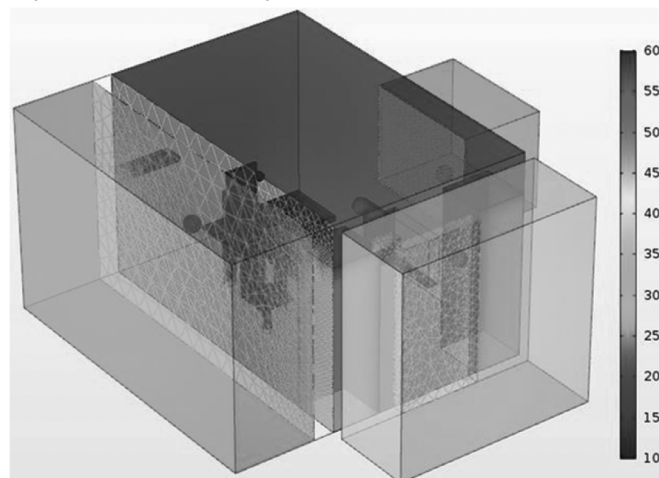


Рис. 7. Распространение звукового давления в дБ (ситуация, когда присутствует речь обоих дикторов при выключенном ПК)

Визуально, видно, что внутри помещения уровень звука варьируется в рамках 55–60 дБ. В зонах окна и гипсокартонной перегородки 25–35 дБ, дверь 40–45 дБ.

Проанализировав полученные модели распространения звукового давления, можно сказать, что благоприятным местом (рисунок 8) для снятия информации является дверь.

В отношении данного исследуемого защищаемого помещения рекомендовано применение пассивных методов защиты акустической информации, а именно:

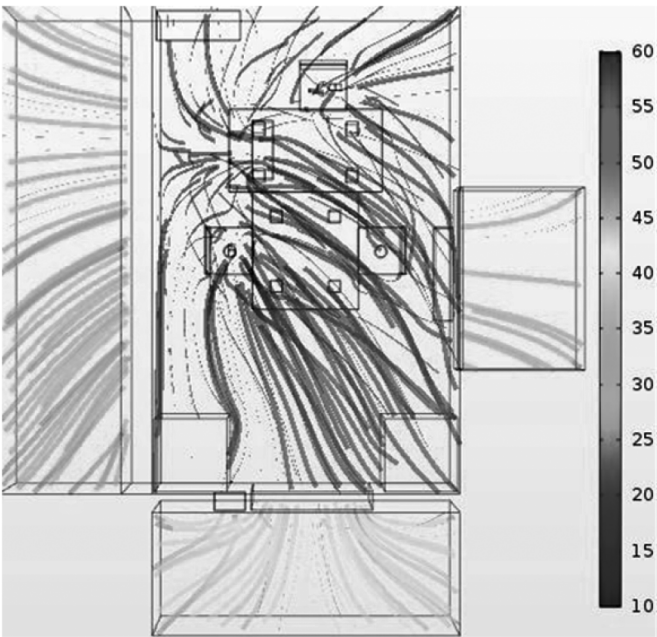


Рис. 8. Поток распространения звука от источников в дБ (ситуация, когда присутствует речь обоих дикторов при включенном ПК)

- применение перфорированного гипсокартонного акустического листа;
- применение звукопоглощающих плит;
- использование акустических напыляемых покрытий;
- применение специализированных материалов для обшивки межкомнатных конструкций;
- наполнение камер пластикового окна газами (ксенон, аргон).

Результаты применения методов показы на рисунке 9.

По результатам акустического эксперимента проведен итоговый сравнительный анализ (таблица 2) после обработки в программном комплексе COMSOL Multiphysics.

Для наглядности приведем диаграмму с отражением погрешностей в измерениях (рисунок 10).

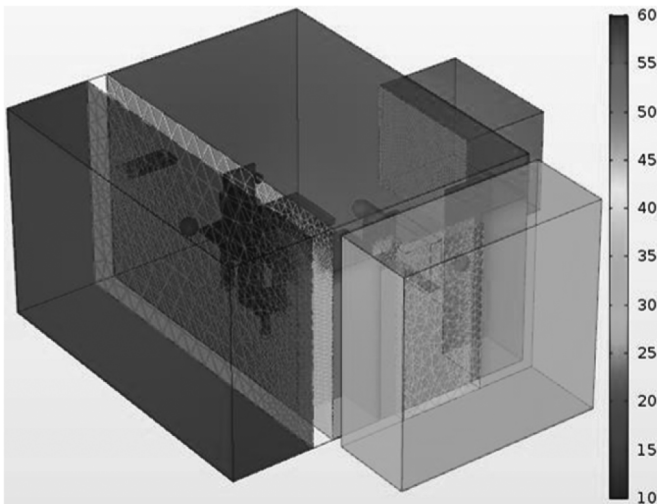


Рис. 9. Распространение звукового давления в дБ (ситуация, когда присутствует речь обоих дикторов при включенном ПК) после применения пассивных методов защиты акустической информации

Заключение

Проведенный анализ экспериментальных данных показал критически низкий уровень защищенности речевой информации. Установлено, что несанкционированный перехват конфиденциальной информации возможен даже без использования специализированного технического средства акустической разведки (ТСАР).

Сравнительный анализ результатов показал согласованность предложенной методики корректировки показателей словесной разборчивости с классическим методом оценки защищенности речевой информации А1 согласно [7, с. 44], [8, с. 14]. При этом важно отметить, что расхождения между результатами не превышают 5 %.

Детальный статистический анализ выявил следующие характеристики погрешности:

- основная точность измерений составляет $\pm 5\%$, что является приемлемым показателем для большинства технических приложений;

Таблица 2.

Акустические показатели при моделировании в программном комплексе COMSOL Multiphysics

№	Описание	ПК		Речь двух дикторов				Речь диктора				Речь собеседника			
		ДО	ПОСЛЕ	ДО		ПОСЛЕ		ДО		ПОСЛЕ		ДО		ПОСЛЕ	
				С ПК	Без ПК	С ПК	Без ПК	С ПК	Без ПК	С ПК	Без ПК	С ПК	Без ПК	С ПК	Без ПК
1	В кабинете	54	55	58	57	57	56	54	52	54	56	59	58	57	55
2	За перегородкой	25	27	32	28	15	11	25	18	13	7	32	23	14	9
3	За дверью	36	39	45	43	33	30	41	36	31	25	40	36	32	28
4	За окном	31	30	29	26	24	22	31	26	23	18	27	22	23	19

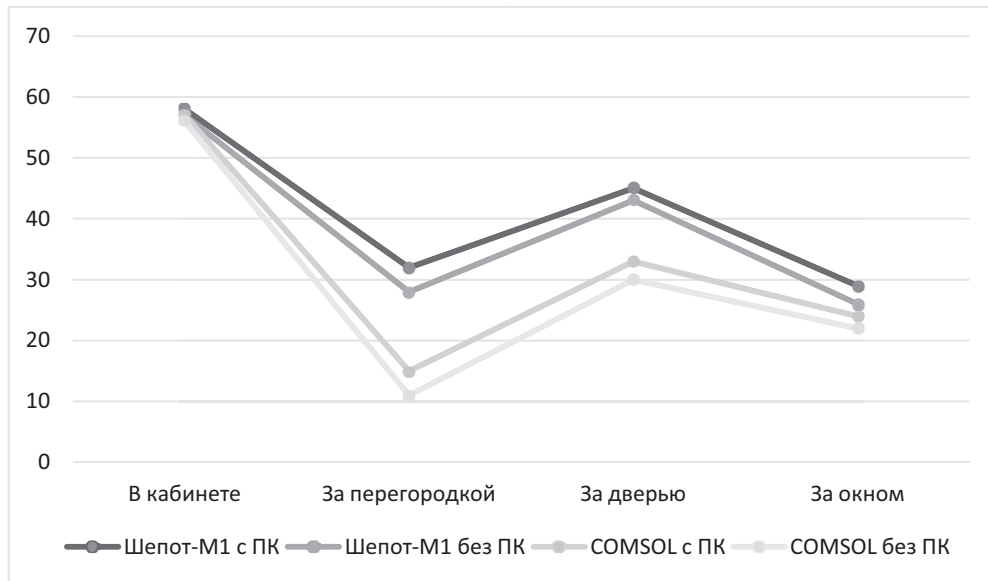


Рис. 10. Сравнительный анализ результатов измерения

- максимальная абсолютная погрешность 8 % указывает на то, что фактическое значение может отклоняться от измеренного на эту величину;
- относительная погрешность до 40 % является довольно высокой и может существенно влиять на точность результатов в определенных условиях.

Указанные показатели точности справедливы в диапазоне отношений сигнал/шум от -20 до -5 дБ. В данном интервале предложенный метод демонстрирует более высокую точность по сравнению с базовым подходом, что обусловлено применением усовершенствованной методики снижения методических погрешностей при оценке защищенности информации повышенной секретности (как показано в работе В.А. Трушина, И.Л. Ревы и А.В. Иванова [9, с. 238]).

Однако стоит отметить, что в расчетах отношение сигнал/шум часто выходит за пределы указанного оптимального диапазона, что может влиять на точность получаемых результатов.

Анализ результатов исследования позволяет сделать выводы и определить следующие рекомендации:

Практические рекомендации:

1. При проведении измерений:
 - использовать дополнительное оборудование;

- учитывать возможные искажения за пределами оптимального диапазона.

2. В области защиты информации:

- принять меры по устранению выявленных уязвимостей;
- провести дополнительную оценку защищенности помещения;
- рассмотреть возможность применения активных методов защиты.

3. Для дальнейшего применения методики:

- использовать в комплексе с другими методами оценки;
- учитывать ограничения при интерпретации результатов;
- рекомендовать для практического применения в сфере защиты речевой информации.

Таким образом, исследование демонстрирует эффективность модифицированной методики в заданных условиях и выявляет существенные риски утечки информации, требующие принятия соответствующих мер защиты. Следующим этапом работы является интеграция с уже имеющими программным обеспечением COMSOL Multiphysics и собственной нейросетью, которая будет определять возможные каналы утечки информации и предлагать активные/пассивные меры защиты акустической информации [10, 12–14].

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А.В. Оценка защищенности информации от утечки по виброакустическим каналам / А.В. Иванов // Новосибирский государственный технический университет — Н.: 2018. — 76 с.
2. Зайцев А.П. Технические средства и методы защиты информации: учеб. для вузов / А.П. Зайцев, Р. В. Мещеряков, А.А. Шелупанов. — М.: Горячая линия — Телеком, 2013. — 442 с.
3. Сапожков М.А. Акустика: справочник. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1989. — 336 с.
4. Ложкова, А.А. Оценка защищенности речевого сигнала от утечки по акустическим и виброакустическим каналам / А.А. Ложкова. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2023. — № 40 (487). — С. 1–5.
5. Узденова А.М., Урtenов М.Х. Математическое моделирование физико-химических процессов в среде Comsol Multiphysics 5.2. Учебное пособие для вузов / А.М. Узденова, М.Х. Урtenов // М.: Издательство Лань, 2021. — с. 229.
6. Киргизова Е.В., Рубцов А.В. Информационная безопасность / Е.В. Киргизова, А.В. Рубцов // — Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2018. — 160 с.
7. Козлачков С.Б. Методические аспекты оценки защищенности речевой информации // Спецтехника и связь. — 2001. — № 2(6). — С. 44–47.
8. Паршин К.А., Анашкин П.А. Сравнительный анализ методик оценки защищенности речевой информации от утечки по прямым акустическим каналам при аттестации выделенных помещений / К.А. Паршин, П.А. Анашкин // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. — 2015. — № 5(15). — С. 13–26.
9. Трушин В.А. Усовершенствование методики оценки разборчивости речи в задачах защиты информации / В.А. Трушин, И.Л. Рева, А.В. Иванов // Ползуновский вестник. — 2012. — № 3-2. — С. 238–241.
10. Bélanger O. Pyo, the python DSP toolbox // Proc. ACM Multimedia Conference, 2016. P. 1214–1217.

© Бушманов Александр Вениаминович; Ложкова Анна Александровна (zabolashka@bk.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ КОМАНДНОЙ РАБОТЫ

ANALYSIS OF THE USE OF INFORMATION AND ANALYTICAL TOOLS FOR ASSESSING THE PERFORMANCE OF TEAMWORK

**B. Goryachkin
I. Buzyrev
A. Zhen
S. Yunikov**

Summary. Problem statement. When assessing the effectiveness of teamwork, there is a problem of the limitations of existing methodologies and IT solutions that do not take into account the complex interaction of quantitative and qualitative indicators, as well as the personal and role distribution in teams.

Objective. To develop an information and analytical toolkit for a comprehensive assessment of teamwork performance by integrating data from Jira, the Belbin model, and statistical analysis methods using Python.

Results. An analysis of existing methodologies and their limitations was conducted. Key performance criteria were considered: task completion performance, understanding deadlines, task distribution by roles, etc. A new assessment approach was created that combines quantitative and qualitative indicators through successive stages: collecting data from Jira, defining roles using the Belbin model, comprehensive statistical analysis, and formulating recommendations.

Practical significance. The developed toolkit allows for a more objective assessment of teamwork performance, taking into account both production and personal factors. This makes it possible to correctly break down and analyze tasks before the start of a project, determine where and when to use certain assessment principles and methods, which is especially important for projects where success depends on the coherence of the participants' interactions.

Keywords: teamwork, performance assessment, information and analytical toolkit, Belbin model, Jira, Python, statistical analysis.

Горячкин Борис Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)
bsgor@mail.ru

Бузырев Илья Леонидович

Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)
buzyrevilya@mail.ru

Чжен Артем Олегович

Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)
artchzhen.work@gmail.com

Юников Семен Романович

Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)
unikovsemen@gmail.com

Аннотация. Постановка проблемы. При оценке эффективности командной работы существует проблема ограниченности существующих методологий и IT-решений, которые не учитывают комплексное взаимодействие количественных и качественных показателей, а также личностно-ролевое распределение в командах.

Цель. Разработать информационно-аналитический инструментальный для комплексной оценки результативности командной работы путем интеграции данных из Jira, модели Белбина и методов статистического анализа с использованием Python.

Результаты. Проведен анализ существующих методологий и их ограничений. Рассмотрены ключевые критерии эффективности: результативность выполнения задач, понимание сроков, распределение задач по ролям и др. Создан новый подход к оценке, сочетающий количественные и качественные показатели через последовательные этапы: сбор данных из Jira, определение ролей по модели Белбина, комплексный статистический анализ и формулировку рекомендаций.

Практическая значимость. Разработанный инструментальный позволяет более объективно оценивать эффективность командной работы, учитывая как производственные, так и личностные факторы. Это дает возможность правильно разбить и проанализировать задачи до начала проекта, определить, где и когда нужно использовать определенные принципы и методы оценки, что особенно важно для проектов, где успех зависит от слаженности взаимодействия участников.

Ключевые слова: командная работа, оценка эффективности, информационно-аналитический инструментальный, модель Белбина, Jira, Python, статистический анализ.

Введение

Организация трудовой деятельности претерпевает значительные изменения под влиянием технологического прогресса и глобальных трансформаций социокультурной среды. Современные команды уже не работают по жестким схемам, где каждое действие строго регламентировано. Напротив, гибкость, адаптивность и способность быстро реагировать на изменения становятся ключевыми характеристиками успешных коллективов. Однако вместе с этим меняется и подход к оценке их результативности.

Если раньше эффективность командной работы оценивалась через призму выполнения планов, соблюдения сроков и объемов выполненных задач, то сегодня такой подход кажется упрощенным. Современная команда — это сложная система, где взаимодействуют не только профессиональные навыки участников, но и их личностные качества, коммуникативные способности, а также степень согласованности действий. Именно поэтому актуальность исследования проблемы оценки результативности командной работы обусловлена несколькими важными факторами. Во-первых, развитие информационных технологий изменило характер коммуникаций внутри команд, что напрямую влияет на их производительность. Во-вторых, появление распределенных и самоорганизующихся коллективов требует учета качественных аспектов взаимодействия. В-третьих, современные IT-инструменты, такие как Jira или Trello, часто игнорируют человеческий фактор, ограничиваясь статистическими данными.

Таким образом, разработка такого инструментария становится насущной задачей, отвечающей современным вызовам управления командами.

Показатели результативности
в контексте командной работы

Командная работа — это не просто выполнение задач, а сложный механизм, где каждый участник играет свою роль. Если один элемент системы дает сбой, это может повлиять на общий результат. Исследования Я.Р. Катценбаха и Д.К. Смита подчеркивают, что успешная команда характеризуется четкой организацией участников, которые разделяют общие цели и стратегическое видение [1]. И. Салас, Р. Берд и С. Таненбаум дополняют эту мысль, определяя команду как небольшую группу (5–7 человек), объединенную общими ценностями и подходами к совместной деятельности [2].

Анализ научной литературы позволяет выделить ключевые аспекты, которые необходимо учитывать при оценке результативности командной работы:

- Распределение ролей: Задачи должны соответствовать компетенциям участников. Например, если человек с аналитическим складом ума выполняет творческие задачи, это может снизить общую производительность.
- Самоорганизация: Команда должна уметь принимать решения самостоятельно, минимизируя внешнее управление. Это особенно важно в условиях гибких методологий, таких как Agile.

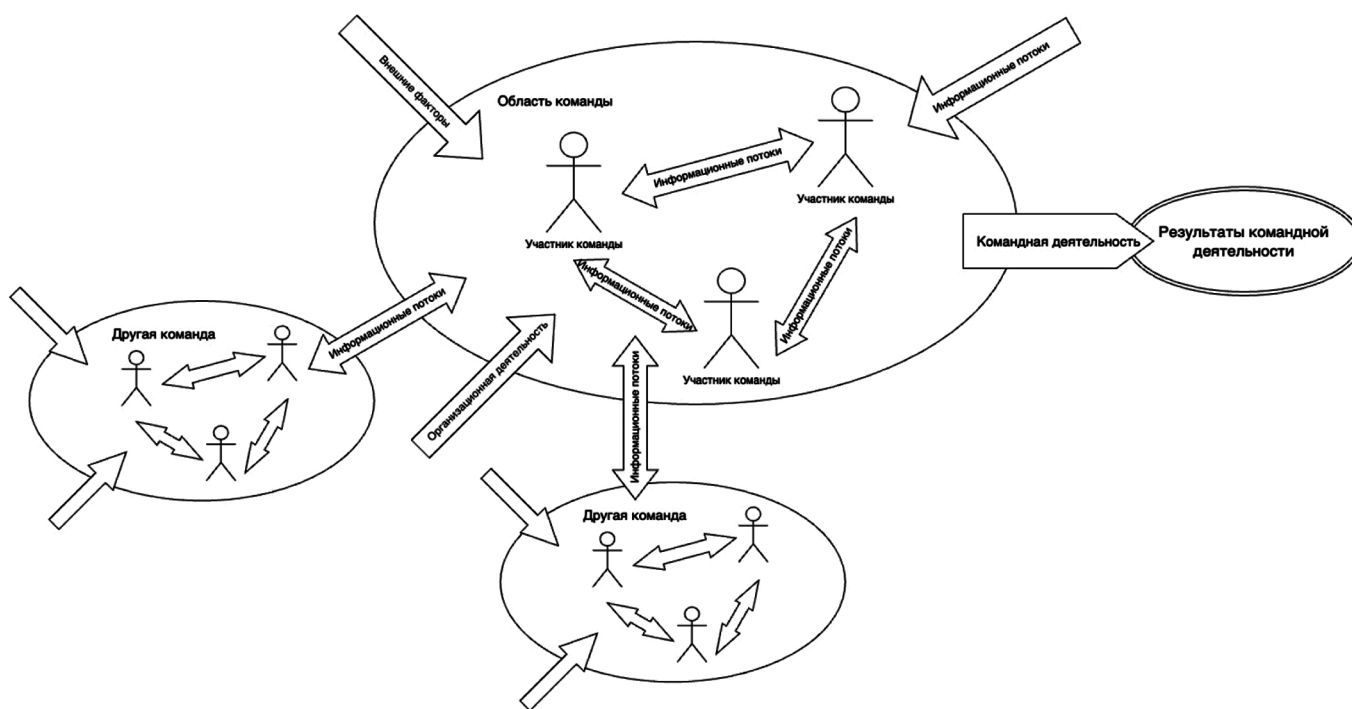


Рис. 1. Внутреннее и внешнее взаимодействие в команде и результаты ее деятельности

- Качество коммуникаций: Внутриккомандное взаимодействие напрямую влияет на скорость и качество выполнения задач [3].

Однако для комплексной оценки недостаточно просто перечислить эти аспекты. Необходимо учитывать баланс количественных и качественных показателей. Современные исследования подтверждают, что чрезмерная фокусировка только на одном типе показателей может исказить реальную картину эффективности [4]. Например, команда может выполнять задачи в срок, но при этом страдать от плохой координации или конфликтов внутри коллектива.

Проанализировав исследования по теме эффективности командной работы и оценки ее результативности [3, 4, 5, 6], были выделены следующие критерии, которые лягут в основу инструментария:

- Результативность выполнения задач: Этот показатель отражает способность команды справляться с запланированным объемом работ. Он является ключевым, так как напрямую влияет на достижение стратегических целей организации.
- Понимание сроков: Команда должна уметь адекватно оценивать временные рамки для реализации задач. Корректное планирование помогает избежать простоев или перегрузок.
- Распределение задач по ролям: Оптимальное использование компетенций участников способствует повышению общей производительности.
- Умение расставлять приоритеты: Грамотная расстановка приоритетов минимизирует риски срыва ключевых этапов проекта.
- Минимизация задержек: Рациональное распределение задач снижает количество блокирующих зависимостей и повышает эффективность взаимодействия.

Для анализа этих критериев могут использоваться различные методы. Статистические методы [7] позволяют оценить количественные показатели: количество выполненных задач, соблюдение сроков, производственные циклы. Экспертные методы [8] помогают про-

анализировать качественные аспекты, такие как распределение ролей и компетенций. Однако важно понимать, что применение только одного типа методов не дает полной картины. Поэтому необходим комплексный подход, сочетающий различные методы анализа.

Анализ существующих наработок

Современные методологии и IT-инструменты предлагают множество подходов к оценке результативности командной работы. Однако каждый из них имеет свои ограничения, что делает актуальным поиск более совершенных решений.

Методологические подходы демонстрируют разные способы организации работы. Agile обеспечивает гибкость и адаптивность, но требует зрелости команды для успешного применения [6]. Waterfall предлагает четкое последовательное выполнение этапов, но плохо работает при изменениях [9]. Lean фокусируется на минимизации потерь, но его сложно применять в условиях высокой неопределенности [10].

Особое внимание заслуживают GRPI-модель и модель Белбина, которые помогают анализировать качественные аспекты командной работы. GRPI-модель учитывает цели (Goals), роли (Roles), процессы (Processes) и межличностные отношения (Interpersonal relationships). Она позволяет выявить слабые места в коммуникациях и распределении обязанностей, но часто страдает от субъективности оценок [10]. Модель Белбина, напротив, помогает определить роли участников на основе их личностных характеристик. Согласно этой модели, команда состоит из девяти типов ролей, таких как Исполнитель, Придумщик и Контролер [11]. Это особенно полезно для анализа распределения задач внутри команды, но её трудно применять в виртуальных коллективах.

IT-инструменты также имеют свои сильные и слабые стороны. Jira удобен для отслеживания задач, но ограничен в анализе качественных аспектов работы [12]. Trello прост в использовании, но его аналитические возмож-



Рис. 2. Распределение критериев на количественные, качественные и смешанные

ности недостаточны для крупных проектов. Power BI предоставляет мощные инструменты визуализации данных, но его внедрение дорого и сложно [13]. Slack и Microsoft Teams создают удобные каналы коммуникации, но перегружают информацией и не анализируют эффективность взаимодействия [12].

Основные ограничения существующих решений включают дисбаланс между количественными и качественными показателями, сложности интеграции данных из разных источников и высокую стоимость внедрения. Например, объединение данных из Jira и Power BI часто требует дополнительных ресурсов, что снижает точность анализа.

Таблица 1.

Преимущества и недостатки текущих методологий и инструментариев

Решение	Преимущества	Недостатки
Agile	Гибкость, адаптивность к изменениям	Сложность применения для долгосрочных проектов с жесткими требованиями
Waterfall	Четкое планирование, контроль этапов	Низкая адаптивность к изменениям, риск задержек
Модель Белбина	Помогает распределять роли в зависимости от сильных сторон участников	Сложность применения в виртуальных командах
GRPI-модель	Учитывает важные аспекты командной работы	Субъективность оценок взаимоотношений в команде
Jira	Удобство отслеживания задач, поддержка Agile-методологий	Ограниченная функциональность для анализа качественных аспектов работы команды
Trello	Простота использования, гибкость в организации задач	Недостаточно мощные аналитические возможности
Power BI	Глубокий анализ количественных данных, визуализация результатов	Высокая стоимость, сложность внедрения
Slack/Teams	Удобные каналы коммуникации, интеграция с другими инструментами	Перегрузка информацией, ограниченные возможности для анализа эффективности коммуникации
Clockify/Toggl	Учет времени, затраченного на выполнение задач	Фокус только на временных метриках, игнорирование качественных аспектов

Результаты исследования подчеркивают необходимость разработки нового подхода к оценке результативности командной работы. Современные методологии,

такие как Agile, Waterfall и Lean, предоставляют базовые принципы организации процессов, но их практическое применение требует адекватного IT-инструментария. GRPI-модель и модель Белбина дополняют эти подходы, позволяя учесть качественные аспекты работы, такие как распределение ролей и качество коммуникаций. Однако ни одна из существующих методологий или инструментов не обеспечивает комплексного анализа, который бы объединял количественные и качественные показатели.

Разработанный информационно-аналитический инструментарий частично преодолевает эти ограничения, интегрируя данные из Jira, модель Белбина и методы статистического анализа. Он позволяет оценивать как производственные показатели (например, количество выполненных задач), так и личностные характеристики участников (например, соответствие ролей их компетенциям).

Разработка инструментария

Когда мы говорим о командной работе, то важно понимать: её результативность складывается из множества факторов, которые нельзя рассматривать по отдельности. Именно эту проблему и решает разработанный информационно-аналитический инструментарий. Он не просто собирает данные, а анализирует их через призму как количественных показателей (сколько задач выполнено), так и качественных характеристик (насколько хорошо распределены роли).

Перед разработкой инструментария были четко определены требования, которые позволили создать действительно универсальное решение:

- Комплексный подход к анализу. Командная работа — это сложная система, где все элементы взаимосвязаны. Поэтому важно учитывать как количественные показатели, так и качественные аспекты. Анализ только одного типа данных может исказить реальную картину эффективности.
- Преодоление ограничений существующих решений. Современные инструменты, такие как Jira или Trello, предоставляют базовый анализ, но игнорируют человеческий фактор. Необходим более глубокий подход, который поможет выявить скрытые закономерности.
- Учет личностно-ролевого распределения. Результативность командной работы во многом зависит от правильного распределения ролей между участниками. Инструментарий должен учитывать личностные качества членов команды и их влияние на выполнение задач.
- Системность анализа. При оценке результативности необходимо учитывать все составляющие командной работы: от выполнения задач до каче-

ства коммуникаций. Игнорирование каких-либо факторов приводит к неполным выводам.

- Гибкость и масштабируемость. Инструментарий должен быть применим как для малых команд, так и для крупных коллективов. Это требует гибкости в настройке параметров и аналитических методов.

Работа инструментария происходит в четыре этапа:

1) Сбор данных из Jira.

Первый шаг — это интеграция с Jira, которая позволяет собирать «сырые» данные о выполнении задач. Эти данные включают:

- Количество завершенных задач.
- Соблюдение сроков.
- Распределение задач между участниками.

Важно отметить, что данные собираются в реальном времени, что минимизирует риск получения недостоверной информации. Все показатели структурируются в единую таблицу, где каждый параметр имеет четкое числовое значение. Это создает прочную основу для дальнейшего анализа.

2) Определение ролей по модели Белбина.

На втором этапе проводится тестирование участников команды для выявления их доминирующих ролей. Модель Белбина помогает ответить на ключевые вопросы:

- Какие роли выполняют участники?
- Соответствуют ли задачи их компетенциям?

Например, если человек с ролью «Исполнитель» занят исключительно генерацией идей, это может привести к снижению общей эффективности.

3) Комплексный анализ данных.

Третий этап — это сердце инструментария. Здесь данные обрабатываются с помощью Python и библиотек (Pandas, Matplotlib, Seaborn). Анализ проводится по следующим критериям:

- Корреляция между планируемыми и фактическими сроками выполнения задач.
- Зависимость между приоритетами задач и их выполнением.
- Распределение задач по эпикам и блокирующие зависимости.

4) Формулировка рекомендаций

На основе анализа формируются конкретные выводы:

- Какие задачи требуют перераспределения?
- Где есть узкие места в процессах?
- Как можно улучшить качество планирования?

Разработанный информационно-аналитический инструментарий демонстрирует высокую эффективность в оценке результативности командной работы. Однако, как и любое решение, он имеет свои сильные и слабые стороны. Для наглядного представления преимуществ и ограничений предлагается следующая таблица (см. табл. 2).

Несмотря на достигнутые результаты, инструментарий имеет значительный потенциал для дальнейшего совершенствования. Перспективы развития можно разделить на несколько ключевых направлений:

- Внедрение модулей машинного обучения. Машинное обучение может значительно повысить точность прогнозирования эффективности командной работы. Например, алгоритмы могут анализировать исторические данные и предсказывать вероятность задержек или конфликтов внутри команды.
- Разработка удобного пользовательского интерфейса. Создание интуитивно понятного интерфейса позволит использовать инструментарий

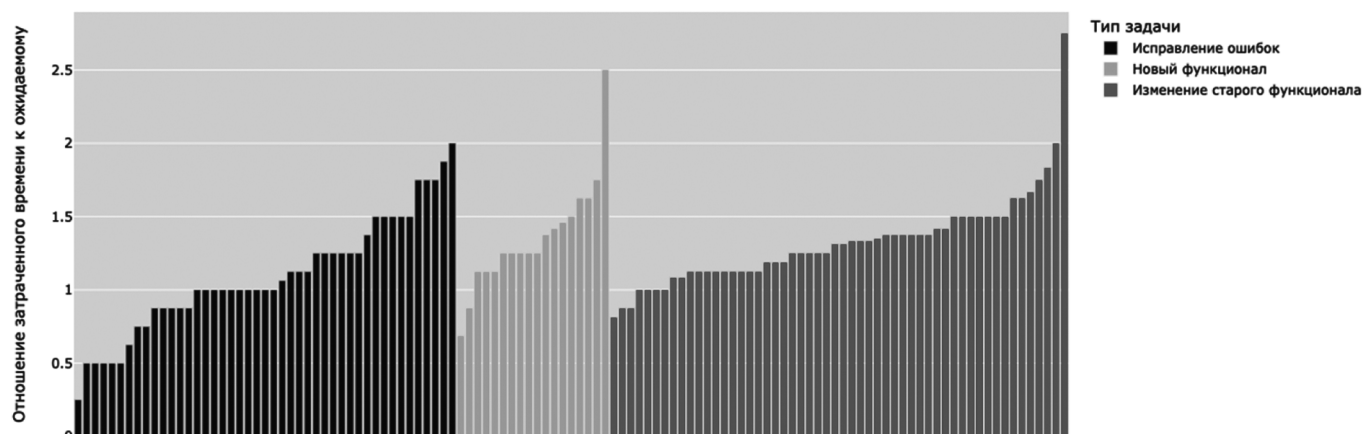


Рис. 3. Статистическое распределение задач по типу

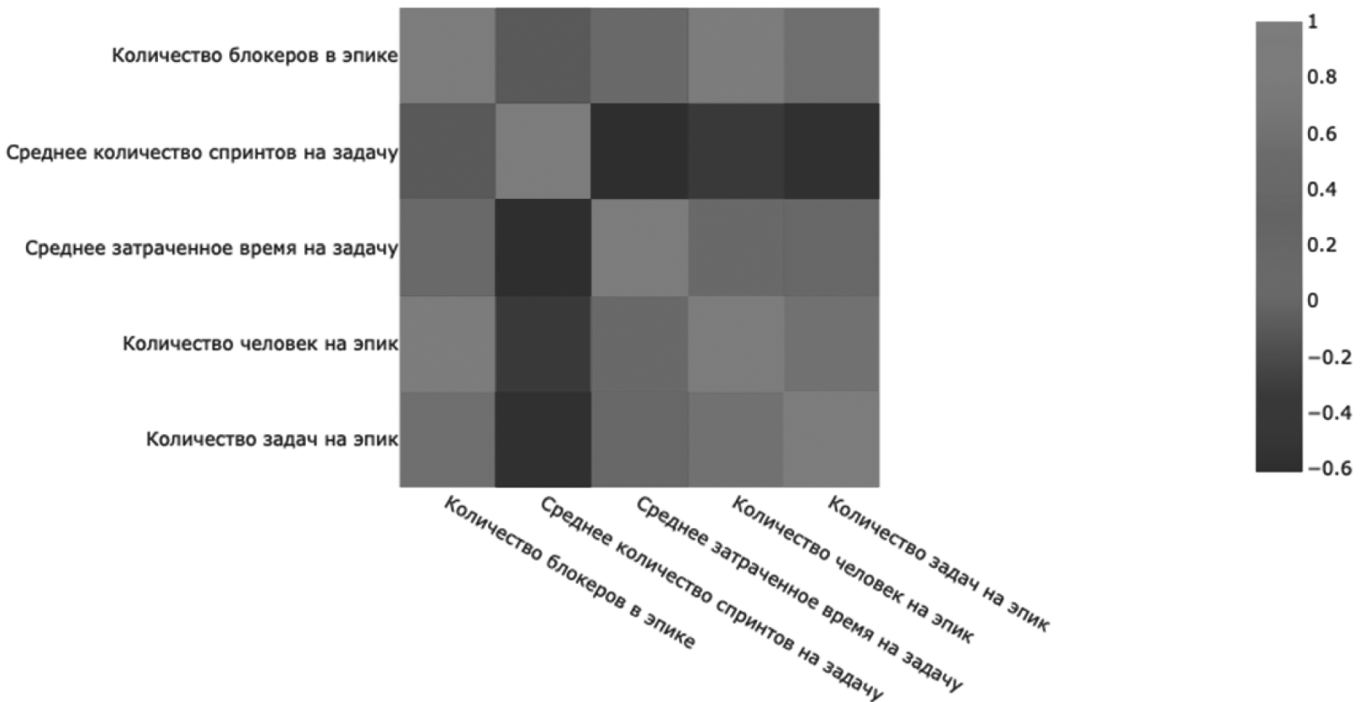


Рис. 4. Корреляционный анализ связи между параметрами

Таблица 2.
Преимущества и ограничения разработанного инструментария

Преимущества	Ограничения
Комплексный подход, объединяющий количественные и качественные показатели	Сложность перевода некоторых качественных показателей в количественные метрики
Интеграция данных из Jira и модели Белбина для анализа личностно-ролевого распределения	Требует технической подготовки пользователей для корректного применения
Гибкость в обработке данных с использованием Python и библиотек (Pandas, Matplotlib)	Ограниченная поддержка визуализации качественных аспектов работы
Возможность выявления скрытых закономерностей благодаря статистическому анализу	

специалистам без глубоких технических навыков. Это особенно важно для руководителей команд, которые не знакомы с программированием.

- Интеграция с большим количеством источников данных. Добавление поддержки таких платформ, как Slack, Microsoft Teams и Trello, позволит собирать более полные данные о коммуникациях и задачах. Это создаст более целостную картину работы команды.
- Совершенствование методологии учета качественных показателей. Разработка новых методов перевода качественных характеристик (напри-

мер, качества коммуникаций) в количественные метрики минимизирует потерю информации.

- Автоматизация процессов сбора и анализа данных. Полная автоматизация позволит сократить время на подготовку данных и повысить точность анализа.

Заключение

Исследование проблемы оценки результативности командной работы показало, что современные подходы зачастую не справляются с задачей дать полную и объективную картину эффективности. На помощь пришел разработанный информационно-аналитический инструментарий, который объединяет количественные и качественные показатели в единую систему анализа. Он стал ответом на вызовы современного управления командами, где успех зависит не только от выполнения задач, но и от слаженности взаимодействия участников.

Один из ключевых выводов исследования заключается в том, что комплексный анализ действительно работает. Интеграция данных из Jira, модели Белбина и методов статистического анализа позволила выявить скрытые закономерности и определить факторы, которые напрямую влияют на результативность команды.

Важным аспектом исследования стало подтверждение необходимости баланса между количественными и качественными показателями. Анализ пяти критериев — результативности выполнения задач, понимания сроков, расстановки приоритетов, распределения задач

по ролям и организации рабочих процессов — показал, что успех проекта зависит как от соблюдения сроков, так и от слаженности взаимодействия участников. Особенно это актуально для команд, где каждый элемент системы влияет на общий результат. Например, плохая координация или конфликты внутри коллектива могут свести на нет даже безупречное выполнение задач.

Новый инструментарий частично решил проблемы, характерные для существующих методологий и IT-решений. Он учитывает личностно-ролевое распределение и предоставляет более точные прогнозы. Однако остаются ограничения. Например, перевод качественных показателей в количественные метрики по-прежнему вызывает сложности, а использование инструментария требует определенной технической подготовки пользователей. Это делает его менее доступным для широкого круга специалистов.

Для дальнейшего совершенствования инструментария предложены несколько перспективных направлений. Внедрение модулей машинного обучения может значительно повысить точность прогнозов, анализируя

исторические данные и предсказывая вероятность задержек или конфликтов внутри команды. Разработка удобного пользовательского интерфейса сделает инструментарий доступным для специалистов без глубоких технических навыков. Интеграция с большим количеством источников данных, таких как Slack, Microsoft Teams и Trello, позволит собирать более полную информацию о коммуникациях и задачах. Наконец, совершенствование методологии учета качественных показателей поможет минимизировать потерю информации при их переводе в количественные метрики.

Таким образом, разработанный информационно-аналитический инструментарий стал важным шагом вперед в области оценки результативности командной работы. Он объединяет количественные и качественные показатели, учитывает как производственные, так и личностные факторы. Однако дальнейшее развитие инструментария позволит сделать его еще более универсальным и доступным для широкого круга пользователей. Это создаст основу для новых решений в управлении коллективами и повышении их эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семина Анастасия Павловна. Влияние командной формы организации труда на эффективность организации. Формирование «суперкоманды» // Московский экономический журнал. 2021. №11.
2. Лопатин Д.Н. Agile — новый уровень мотивации в менеджменте // ОмГТУ. 2012.
3. Социология: учебник для прикладного бакалавриата / О.Г. Бердюгина [и др.]; ответственный редактор В.А. Глазырин. — 5-е изд., перераб. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2019. — 414 с. — (Бакалавр. Прикладной курс). — ISBN 978-5-534-04188-0.
4. Бурцева Софья Олеговна. Командная работа как часть корпоративной культуры в зарубежных компаниях // Бизнес-образование в экономике знаний. 2015. №1 (1).
5. Короткина Елена Дмитриевна, Пелевина И.М. Взаимосвязи представлений о команде и критериях ее эффективности // Вестник Санкт-Петербургского университета. Социология. 2009. №2-2.
6. Кожевникова, Е.В. Эффективность организации командной работы // Россия в XXI веке: стратегия и тактика социально-экономических, политических и правовых реформ : Материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых, Барнаул, 22–23 апреля 2021 года. — Барнаул: Алтайский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации», 2021. — С. 366–367. — EDN TQUIDQ.
7. Шорохова, И.С. Статистические методы анализа: [учеб. пособие] / И.С. Шорохова, Н.В. Кисляк, О.С. Мариев; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 300 с.
8. Кулакова, А.Б. Условия успеха командной работы в современной организации / А. Б. Кулакова // Социальное пространство. — 2020. — Т. 6. — № 2. — С. 4. — DOI 10.15838/sa.2020.2.24.4. — EDN XZRRKV.
9. Коркин С.А. Процессы, методы, модели и инструменты управления проектами // Региональная и отраслевая экономика. 2024.
10. Verwijs, C., Russo, D. A Theory of Scrum Team Effectiveness // ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. — 2021. — Vol. 32. — P. 1–51. — DOI: 10.1145/3571849.
11. Belbin R.M. Management Teams: Why They Succeed or Fail. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1981.
12. Kobushko, I., Kobushko, I., Starinsky, M., & Zavalna, Z. (2020). Managing team effectiveness based on key performance indicators of its members. International Journal for Quality Research.
13. Смирнова О.П., Москвин В.С. Практическое применение bi-инструментов для определения финансовой эффективности предприятия: статистический анализ // Вестник Академии знаний. 2024.

© Горячкин Борис Сергеевич (bsgor@mail.ru); Бузырев Илья Леонидович (buzrevilya@mail.ru);
 Чжен Артем Олегович (artchzhen.work@gmail.com); Юников Семен Романович (unikovsemen@gmail.com)
 Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПОСТРОЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ ПРОПЛАСТКОВ КОЛЛЕКТОРОВ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

CONSTRUCTION OF A STRUCTURAL MODEL OF RESERVOIR LAYERS OF A GEOLOGICAL MODEL

**A. Gresyuk
P. Kozhevnikova
V. Kuntsev**

Summary. The paper presents methods for increasing the efficiency of adaptation of the geometric structure of the deposit and proposes to use the advantages of vector computer graphics over raster graphics when creating a structural geological model. It also presents the main points of developing a system component for constructing a structural geological model. The efficiency of the proposed method is achieved due to the obvious gain in time when editing the structure of interlayers, represented by the model in the form of a graph.

Keywords: geological model, interlayers, geometric model, three-dimensional structural model, modeling.

Гресюк Алена Николаевна

канд. техн. наук, доцент,

Ухтинский государственный технический университет

Кожевникова Полина Валерьевна

канд. техн. наук, доцент,

Ухтинский государственный технический университет

Кунцев Виталий Евгеньевич

канд. техн. наук, доцент,

Ухтинский государственный технический университет

lekun90@mail.ru

Аннотация. В работе представлены методы повышения эффективности адаптации геометрической структуры месторождения, предлагается использовать преимущества векторной компьютерной графики над растровой при создании структурной геологической модели. А также представлены основные моменты разработки компонента системы для построения структурной геологической модели. Эффективность предлагаемой методики достигается за счет очевидного выигрыша во времени при редактировании структуры пропластков, представленной моделью в виде графа.

Ключевые слова: геологическая модель, пропластки, геометрическая модель, трехмерная структурная модель, моделирование.

В основе любой геологической модели лежит структурная модель, которая определяет геометрические характеристики месторождения. От точности воссоздания в трехмерной модели такой структуры напрямую зависят величины геологических запасов нефти и газа и степень соответствия фактической истории разработки при гидродинамическом моделировании.

Существующие на сегодняшний день технологии создания геологических моделей основаны на представлении строения месторождения в виде трехмерного растра — 3D сетки. В узлах такой сетки содержатся значения различных свойств и технологии моделирования направлены на изменения значений этих свойств. Адаптация же геометрии сетки к новым данным в полной мере не поддерживается. Например, изменение информации о тектоническом строении месторождения приводит к полной перестройке модели [1].

Для повышения эффективности адаптации геометрической структуры месторождения предлагается использовать преимущества векторной компьютерной графики над растровой при создании структурной геологической модели.

Предлагается рассматривать геологическую модель как систему пронизываемых пропластков (коллекторов).

Каждый пропласток, содержащий флюид (нефть, газ), а также служащий каналом, по которому перемещается флюид к скважинам в процессе его добычи, может быть представлен некоторым графом. Этот граф показывает связанность, выявленных на этапе изучения скважин, интервалов коллектора и может быть преобразован, например, в каркасную модель. Для более простого построения геометрической модели пропластка предлагается провести его разбиение на более простые фрагменты, которые получаются при разбиении пространства моделирования на призмы, получаемые из триангуляционной сети связанных скважин.

Эффективность предлагаемой методики достигается за счет очевидного выигрыша во времени при редактировании структуры пропластков, представленной моделью в виде графа.

В данной работе представлен алгоритм по разработке компонента системы для построения структурной геологической модели.

Получение геометрических моделей выглядит примерно следующим образом: в системе геологического моделирования создаются скважины, для которых задаются местоположение и альтитуда, вводятся данные

о инклинометрии и интервалах коллектора, а также значение ФЕС для этих интервалов. На основе данных о тектоническом строении залежи создается трехмерная сетка, описывающая структуру месторождения и характер накопления осадков (конфигурация слоев). В ячейки сетки, которые пересекают траектории скважин, переносится информация об интервалах коллектора и ФЕС. Значения во всей сетке получаются путем интерполяции перенесенных данных [2].

Геолог может повлиять на построение модели путем выбора и настройки алгоритма интерполяции или с помощью написания скриптов для используемой системы геологического моделирования.

Этот процесс показан на диаграмме потоков данных, изображенной на рисунке 1.

Разрабатываемая система предполагает введение еще одного этапа геологического моделирования — построения множества структурных моделей проницаемых областей. Для построения этой модели также

используются схемы сопоставления коллекторов (схемы корреляции). На этом этапе описывается структура, на основе которой, в дальнейшем, происходит распределение ФЕС. Диаграмма потоков данных, описывающих этот процесс изображена на рисунке 2.

Таким образом, объектом автоматизации является процесс получения трехмерной структурной модели сети коллекторов, получаемой по материалам промысловых и полевых геофизических исследований и по имеющимся двумерным геологическим моделям, отражающим особенности строения месторождения.

Основной целью создания системы является автоматизированное получение трехмерной структурной модели сети коллекторов по введенным в систему данным о скважинах, интервалах пропластков коллектора и их детальной корреляции и легкое редактирование полученной модели.

В данной работе для построения трехмерной модели планируется использовать:

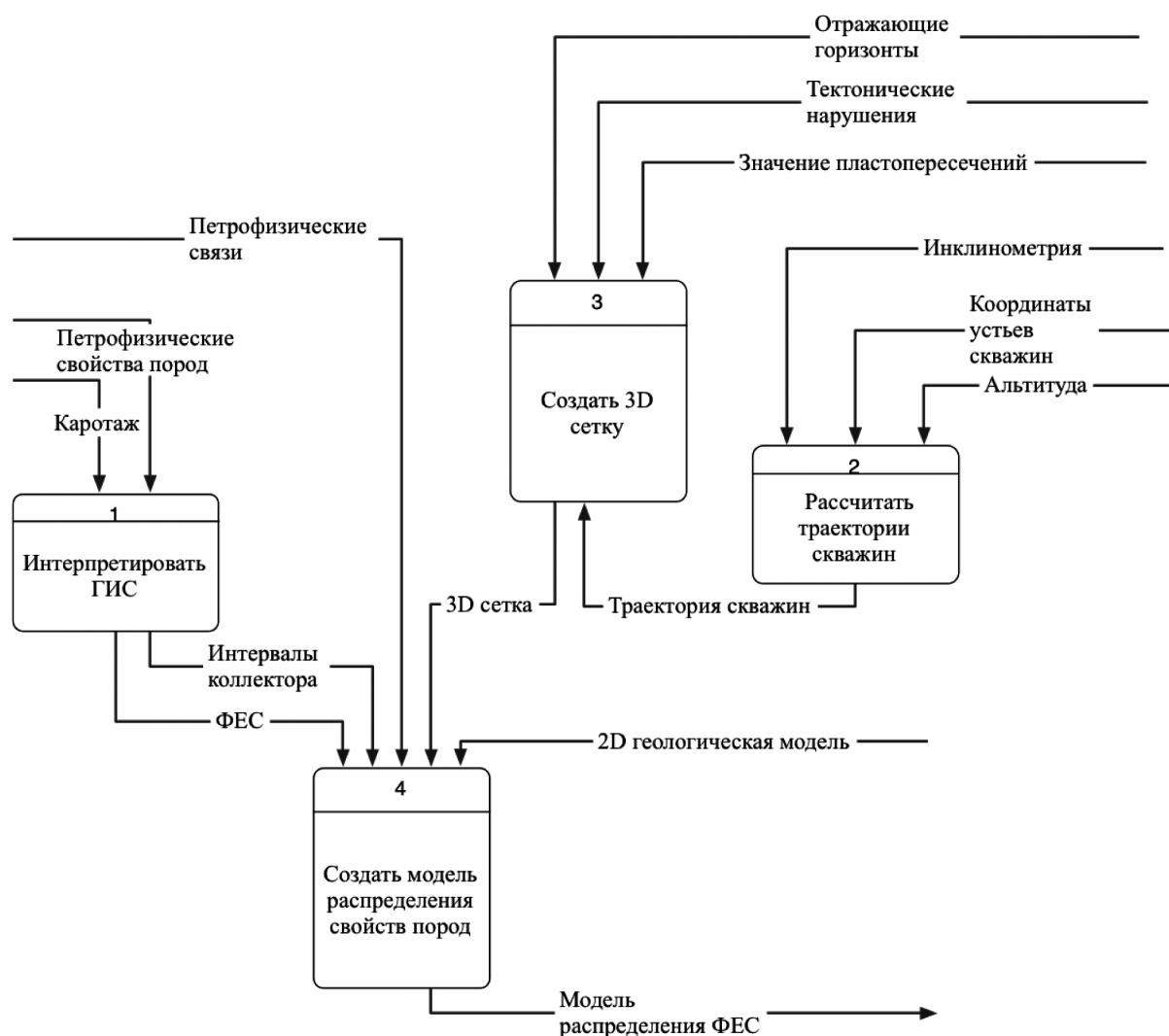


Рис. 1. Диаграмма потоков данных существующего процесса геологического моделирования

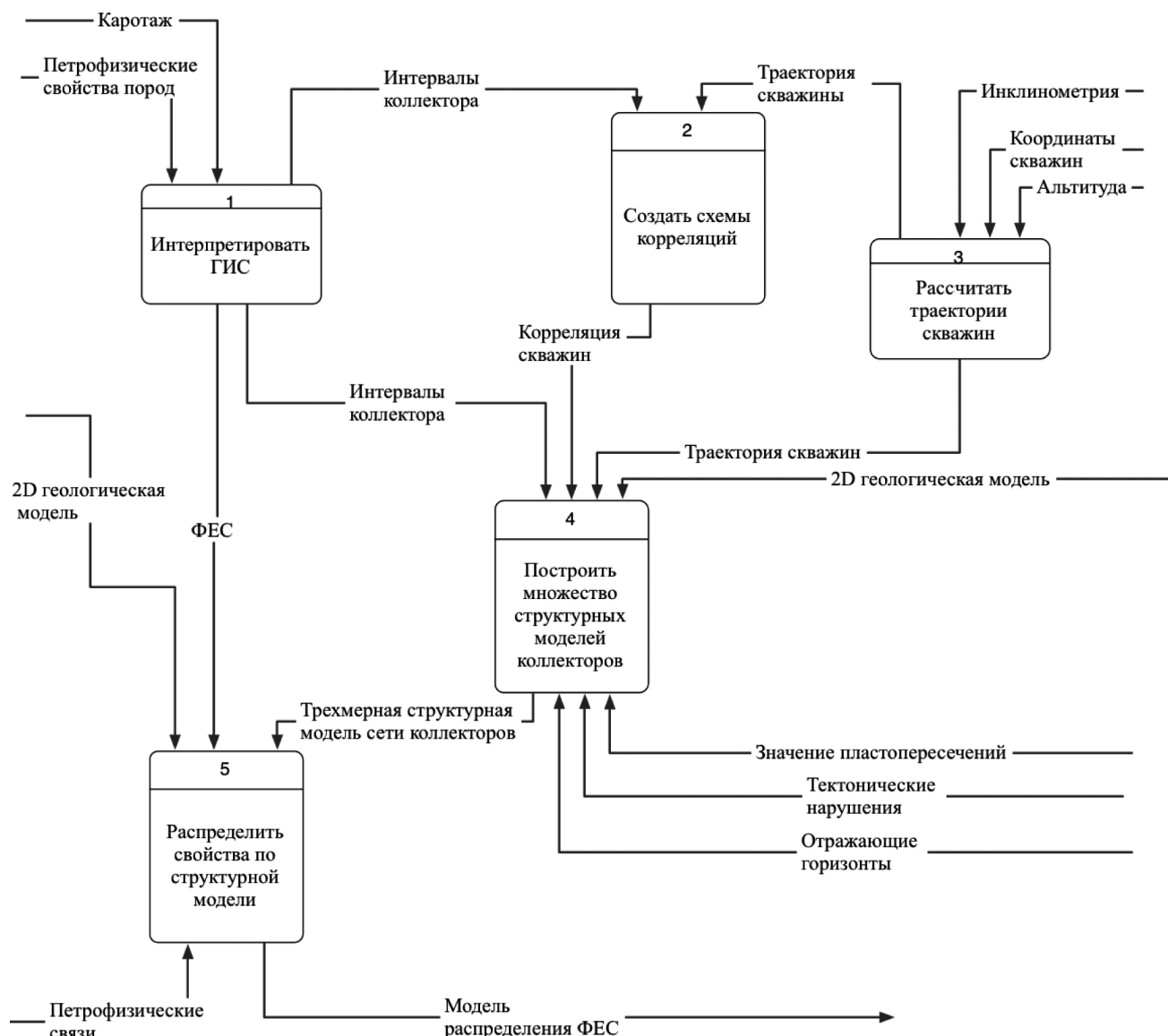


Рис. 2. Диаграмма потоков данных предлагаемого процесса геологического моделирования

- местоположение и альтитуду устьев скважин;
- детальную корреляцию скважин;
- интервалы коллектора.

Используемая методика предполагает разбиение пространства моделирования на призмы, на основе которого будет производиться разбиение пропластков на фрагменты. Далее для всех фрагментов создаются их геометрические представления, после чего они могут быть собраны в единую модель пропластка по общим границам. В результате должна получаться структурная модель пласта коллектора, которая характеризует пространственное положение проницаемых пропластков и будет использоваться при дальнейшем моделировании пласта [3].

Для построения модели, геологом должны быть введены как минимум 3 скважины, для которых будут

определены местоположение, альтитуда и введены интервалы коллектора. Интервалы коллектора получаются в результате интерпретации ГИС по выявлению различных литотипов, которые обычно хранятся в файлах.

Для редактирования модели геологу нужно указывать как соединены интервалы между парами скважин. Эту информацию он может получить из имеющихся схем корреляции. Схемы корреляции обычно рисуют в графических редакторах (например, Corel Draw) и их загрузка из файлов в систему невозможна, поэтому необходимо предусмотреть ручной ввод. Созданные соединения не должны пересекаться.

Реализация системы

В среде Cocoa модель и представление связываются с помощью шаблона Model-View-Controller. Его реали-

зация несколько отличается от традиционной тем, что общение между моделью и представлением происходит через контролера в обе стороны. На рисунке 3 показано как все части работают вместе.

Для передачи данных между представлением и моделью используются протоколы PairWellViewDataSource и WellViewDataSource, которые поддерживаются контролером и требуются для работы соответствующих представлений. Для передачи действий пользователя используется механизм target-action, который является реализацией паттерна команда (command). Для передачи уведомлений об изменении модели применяется

объект NotificationCenter, реализующий паттерн наблюдатель (observer).

Диаграмма классов представления изображена на рисунке 4:

Общий алгоритм построения структурной модели пропластков

В связи с тем, что пласт-коллектор имеет сложную, неоднозначную пространственную геометрию, имеет разрывы, пустоты в своей структуре, то получение единой граничной модели такого пласта представляет собой большую проблему. Поэтому методика конструи-

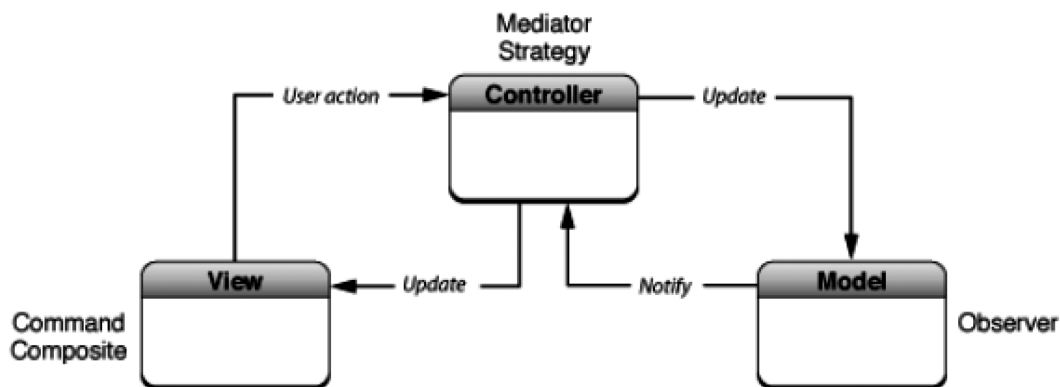


Рис. 3. Версия шаблона проектирования MVC в среде Cocoa

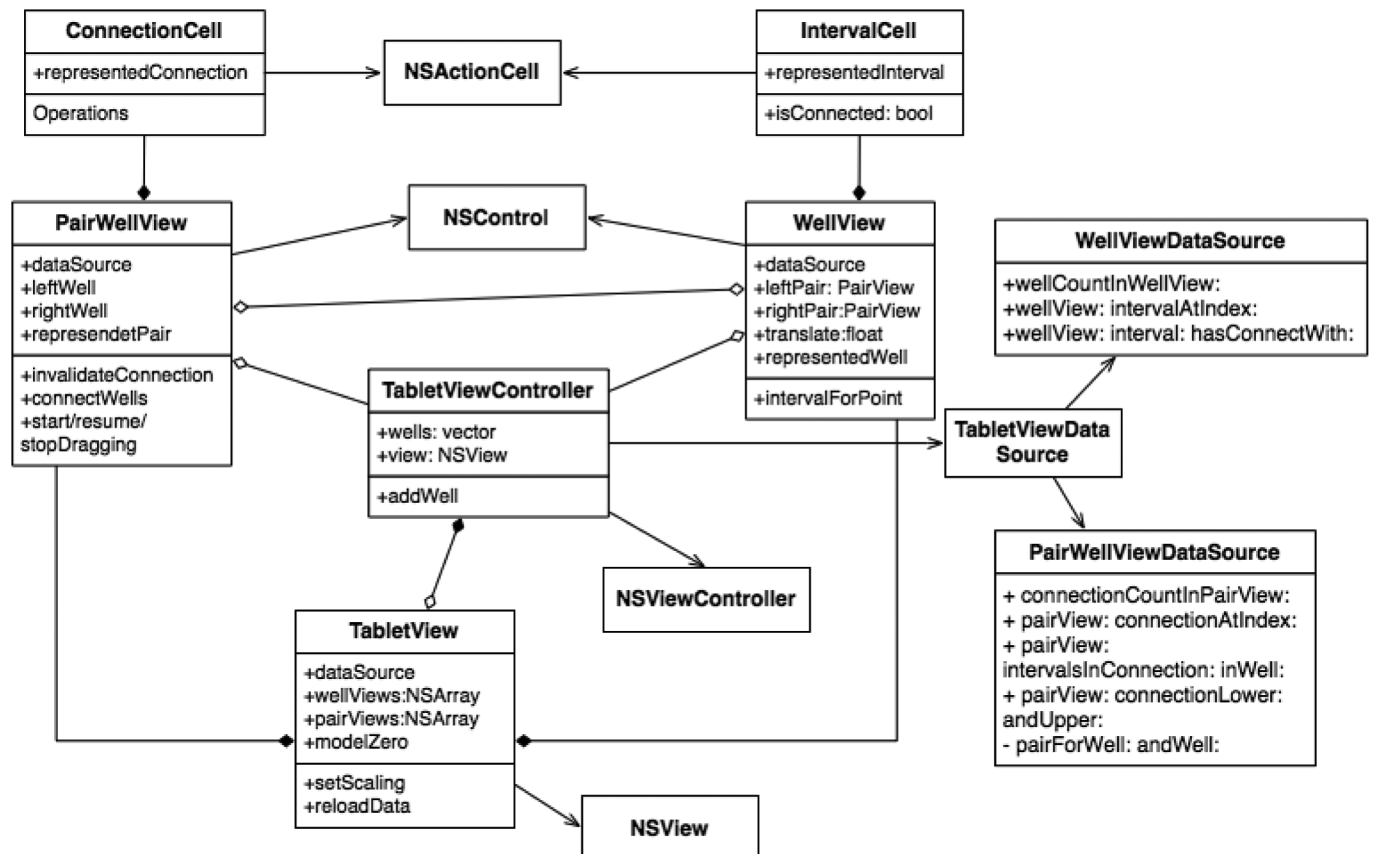


Рис. 4. Диаграмма классов, представление

рования пласта-коллектора основывается на разбиении такого пласта на отдельные, более простые фрагменты, моделировании их, и объединения граничных моделей фрагментов в единую модель пласта:

1. Создаются траектории скважины на основе местоположения устья, альтитуды, инклинометрии.
2. Загружается информация об интервалах пересечения траекторий скважин пластов-коллекторов (далее Интервал). Данными служат результаты интерпретации ГИС (геофизические методы исследования скважин) по выделению коллекторов.
3. Строится триангуляционная сеть по координатам пластопересечений скважин (либо по координатам устьев скважин). Ребра сети представляют связи между парами скважин. Треугольники — связи между тройками скважин.
4. На основе п.3 осуществляется моделирование связанности Интервалов между парами скважинам. На данном этапе моделирование сводится к заданию связей между интервалами на основе схем сопоставления коллекторов и представлений геолога о структуре месторождения. Получаемые связи не должны пересекать друг друга.
5. Разделение единого пласта на пропластки (более мелкие пласты). Для этого осуществляется проход по всем Интервалам и на основе связей между ними Интервалы разбиваются на отдельные группы. Каждая группа характеризуется принадлежностью к какому-либо отдельному пропластку коллектора.
6. На основе п.3 скважины объединяются в тройки. На основе п. 5 осуществляется разбиение Интервалов в пределах тройки на отдельные группы.
7. Геометризация групп, определенных в п.6, во фрагменты пропластков. Вначале создаются вертикальные разрезы пропластков коллектора в пределах троек скважин. Таким образом тройка траекторий скважин разбивает пространство моделирования на отдельные вертикальные призмы, разбивающие весь единый пласт на отдельные фрагменты. Боковые грани призмы служат сечениями, на которые «нанесены» разрезы пропластков коллектора. Пространство на сечениях между разрезами коллектора относится к пропласткам неколектора.
8. Далее, используя полученные в п.7 сечения как исходные данные, происходит построение каркасной модели фрагментов пропластков.
9. На основе п.3. фрагменты связываются в единую граничную модель пласта коллектора.

Создание трехмерных фигур из выделенных фрагментов

Создание фигур происходит в 7 этапов:

- 1) создание поверхностей, представляющих разрезы, описаны ранее;

- 2) создание трехмерной сетки;
- 3) перенос полученных разрезов на нее;
- 4) расчет верхней и нижней границ призмы;
- 5) трехмерная интерполяция значений коллектора;
- 6) отсечение ячеек со слишком малым значением признаком коллектора;
- 7) удаление невидимых ячеек.

Во время создания разрезов в первую очередь задача сводится к решению на плоскости, для этого применяется аффинное преобразование, состоящее из переноса начала координат к 1-й скважине и поворота, такого чтобы прямая проведенная через обе скважины была параллельна оси ОХ.

Далее находятся крайние точки на скважинах для данного соединения. Полученный четырехугольник сводится к параллелепипеду, нижний левый угол которого лежит в начале координат. Пример преобразования можно увидеть на рисунке 5. Слева показан четырехугольник до преобразования, а справа после. Для удобства на обоих рисунках нанесены прямые параллельные осям в исходном пространстве. Как можно увидеть, данное преобразование состоит из переноса, сдвига и перспектив.

Для получения матрицы преобразований необходимо решить систему уравнений (1):

$$\begin{cases} (0, LB, 0) \times M = (0, 0, 0) \\ (0, LB + LH, 0) \times M = (0, H, 0) \\ (W, RB, 0) \times M = (W', 0, 0) \\ (W, RB + RH, 0) \times M = (W', H, 0) \end{cases} \quad (1)$$

где: M — искомая матрица.

Решением этой системы уравнений показано в формуле (2):

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & (LB - RB) / W & (RH - LH) / LH * W \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -LB & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

После примененных преобразований, решение задачи становится тривиальным, нужно всего лишь создавать ребра для интервалов, соединять интервалы ребрами, проходящими до середины четырехугольника в исходном пространстве и до середины между 2 интервалами в преобразованном пространстве.

После решения этой задачи нужно применить обратное преобразование, чтобы получить точки в исходном пространстве.

Создание трехмерной сетки

Класс `grid` представляет трехмерную сетку с равными размерами по всем трем осям. Объекты этого класса

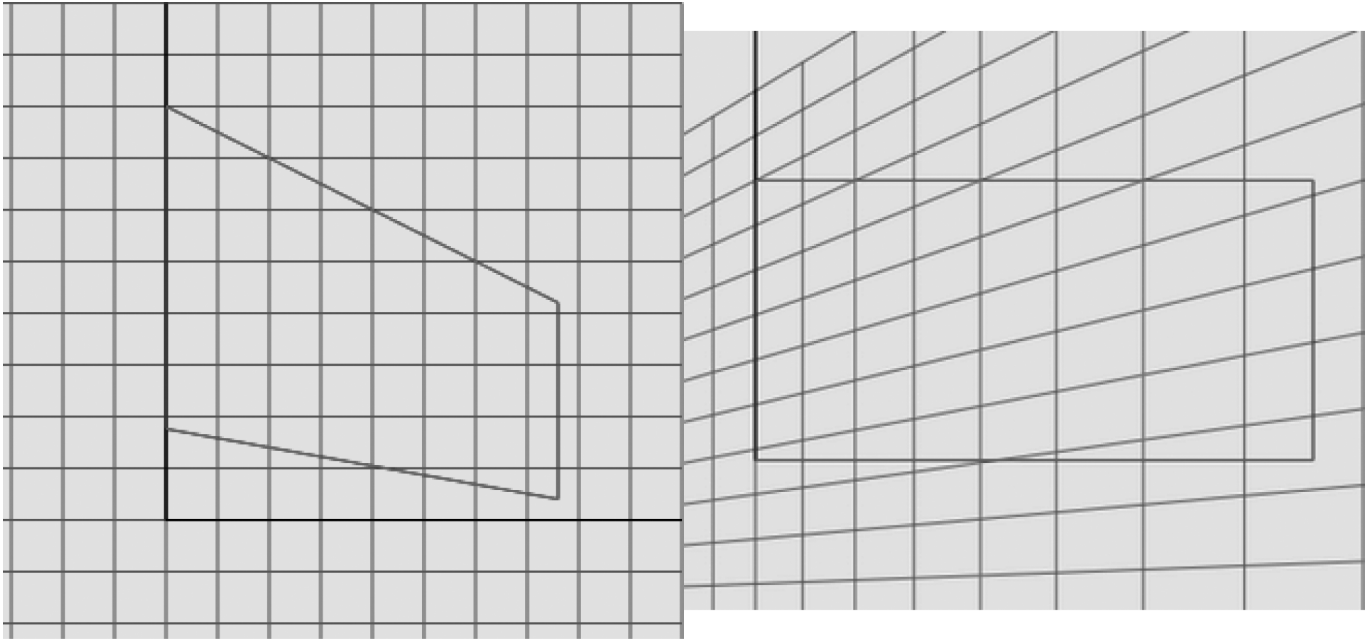


Рис. 5. Сравнение расположения границ соединения до и после преобразований

содержат переменную n , показывающую размерность, и массив размера $n \times n$, состоящий из `value` типа `float` и `isConst` типа `bool`. `Value` хранит значение признака коллектора, а `isConst` устанавливается в состояние `true`, если значение ячейки не должно меняться в процессе вычислений.

Для того, чтобы преобразовывать значения индекса сетки в 3D координаты и обратно, используется класс `Transformator`. Объекты этого класса содержат матрицу аффинных преобразований и размерность сетки, необходимая для перевода плоского индекса в трехмерный. Матрица преобразований нужна для того, чтобы привести призмы различных форм к единому виду и размерам, что позволяет упростить перевод между координатами сетки и координатами модели, а также дает сэкономить память на хранении координат ячеек сетки.

Класс `Transformator` предоставляет методы для следующих преобразований:

- преобразование 3D точки в плоский индекс;
- преобразование плоского индекса в трехмерный;
- преобразование трехмерного индекса в плоский;
- преобразование плоского индекса в 3D точку;
- преобразование 2D индекса для матрицы, представляющей разрез, в плоский индекс 3D сетки.

Перенос разрезов на 3D сетку

Перенос разрезов происходит следующим образом: на поверхность, представляющую одно соединение накладывается преобразование, описанное выше, и делается проекция на плоскость. Далее для каждой ячейки, представляющий данный разрез производится провер-

ка средствами фреймворка `Core Graphics`, попадает ли она в полученный полигон. Если да, то ячейке устанавливается признак коллектора, иначе признак не коллектора.

Расчет верхней и нижней границ фрагментов

Для расчета крышек призмы вначале интерполируется значение признака коллектора на краю призмы. В качестве исходных данных используются крайние ребра разреза. Для работы этого алгоритма необходимо получить верхние и нижние ребра разрезов фрагментов.

Интерполяция значений производится с помощью дискретного варианта уравнения Лапласа.

Далее интерполируется значение высоты для крышек. В качестве исходных данных используется крайнее значение в разрезе с признаком коллектора.

Трехмерная интерполяция значений коллектора

Для нахождения всех точек по полученным исходным данным, получение которых описано выше, используется итерационный алгоритм решения дискретного варианта уравнения Лапласа на трехмерной сетке.

Алгоритм на каждой итерации проходит все ячейки сетки и записывает в нее среднее значение всех соседних ячеек, при этом не меняя значения в точках, которые являются исходными данными. Итерации повторяются до тех пор, пока максимальное изменение значения в ячейках не будет меньше ϵ . Такой алгоритм всегда будет сходиться вне зависимости от выбора нулевого приближения.

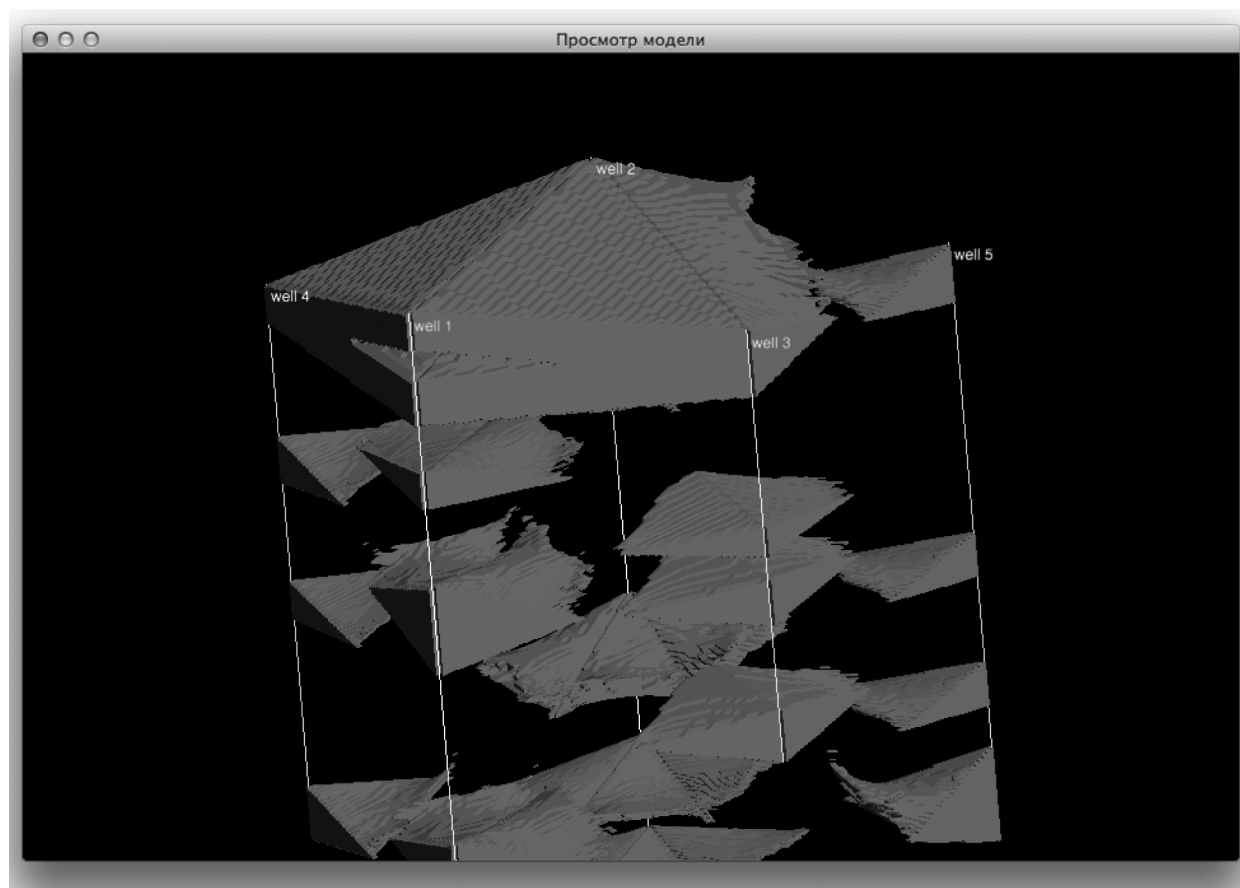


Рис. 6. Интерфейс просмотрщика модели

Визуализация результатов построения

Визуализация результатов построения происходит путем построения изоповерхности получаемого скалярного поля методом *marching cubes*.

Этот алгоритм проходит все ячейки трехмерной сетки (кубы), для которых просматриваются значения в ее 8 углах и определяет какие полигоны нужно построить

для представления проходящей через нее изоповерхности.

Так как рассматриваются только 8 точек в кубе, которые могут быть в двух состояниях. Таким образом всего существует 256 возможных конфигураций полигонов, что позволяет составить таблицу с треугольниками, необходимыми для визуализации данной части изоповерхности, для каждого куба.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев С.В., Григорьевых А.В. Пути повышения эффективности построения трехмерных цифровых геологических моделей. — Ухта Филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2012.
2. Закревский К.Е. «Геологическое 3D моделирование» М.: ООО «ИПЦ «Маска», 2009 — 376 с.
3. Яковлев С.В., Григорьевых А.В. Методика построения трехмерной граничной модели коллектора. Сб. тезисов докладов V научно-технической конф. молодых специалистов и работников «Инновации молодежи — потенциал развития нефтегазовой отрасли». ООО «Газпром добыча Астрахань». — Астрахань, типография «Март», 2013. С. 68–69.

© Гресюк Алена Николаевна; Кожевникова Полина Валерьевна; Кунцев Виталий Евгеньевич (lekun90@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГЛУБИННОЙ СЕМАНТИКИ БОЛЬШИМИ ЯЗЫКОВЫМИ МОДЕЛЯМИ

METHODS FOR ASSESSING DEEP SEMANTICS EXTRACTION BY LARGE LANGUAGE MODELS

D. Gromozdov
Yu. Gapanyuk
G. Afanasyev

Summary. The widespread use of textual data and the gradual increase in the complexity of natural language processing tasks that can be solved with large language models leads to the discovery of non-trivial facts, or underlying semantics, in the data. Creating false facts to produce an answer for the user is also a common characteristic of language models, known as hallucinations. It is necessary to develop a system for evaluating the truth of a fact obtained from a model. The aim of this paper is to identify a metric suitable for the evaluation of deep semantics. A statistical semantic content estimation method and a method based on machine learning were applied to the output of a large language model, which was tasked with identifying non-trivial fact from texts. The possibility of combining the approaches, to obtain a more accurate and interpretable metric, is discussed. The conducted research defines the limits of applicability and interpretability of modern metrics for the tasks of semantic analysis solved by means of large language models. We propose possible ways of solving the problem of selecting a semantic metric based on the widely spread method of intelligent agents, vector databases used for retrieval augmented generation, and other software solutions for analyzing the truth of facts or their adequacy to the information contained in the corpus of texts.

Keywords: large language models, metric, evaluation models, deep semantics, metagraph.

Громоздов Данила Романович

Аспирант, Московский государственный
технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)
gromozdovdr@student.bmstu.ru

Гапанюк Юрий Евгеньевич

К.т.н., доцент, Московский государственный
технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)
gapyu@bmstu.ru

Афанасьев Геннадий Иванович

К.т.н., доцент, Московский государственный
технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)
gaipcs@bmstu.ru

Аннотация. Широкое использование текстовых данных и постепенное усложнение задач обработки естественного языка, которые возможно решить с помощью больших языковых моделей, приводит к выявлению в данных нетривиальных фактов, или глубинной семантики. Создание ложных фактов для выдачи ответа пользователю — также распространённая характеристика языковых моделей, известная как галлюцинации. Необходимо разработать систему оценки истинности полученного от модели факта. Целью данной работы является определение метрики, подходящей для оценки глубинной семантики. Метод статистической оценки семантического содержания и метод, основанный на машинном обучении, были применены к выводам большой языковой модели, которой была поставлена задача выявления нетривиального факта из текстов. Обсуждается возможность совмещения подходов, для получения более точной и интерпретируемой метрики. Проведённое исследование определяет границы применимости и интерпретируемости современных метрик для задач семантического анализа, решаемых средствами больших языковых моделей. Нами предложены возможные пути решения проблемы подбора семантических метрик, основанные на широко распространяемом методе интеллектуальных агентов, векторных баз данных, используемых для синтеза ответа дополненного поиском, и других программных решениях для анализа истинности фактов или их адекватности информации, заключённой в корпусе текстов.

Ключевые слова: большие языковые модели, метрики, оценочные модели, глубинная семантика, метаграфы.

Введение

Создание архитектуры, основанной на механизме внимания, открыло возможность для скачка в эффективности обработки текстов на естественном языке. На основе данного подхода к обработке данных, содержащих последовательности, создано большинство современных больших языковых моделей или LLM (Large Language Models). Данный тип моделей позволил

далеко продвинуться в работе с пользовательскими запросами на естественном языке.

Благодаря развитию технологий обработки естественного языка, текстовые данные становятся частью больших данных и могут быть обработаны программными средствами, а не только с помощью экспертов. Важную роль в процессе анализа семантики в производственных масштабах играет валидация полученного

результата — необходимо убедиться, что в полученные большой языковой моделью данные не внедрилась галлюцинация (факты, созданные LLM для выдачи ответа, не имеющие основы в реальности) или ложные факты. Таким образом, существует необходимость в системе метрик, которые могли бы с достаточной степенью уверенности оценивать семантические характеристики ответа используемой модели.

Современные методы для оценки семантики ответов больших языковых моделей можно подразделить на две основные группы: статистические методы и методы модель-оценивает-модель. Статистические метрики основываются на числовых оценках схожести последовательностей, полученных в результате ответа на пользовательский запрос и представляющих собой эталон ответа. Рассматриваемый тип оценок даёт достаточно строгие результаты вычисления метрики, но также требует чёткости критериев истинности полученного текста. Оценки на основе статистики оказываются привязаны к точным формулировкам, заданным экспертами, и к конкретным терминам, семантика переданная перефразированно не будет улавливаться при измерении эффективности.

Метрики на основе машинного обучения используют специально обученные языковые модели, которые выполняют запросы, требующие у них выдачи оценки ответу основной большой языковой модели. В таком случае нет возможности отследить чёткие критерии, по которым модель-ассессор оценивает истинность ответа, но заложенные в параметры модели внешние знания позволяют ей проводить семантический анализ текста на естественном языке более гибко, не привязываясь к конкретным терминам или словам в эталонах ответов.

В данном исследовании анализируются подходы к анализу глубинной семантики. Глубинная семантика — это нетривиальные факты, которые в скрытом виде могут содержаться в корпусе текстов, а также объединять информацию из разных документов. Для отображения такой иерархической структуры мы предлагаем использовать метаграфовую модель, разрешающую объединение элементов в метавершины более высокого порядка и создание метарёбер, связывающих элементы на более высоком уровне.

Таким образом, задача оценки ответов больших языковых моделей, работающих с глубинной семантикой является нетривиальной и требует разработки новых методов на основе уже имеющихся в нашем распоряжении.

Методы

1. Статистические методы оценки

Помимо непосредственно метода анализа текстов с помощью больших языковых моделей необходимо

также разработать подход к оценке качества его работы. Поскольку мы имеем дело с нечёткой системой ответов моделей, в отличие, например, от задачи классификации, где имеется конечное множество возможных результатов, при работе с большими языковыми моделями количество вариантов удовлетворительного ответа модели не фиксировано заранее при постановке задачи. В условиях большой вариативности необходимо подобрать более лабильный метод оценки работы. Далее будут рассмотрены существующие подходы к показателям качества работы моделей семантического анализа с применением больших языковых моделей.

Первая группа метрик, рассматриваемых нами для проведения оценки эффективности семантического анализа большими языковыми моделями, использует числовые статистические методы для измерения схожести содержания полученного от модели ответа с представленным исследователем эталоном.

$$Q(y) = f(y, \hat{y}), \quad \hat{y} = \{y_i * g(y_i | \beta)\}, \quad (1)$$

где $Q(y)$ — это метрика, или оценочная функция для эффективности модели; $f(y, \hat{y})$ — функция, которая может иметь дополнительные параметры: она служит для установления соотношения между верными ответами модели и несоответствующими заданным критериям истинности; y — это множество ответов, данных обученной моделью, а \hat{y} — множество верных ответов; функция $g(y|\beta)$ — сопоставление i -ого ответа модели с соответствующим параметром β , отражающим принятые исследователями или экспертами критерии истинности.

Функция $g(y)$ принимает значение 1, если элемент совпадает с верным ответом, и 0, если не соответствует параметру истинности. Чаще всего функция $Q(y)$ является обратной зависимостью, связывающей верные ответы с совокупностью всех выводов модели.

Параметр β может быть не выражен явно, а заключаться, например, в экспертности человека, составляющего набор данных, или в правильности выполнения программы, если мы говорим о частой проблеме, решаемой в сфере семантического анализа — написание SQL запроса на основе пользовательского обращения на естественном языке. Для технических данных это может быть соответствие теоретически рассчитанному по адекватному задаче набору формул значению.

В случае же глубинной семантики определить критерии истинности β гораздо сложнее в виду вариативности возможных верных интерпретаций набора данных и использования системой внешних знаний [7].

Часто справедливо и следующее утверждение, касательно метрики Q :

$$Q \in [a, b], \quad (2)$$

где a и b — это нижняя и верхняя граница значений, которые может принимать метрика.

Действительно, производить интерпретацию и сравнивать оценки для различных моделей легче, когда у нас есть чёткие границы, обозначающие экстремальные значения, которые можно интерпретировать как наилучшее и наихудшее соответствие заданным критериям истинности.

Наиболее простые метрики проверяют точное соответствие полученного ответа эталону. Такие оценки подходят там, где ответ может быть чётко и однозначно формализован, например, в задаче генерации SQL-запроса на основе пользовательского запроса на естественном языке. В таком случае семантика, заключённая в сообщении, представляется в виде кода и соответствует определённым функции или атрибуту в запросе к базе данных, однако и в решении такой задачи, по замечаниям исследователей, может проявляться вариативность формулировки запроса при достаточно сложных отношениях таблиц и операций над ними. Например, это может быть метрика точности (ассигасу), представляющая собой отношение количество верных (в точности совпадающих с эталоном) ответов к общему количеству выводов модели [15].

Если вспомнить о метрике в геометрическом смысле, как о функции вводящей расстояние между элементами, то стоит вспомнить и о расстоянии Левенштейна. Это метрика, которая вводит расстояние между двумя последовательностями символов, которое характеризуется количеством замен и других преобразований (имеющих разный вес), которое необходимо сделать, чтобы из одной получить другую. Глубинную семантику, имеющую высокую лабильность способов выражения очевидно не получится измерить с помощью расстояний Левенштейна, но это важный этап перехода от точных совпадений к сопоставлению символьных последовательностей между собой [5].

Одна из первых метрик для автономной оценки качества работы моделей обработки естественного языка — Помощник в Оценке Двухязычных Результатов/Bilingual Evaluation Understudy (BLEU). Изначально данная метрика создавалась в 2001 году командой авторов из IBM для оценки в задачах машинного перевода [8]. В приложении к задаче синтаксического парсинга, например, мы можем представить, что это задача перевода текста с естественного языка на язык грамматики и синтаксиса языка. В таком случае, становится возможным применение метрики BLEU при наличии эталонного примера синтаксического разбора текста.

Тем не менее, в результате тщательного исследования применения метрики BLEU для оценки качества Э.

Райтер в статье [10] представляет критику использования данного подхода для решения задач обработки естественного языка за исключением машинного перевода. Если говорить о задаче синтаксического парсинга, то в данном случае мы имеем возможность получить точное соответствие текста на естественном языке структурам в понятиях его грамматики. Однако в случае семантического анализа получить такое соответствие гораздо сложнее, а следовательно метод оценки качества BLUE не подходит для формирования отклика о качестве работы исследуемой модели.

В 2019 году Соном Линьфэно и соавтором была предложена [14] вариация метрики BLUE, расширяющий её применение на язык AMR (Abstract Meaning Representation, Представления Абстрактного Смысла), — SemBLUE. Вслед за оригинальной метрикой BLEU поиск соответствий ищется в пределах N элементов от исследуемого слова, но в случае SemBLEU поиск осуществляется в ширину по дереву представления семантики. В качестве элементов выступают вершины графа, соответствие которых и проверяется аналогично оригинальному методу. В данном случае поиск в пределах N элементов более эффективный, поскольку несомненно затрагивает слова, связанные друг с другом, что отнюдь не гарантируется контекстом в текстовой форме предложения, особенно при малых значениях N .

SemBLUE хорошо подходит и для семантического, и для синтаксического анализа, однако для его применения необходимо наличие базы данных, содержащей AMR представления всех предложений, содержащихся в корпусе текстов, что очевидно трудно выполнимо, хотя и возможно благодаря современным синтаксическим анализаторам, или парсерам. Тем не менее проблема учёта синонимии и вариативности форм представления одной семантики актуальна и для этого метода, который также зависит от формулировок экспертов. А проверка разных вариантов эталонного решения займёт ещё больше времени из-за необходимости применения алгоритма поиска в ширину по дереву, которое может иметь достаточно разветвлённую структуру.

Из недостатков статистических метрик можно указать то, что они эффективны в основном для измерения адекватности модели задаче до её внедрения в производственные процессы. Требуется иметь заранее подготовленный набор эталонных ответов для тестовых вариантов задач (бенчмарки), чтобы оценить работу модели в производстве, будет необходимо дополнительно создать массив истинных фактов, соответствующих текстам, содержащимся в реальной базе данных компании. Разметка данных, тем более содержащих сложные семантические связи, значительно повышает затраты людских ресурсов.

2. Методы на основе оценивающих моделей машинного обучения

Среди современных технологий по оценке эффективности больших языковых моделей можно выделить методы, основанные на использовании других моделей машинного обучения, также называемые «Большая языковая модель, как судья» (LLM-as-a-judge). Создание оценочной нейронной сети производится путём дообучения уже имеющихся моделей, способных к работе с естественным языком, использоваться может даже вариант той же модели, ответы которой подвергаются оценке [13].

Для дополнительного обучения формулируется особая форма запроса, в которой содержатся:

- Общее описание желаемого отчёта о проведённом анализе семантики, элементы ответа и требования к оценке: ограничение на целые значения, диапазон оценивания;
- Запрос, который был предоставлен большой языковой модели для выдачи соответствующего ответа;
- Ответ, который был выдан моделью на пользовательский запрос;
- Эталонный вариант ответа, предоставленный производящим оценивание программистом;
- Рубрикация оценок: для каждой возможной оценки программистом или другим экспертом предоставляется текстовое описание критериев присвоения соответствующего значения реакции большой языковой модели [9].

Очевидно преимущество данного метода — он сам может оценивать синонимичность замен или вариаций в тексте относительно данного эталона ответа. Модель машинного обучения, особенно большая языковая, имеет навыки анализа текстов, которые может применять к своим собственным ответам. Предоставленные во время дообучения на человеческих примерах оценивания знания могут быть использованы для более строгого анализа данных запроса и ответа, а также установка на выявление ошибок позволяет уменьшить шанс того, что модель будет только «хвалить» ответы оцениваемой модели.

Если возвратиться к формуле 1 из предыдущего раздела, то можно сказать, что в качестве критерия «истинности» данных β будут выступать непосредственно сами параметры оценивающей модели.

Таким образом, исходя из общего вида запроса натренированной модели, обратившись к формуле 2, в случае предобученных оценивающих моделей это выражение будет иметь следующий вид: $Q \in [1, 5]$, $Q \in \mathbb{Z}$. Функция оценки в таком случае становится дискретной и прини-

мает конечное число значений: 5, в отличие от статистических метрик, которые чаще всего непрерывны в пределах своей области определения.

При этом возможно задать оценивающей модели и дробные значения на отрезке $[0; 1]$, но тогда мы не можем точно интерпретировать присвоение того или иного нецелого значения метрики ответу. Описание критериев оценки доступно только для конечного числа реперных точек, и даже если модель предоставит некоторые пояснения к своему решению, точного соответствия качественного критерия для текста на естественном языке и численного значения не будет предоставлено [16].

Отсюда вытекает один из недостатков методов на основе машинного обучения — их малая математическая интерпретируемость. Мы можем только согласиться с обоснованиями модели для присвоения определённого значения метрике или же их отвергнуть, но это потребует дополнительного анализа от человека-эксперта. Для более точного соответствия определению метрики может быть необходимо дополнение метода более точными техниками анализа данных.

3. Представление глубинной семантики

Метаграф — это графовая иерархическая структура, описываемая следующим образом:

$$M = \langle V, MV, E, ME \rangle, \quad (3)$$

где V — это множество вершин метаграфа, MV — множество его метавершин, E — множество рёбер метаграфа, ME — его метарёбер [1, 4].

Если говорить о семантическом применении данной модели, то можно сопоставить этим элементам определённые значения. Вершины чаще всего обозначают простые сущности, обозначенные в текстах как субъекты и объекты действий. Сами действия соответствуют рёбрам метаграфа, они описывают связи и взаимодействия сущностей, выраженные на естественном языке в документах. Метавершины могут использоваться для обозначения более абстрактных и семантически широких понятий, включающих в себя конкретные объекты-вершины. Метарёбра могут объединять действия в более широко плановые события.

Атрибуты всех элементов чаще всего служат для типизации или характеристики действия или сущности. Конечно, к этому не сводятся все возможные области применения метаграфовых структур: например, метавершины могут отображать и предложения, тексты, документы, метарёбра — связи внутри корпуса.

Возможно использование методов на основе оценки качества и количества вершин графа и их степеней

(количество связей), качество рёбер (с теми ли вершинами образовались связи), в целом ряд методов оценки связности графа при необходимости может быть переложен на семантический анализ [11]. К сожалению, мы не располагаем достаточной графовой теорией для метаграфов, чтобы адекватно экстраполировать понятие связности графа и её исследование на иерархические структуры нашей модели.

Метод Smatch, предложенный Шу Цаем, может служить примером графовой семантической метрики, которая осуществляет алгоритм жадного поиска с восхождением к вершине (hill-climbing). Он применяется к AMR представлениям текстов, предложений и фактов [2]. В отличие от SemBLEU, о котором говорилось выше, он не принимает во внимание вершины синтаксического графа, а только проходит по связям наиболее оптимальным путём и оценивает метки на рёбрах. В некотором роде это делает его более гибким по отношению к сущностям, которые будут обозначать семантику вершин, но гораздо более зависимым от точности воспроизведения семантики связей.

Глубинные семантические связи всё же и этим методом уловить будет сложно, поскольку для этого нужен очень точный поиск вглубь дерева, а также установление связей между деревьями, которого не предусмотрено в Smatch. Дополнительную трудность создаёт то, что имеющаяся концепция метаграфовой XML модели имеет мало общего с AMR представлениями фактов и предложений.

4. Постановка эксперимента

В качестве большой языковой модели использовалась GPT-4o. Для проверки метрик был создан искусственный набор данных (toy dataset), содержащий комплекты из трёх небольших документов (2–3 предложения), которые связаны между собой тематикой и скрытыми семантическими связями. На этих данных строился метаграф для нетривиального факта, который включал бы в себя связь между документами.

Данная задача решалась большой языковой моделью по методу one-shot — в запросе предоставляется один общий пример подготовленного нами метаграфа на основе одного комплекта документов из набора данных, а модель создаёт метаграфы для остальных комплектов по предоставленному образцу.

Для вычисления метрики BLEU использовалась функция `sentence_bleu()` из модуля `nltk` языка Python для обработки естественного языка. Разбиение текста на русском языке на отдельные слова и элементы текста производилось с помощью токенизатора модуля `razdel` языка Python.

В качестве модели-ассессора также использовалась оценивающая модель GPT. Параметры, описание и критерии для каждой дискретной оценки в виде примеров метаграфа достойного присвоения конкретного значения предоставлялись вместе с запросом на оценку, включавшем комплект документов и полученный ранее от модели ответ в виде XML документа, содержащего факт в метаграфовом виде.

Результаты

При применении статистического метода для оценки эффективности большой языковой модели GPT-4o было получено среднее значение метрики BLEU = 0,7437.

Применение GPT-модели для оценки результата генерации факта в метаграфовом виде большой языковой моделью дало среднее значение нашей метрики $Q_{\text{модели-ассессора}} = 4,8$.

Коэффициент корреляции Пирсона между оценкой, данной моделью машинного обучения, и значением статистической метрики $r = 0,7894$.

Обсуждение

В целом полученное значение BLEU = 0,7437, является неплохим результатом, поскольку максимум метрики — единица. Однако этот показатель не является высоким для SotA (State-of-the-Art, эталонной) большой языковой модели.

Мы видим достаточно высокую среднюю оценку от модели-судьи (4,8 балла), но не можем однозначно её интерпретировать — возможно модель просто «хвалит» другую большую языковую модель за хорошие ответы, не особо обращая внимания на недостатки точности семантики ответа [12]. Высокую оценку также можно объяснить способностью больших языковых моделей улавливать перефразирование, обращаться с синонимами и выявлять основную мысль и смысл, очищая от вспомогательных элементов. В целом, модель достаточно точно следовала данным ей критериям оценки.

Достаточно высокая положительная степень корреляции по Пирсону ($r = 0,7894$, значения r лежат в диапазоне $[-1; 1]$) позволяет предложить наличие прямой линейной связи между оценками статистической и большой языковой модели, что говорит в пользу того, что ответы модели-судьи носят не случайный, а закономерный характер и соотносятся с более точной математически метрикой.

Исходя из имеющихся преимуществ и недостатков современных подходов к оценкам текстовых данных, выдаваемых большими языковыми моделями, можно

предположить, что необходим некоторый новый тип метрики, направленный на включение глубинной семантики в процесс измерения эффективности используемых программных средств на основе машинного обучения.

Дообученные модели оценки могут послужить основой для такого метода, однако неоднозначность интерпретации их работы не позволяет сделать их единственным этапом в процессе анализа эффективности. Для уточнения и упорядочения критериев истинности можно обратиться к современным методам борьбы с галлюцинациями и ошибками в работе модели — системам интеллектуальных агентов.

Агенты предоставляют большим языковым моделям программные инструменты для выполнения действий, требующих большей точности [3]. Использование инструментов активируется через анализ инструкций и запроса пользователя по ключевым словам, фразам или шаблонам. В качестве инструментов для модели-ассессора можно представить программную реализацию вычисления статистических метрик.

В связи с высокой популярностью генерации, дополненной поиском/Retrieval Augmented Generation (RAG) широко распространено использование векторных баз данных. Векторизованные данные (эмбединги) для текстов так же могут использоваться для проверки наличия определённых токенов и их комбинаций из фактов, выданных моделью, в самом корпусе [6].

Возможные вариации в формулировке фактологической информации можно учесть, используя встроенную и хорошо работающую функцию больших языковых моделей — нахождение синонимичных слов к заданному пользователю. Статистические методы, такие как BLEU таким образом, можно будет дополнить подборкой синонимов, наличие которых, даже используя простой модуль регулярных выражений *re*, можно проверить для текста, выданного моделью. На основе полученных данных можно собрать эталон ответа, включающий верные термины, повышая эффективность применения статистической метрики для проверки общей структуры документа.

В общем схему оценки ответа модели можно представить как последовательность шагов:

1. Проведение оценки модели с помощью, по возможности, нескольких больших языковых моделей в качестве судьи. Сравнение оценок этих моделей.
2. Применение статистических метрик к данным. Сравнение оценок от модели и от математических

расчётов с помощью коэффициента корреляции.

3. Если корреляция незначительная или оценки между моделями машинного обучения не согласуются, то вызываем интеллектуальных агентов, которые могут предложить подходящий инструмент.
4. Агент осуществляет поиск синонимов и составляет новый эталон для статистической метрики.
5. Агент осуществляет поиск других доступных статистических оценок, которые могли бы подойти нам для решения конкретной задачи оценивания.
6. Агент инициирует поиск совпадений сущностей по векторным базам данных и дополняет ими оценочный запрос по необходимости.
7. Агент выносит окончательное решение об истинности или ложности выделенного факта, получив (или не получив) достоверное подтверждение на этапах 4–6.

Заключение

Проведено исследование подходов к оценке результатов извлечения глубинной семантики, содержащей нетривиальные факты, из текстов на естественном языке. Рассмотрены два основных подхода к пониманию метрик для больших языковых моделей: статистические методы (расстояние Левенштейна, BLEU и т.д.) и основанные на машинном обучении, использующие языковые модели в качестве ассессоров или судей (LLM-as-a-judge). В обеих группах есть как свои положительные (связанные с точностью и гибкостью) стороны для применения к решению исследуемой задачи, так и отрицательные (связанные со слабой интерпретируемостью и привязкой к точным формулировкам). Успешно использована метаграфовая структура, как способ отображения глубинной семантики текстов.

Получены и усреднены значения метрики BLEU и оценки модели-судьи для искусственно созданного набора данных, состоящего из комплектов небольших текстов разной тематики. Модель показала высокую эффективность в решении задачи извлечения глубинной семантики, однако модель-ассессор оценила работу относительно более высокими значениями своей метрики. Тем не менее анализ коэффициента корреляции Пирсона для двух метрик показал, что они в достаточной степени согласуются между собой в выставленных оценках.

Предложен возможный путь развития метрик для глубинной семантики на основе интеллектуальных агентов, сочетающих инструменты, основанные на статистических методах,

ЛИТЕРАТУРА

1. Белянова М.А., Ревунков Г.И., Афанасьев Г.И., Гапанюк Ю.Е. Автоматическая генерация вопросов на основе текстов и графов знаний // Динамика сложных систем — XXI век. 2020. Т. 14. № 4. С. 55–64.
2. Cai S., Knight K. Smatch: an evaluation metric for semantic feature structures //Proceedings of the 51st Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 2: Short Papers). 2013. p. 748–752.
3. Feng Y. et al. DiverseAgentEntropy: Quantifying Black-Box LLM Uncertainty through Diverse Perspectives and Multi-Agent Interaction //arXiv preprint. arXiv:2412.09572. 2024. 28p.
4. Gapanyuk Y.E. The semantic complex event processing based on metagraph approach //Biologically Inspired Cognitive Architectures 2019: Proceedings of the Tenth Annual Meeting of the BICA Society 10. — Springer International Publishing. 2020. — p. 99–104.
5. Janardhana Rao P. et al. An Efficient Methodology for Identifying the Similarity Between Languages with Levenshtein Distance //International Conference on Communications and Cyber Physical Engineering 2018. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. p. 161–174.
6. Kornai A. Vector semantics. — Springer Nature, 2023. 273p.
7. Laskar M.T.R. et al. A systematic survey and critical review on evaluating large language models: Challenges, limitations, and recommendations //Proceedings of the 2024 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. 2024. pp. 13785–13816.
8. Papineni K. et al. BLEU: a method for automatic evaluation of machine translation//ACL '02: Proceedings of the 40th Annual Meeting on Association for Computational Linguistics. 2002. pp. 311–318.
9. Pombal J. et al. M-Prometheus: A Suite of Open Multilingual LLM Judges //arXiv preprint. arXiv:2504.04953. 2025. 68p.
10. Reiter E. A structured review of the validity of BLEU //Computational Linguistics. 2018. V. 44(3). pp. 1–12.
11. Schneider P. et al. Evaluating large language models in semantic parsing for conversational question answering over knowledge graphs //arXiv preprint. arXiv:2401.01711. 2024. 11p.
12. Schroeder K., Wood-Doughty Z. Can You Trust LLM Judgments? Reliability of LLM-as-a-Judge //arXiv preprint. arXiv:2412.12509. 2024. 12p.
13. Shankar S. et al. Who validates the validators? aligning llm-assisted evaluation of llm outputs with human preferences //Proceedings of the 37th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. 2024. pp. 1–14.
14. Song L., Gildea D. SemBleu: A robust metric for AMR parsing evaluation //arXiv preprint. arXiv:1905.10726. 2019. 6p.
15. Stengel-Eskin E., Van Durme B. Calibrated interpretation: Confidence estimation in semantic parsing //Transactions of the Association for Computational Linguistics. 2023. V. 11. pp. 1213–1231.
16. Sun L. et al. Scieval: A multi-level large language model evaluation benchmark for scientific research //Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2024. v. 38. №. 17. pp. 19053–19061.

© Громоздов Данила Романович (gromozdovdr@student.bmstu.ru); Гапанюк Юрий Евгеньевич (gapyu@bmstu.ru);
Афанасьев Геннадий Иванович (gaipcs@bmstu.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

О КРИТЕРИЯХ ВЫБОРА ОЧЕРЕДНОГО СИМПЛЕКСА В АЛГОРИТМАХ ТРИАНГУЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ ДВИЖУЩЕГОСЯ ФРОНТА

Дронов Антон Геннадьевич

аспирант, ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (г. Москва)

chesston1t@yandex.ru

ON THE SELECTION CRITERIA FOR THE NEXT SIMPLEX IN TRIANGULATION ALGORITHMS BASED ON ADVANCING FRONT METHOD

A. Dronov

Summary. The purpose of this study is to develop criteria for evaluating the quality of a newly added simplex in the context of the advancing front triangulation algorithm. The quality assessment is mainly based on checking for intersections between simplices of different dimensions, as well as calculating the distances between them. The advancing front algorithm is well suited for complex geometric regions, but requires that criteria be satisfied when adding another simplex at each step. An analysis of the existing capabilities was carried out to monitor compliance with the necessary properties and criteria, on the basis of which a set of rules was formulated that formed the basis of the mesh generator.

Keywords: computational algorithms, mesh generation, triangulation, advancing front method, simplex, selection criteria, collision detection.

Аннотация. Цель данного исследования состоит в разработке критериев для оценки качества вновь добавляемого симплекса в рамках алгоритма триангуляции методом движущегося фронта. Оценка качества производится в основном на основе проверки наличия пересечений между симплексами разной размерности, а также на основе вычисления расстояний между ними. Алгоритм движущегося фронта хорошо подходит для сложных геометрических областей, но требует соблюдения критериев при добавлении очередного симплекса на каждом шаге. Был произведен анализ существующих возможностей, позволяющих контролировать соблюдение необходимых свойств и критериев, на основе которых был сформулирован набор правил, которые легли в основу генератора сеток.

Ключевые слова: вычислительные алгоритмы, генерация сеток, триангуляция, метод движущегося фронта, симплекс, критерии выбора, проверка пересечений.

Введение

При решении физических задач зачастую возникают системы дифференциальных и интегральных уравнений, которые зачастую решаются с помощью численных методов с использованием расчетных сеток, которые позволяют дискретизировать сложную расчетную область для её представления в конечномерном пространстве.

Несмотря на большое количество различий в них как по форме и структуре, так и по способу их построения, список предъявляемых к соблюдению свойств сеток достаточно часто является идентичным. В частности, достаточно популярным свойством, помимо отсутствия самопересечений, является свойство конформности. Сетка считается конформной, если любые два элемента либо не имеют общих узлов, либо ровно одну общую поверхность более высокого уровня (ребро или грань). Соблюдение и поддержание этих свойств требует применения и адаптации специальных методик и правил.

В статье описываются сформированные критерии, которые используются при разработке последовательной

и параллельной версиях генератора симплицеальных сеток [1, 2], который идет в дополнение к разработанному в ИПМ имени Келдыша РАН комплексу MARPLE3D [3]. В комплексе для расчетов используются расчетные сетки нерегулярной структуры, в своем основании которые состоят из фигур произвольной формы.

В качестве алгоритма построения таких сеток выбран метод движущегося фронта, который заполняет расчетную область, стартуя от её границ по направлению к «материалу». Алгоритм может применяться как для триангуляции поверхностей, так и для тетраэдризации трехмерных областей, хотя и существуют некоторые особенности этих случаев; без ограничения общности сформулируем главную его идею.

Основополагающим является понятие фронта, куда включаются ребра, на основании которых нужно построить новую грань. В случае триангуляции на начальном этапе для каждой грани исходной геометрии во фронт добавляются ребра, полученные в ходе дискретизации её сторон. На каждом шаге из фронта выбирается активное ребро, наиболее подходящее в зависимости от выбранного критерия, зачастую — ребро с наименьшей

длиной. Вводится новая вершина, позволяющая построить на его основании новый треугольник, или же выбирается уже существующая в случае, если положение рассчитанной вершины не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к сетке. После этого из фронта удаляется как текущее активное ребро, так и все уже существующие стороны нового треугольника (если такие были), только добавленные стороны при этом добавляются во фронт.

Критерии для оценки качества добавляемого симплекса

Добавляемый новый треугольник (тетраэдр) должен пройти оценку качества. Для этого выделяются основные типы критериев, используемые для проверки соблюдения требуемых свойств сеток:

- на основе угловых величин;
- на основе определения геометрического пересечения между объектами;
- на основе расчета расстояний между объектами.

Критерии на основе угловых величин обычно используются для формирования более качественных треугольных объектов [4, 5, 6, 7], но могут быть использованы для того, чтобы отбросить лишние точки из перебора кандидатов [8, 9] еще до использования более тяжелых функций определения пересечения между геометрическими объектами. Для текущего активного ребра AB треугольник-кандидат ABC не рассматривается, если существует ребро AD , смежное AB , такое, что $\cos(\angle BAC) < \cos(\angle BAD)$. Это позволяет избегать конфигураций фронта, при которых луч AC хотя бы в некоторой окрестности точки A оказывается внутри фронта. При этом повторяется такая проверка для обеих точек активного ребра AB и для каждого смежного ему ребра. Та же идея применима и к случаю тетраэдризации, когда активной сущностью является грань. В этом случае нужно сравнивать двугранные углы, которые получаются между активной и смежными ей гранями по каждой стороне.

Следующим типом метрик оценивания являются критерии на основе определения геометрического пересечения. На текущем шаге итерации рассматривается пересечение между рассматриваемым треугольником (тетраэдром) с сущностями активного фронта (прямолинейными ребрами в виде отрезков при триангуляции, треугольными гранями при тетраэдризации). В случае триангуляции пересечение можно искать напрямую с помощью пар сущностей «треугольник-отрезок», или же в некоторых ситуациях с помощью пары «отрезок-отрезок». При тетраэдризации, учитывая, что у тетраэдра треугольные грани, отношение «тетраэдр-треугольник» для простоты может быть сведено к паре «треугольник-треугольник», которая, в свою очередь, с некоторыми

дополнениями может быть трансформирована в пару «треугольник-отрезок». Важными вспомогательными операциями являются проверки принадлежности точки треугольнику и тетраэдру; наиболее известными методами определения принадлежности являются метод на основе барицентрических координат [10, 11], а также методы на основе полуплоскостей и сравнения площадей (объемов) [12, 13].

В двумерном случае при определении пересечения между парой «отрезок-отрезок» сначала анализируется, с какой стороны каждого из отрезков располагаются концы другого; если хотя бы для одного отрезка с одной, то пересечения нет. В ином случае линейные сегменты представляются в виде уравнения сегмента $S_i(t_i) = A_i + t_i d_i$, $d_i = (B_i - A_i)$, где A_i , B_i — начало и конец отрезка, $t_i \in [0; 1]$ — параметр, задающий точку на этом отрезке ($t_A = 0$, $t_B = 1$). Приравняв два уравнения, получаем параметры t_1 и t_2 , задающие положение точки пересечения на первом и втором линейных сегментах соответственно. При этом точка пересечения лежит в пределах каждого из отрезков, т.е. $t_1, t_2 \in [0; 1]$. Если пересечения нет, то задача может быть трансформирована к поиску кратчайшего расстояния между отрезками. При этом для её решения недостаточно просто посчитать расстояние между соответствующими концами двух отрезков, а следует произвести дополнительные операции [13]. В частности, если точка пересечения принадлежит только второму отрезку, то параметрическое значение ближайшей точки на первом отрезке находится в виде $t_1 = (A_2 + t_2 d_2 - A_1) \cdot d_1 / d_1 \cdot d_1$.

В случае трехмерного пространства задача первоначально формулируется в терминах нахождения кратчайшего расстояния, поскольку в 3D отрезки, как и линии, в общем случае не пересекаются. При этом сама идея решения остается прежней.

Следующей является пара «треугольник-отрезок». Определение пересечения является достаточно важным для задач рейтрейсинга, поэтому зачастую ищется пересечения именно луча, заданного точкой-источником и направлением, и треугольника [14, 15, 16], хотя существуют и алгоритмы для исходной постановки задачи [17, 18].

В работе [14] авторы фокусируются на алгоритме, не требующем предварительного расчета нормали плоскости треугольника. Нахождение точки пересечения происходит с помощью системы $O + tD = (1 - u - v)p_0 + up_1 + vp_2$, где слева представлено уравнение луча с источником в точке O и направлением D , t — параметр, определяющий положение точки на нем, а справа — уравнение треугольника с помощью барицентрических координат, которые позволяют описать любую точку внутри него. При этом не рассматрива-

ется случай, когда треугольник и луч лежат в одной или параллельных плоскостях.

В статье [15] точка пересечения также представляется с помощью барицентрических координат треугольника, при этом предварительно рассчитываются 3 дополнительные плоскости. Для более быстрого расчета используются параллельные инструкции из набора команд SSE4. В работе [16] сохраняются в памяти нормали к плоскости треугольника, при этом производятся преобразования треугольника таким образом, чтобы каждая точка могла быть представлена в двумерных координатах. Кроме того, добавляются дополнительные тесты, такие, как пересечение луча с ограничивающим пространством треугольника, луча и описывающей сферы, луча и описанной вокруг треугольника окружности и т.д.

Алгоритм [17] определяет наличие пересечения с помощью знаков тетраэдров, получаемых соединением вершин треугольника и отрезка, но не позволяет в своей исходной форме найти саму точку пересечения. В статье [18] совмещаются идеи, связанные с определением знаков тетраэдров и нахождением точек внутри них с помощью барицентрических координат, что позволяет, при необходимости, определить точку пересечения, и все необходимые для этого вычисления производятся в конце.

Последней парой сущностей является пара «треугольник–треугольник». В работе [19] описывается алгоритм, в ходе которого вычисляются плоскости, в которых лежат треугольники. В случае, если все точки треугольника лежат с одной стороны от плоскости другого, пересечений нет. Принадлежность каждой точки единой плоскости обрабатывается отдельно по аналогии двумерному случаю. В оставшейся ситуации пересечение между плоскостями треугольников образует прямую линию, после чего она проецируется на одну из осей. Рассчитанные интервалы для каждого треугольника на этой прямой пересекаются, что позволяет найти сегмент пересечения между треугольниками. В статье [20] описывается определение пересечений между плоскостями треугольников на основе специальных предикатов, определителей матриц, при этом алгоритм не подразумевает нахождение сегмента пересечения, а только сам факт его наличия или отсутствия. Описанный в [21] алгоритм оптимизирует вышеописанные подходы за счет уменьшения количества используемых операций и стоимости нахождения сегмента пересечения. В работе [22] оптимизируется один из шагов алгоритма [19] за счет использования дополнительной проекции на плоскость.

В статье [23] авторами предлагается подход, позволяющий классифицировать найденное пересечение (точка, отрезок или площадь) с помощью решения систем

неравенств вида $m \leq ax + by \leq n$. При этом классификация происходит скорее с помощью логических тестов, нежели геометрических.

Заключительной является метрика расстояния между объектами. Помимо расстояния между точками и кратчайшего расстояния между отрезками и линиями в трехмерном пространстве, нахождение которого описано выше, можно выделить также расстояние от точки до отрезка, треугольника и тетраэдра.

Для определения расстояния между точкой и прямой линией необходимо найти расстояние между точкой и её проекцией на эту прямую. Если прямая задана точкам A и B , то параметр, соответствующий проекции точки C на прямую может быть найден в виде $t' = (C - A) \cdot n / \|B - A\|$, где $n = (B - A) / \|B - A\|$ есть единичный вектор в направлении AB [13]. При решении задачи о поиске расстояния между точкой и отрезком нужно определить, какое значение принимает параметр t' ; если $t' \in [0; 1]$, то расстояние ищется с этой же точкой, в ином случае нужно искать расстояние с ближайшим к найденной проекции концом отрезка AB .

В [13] предлагается эффективный подход для нахождения кратчайшего расстояния от точки P до треугольника ABC на основе диаграммы Вороного. Диаграмма разбивается на 6 регионов, по одной вокруг каждой вершины треугольника и его сторон. Чтобы проверить, лежит ли ближайшая точка в области позади вершины A , анализируются скалярные произведения $d_1 = (\overline{AB} \cdot \overline{AP})$, $d_2 = (\overline{AC} \cdot \overline{AP})$. Если d_1 и d_2 не являются положительными величинами, то ближайшая точка к P в треугольнике ABC есть вершина A . Ближайшая точка лежит на ребре AB , если выполняется каждое из условий $vc \leq 0$, $d_1 \geq 0$, $d_3 \leq 0$, где $vc = d_1 * d_4 - d_3 * d_2$, $d_3 = (\overline{AB} \cdot \overline{BP})$, $d_4 = (\overline{AC} \cdot \overline{BP})$; кратчайшее расстояние в таком случае есть расстояние от точки P до её проекции на ребро AB . Для других вершин и ребер вычисления производятся схожим образом. В случае, если точка не принадлежит ни одному из регионов, считается ортогональная проекция точки P на треугольник ABC с помощью барицентрических координат.

Поиск расстояния от точки до тетраэдра, в случае, если точка не лежит внутри него, может решаться нахождением минимального расстояния от точки до каждой треугольной грани тетраэдра, при этом также может применяться идея с диаграммой Вороного, которая будет включать уже 14 областей [13].

Используемые в генераторе правила

Геометрическая модель поступает на вход программы в формате граничного представления, работа с ней

ведется через ядро OpenCascade [1]. OpenCascade позволяет работать с ребрами и гранями модели в параметрическом представлении кривой и поверхности соответственно. Пользователем задается идеальный шаг сетки h , а также максимально допустимое расстояние между соседними точками ϵ . В программе определяется единый обход контура, т.е. определено, в какую сторону от текущей активной поверхности должны строиться новые.

Генератор работает со структурами данных, используемыми в MARPLE3D [3]. Каждая добавляемая поверхность получает уникальный индекс, отличающий её от уже существующих. Для определения близких точек и борьбы с дубликатами используется специальная структура на основе двоичного дерева поиска, позволяющая для каждого узла в декартовых координатах получать хэш-индекс. В памяти хранятся отношения инцидентности и смежности, позволяющие, например, получить номера вершин ребра по его индексу или ребра, смежные по узлу соответственно.

При триангуляции проверка качества сетки происходит как в декартовых, так и параметрических координатах. Для соблюдения угловых метрик для текущего активного ребра обрабатываются ему смежные по обоим его вершинам; при этом метрики рассчитываются только для ребер, второй конец которых лежит с нужной стороны от текущего активного (определяется знаком кривизны произведения в параметрическом пространстве).

Допустимость построения нового треугольника проверяется с помощью параметрических координат и поверхностей «отрезок–отрезок», что позволяет ускорить процесс проверки геометрических пересечений. Поскольку на данном этапе идет работа с прямолинейными ребрами, то в параметрическом представлении они представлены в виде прямолинейных ребер. В полученном двумерном пространстве треугольник и отрезок фронта пересекаются тогда и только тогда, когда отрезок фронта пересекает одну из сторон треугольника, при этом текущее активное ребро уже находится во фронте, а значит, прошло все проверки. Таким образом, необходимо только проверить пересечение между двумя другими сторонами треугольника и близкими ребрами из активного фронта. В то же время, из этих ребер отбираются только не имеющие общих вершин с текущим активным. Помимо этого, проверяется, что ни одна из вершин фронта не лежит внутри рассматриваемого треугольника.

В качестве метрик расстояния используются расстояния от узлов фронта до ребер и граней рассматриваемого треугольника; рассматриваются только точки, не являющиеся вершинами треугольника. Минимально допустимое расстояние выбирается в диапазоне $0.15h-0.25h$. Показатель выбран эмпирически для регулирования качества сетки.

При тетраэдризации в качестве угловых метрик используются двугранные углы между смежными с текущей активной гранями, при этом для каждого ребра грани метрика рассчитывается отдельно. Идет перебор только среди таких граней, третья вершина которых находится в положительной полуплоскости относительно текущей активной с помощью одной из вершин треугольника и его нормали.

Геометрическое пересечение рассматриваемого тетраэдра с активным фронтом треугольных граней происходит с помощью пары поверхностей «треугольник–отрезок». Алгоритмы «отрезок–отрезок» не позволяют определить пересечения внутри области, в то же время алгоритмы вида «треугольник–треугольник» имеют значительные трудности при определении всего сегмента пересечения в случае, например, если треугольники имеют общую сторону. В общем случае, тетраэдр $ABCD$ проходит проверку с треугольником PQR из активного фронта, если соблюдаются все следующие условия:

- Грани тетраэдра $ABCD$ не пересекаются с ребрами треугольника PQR ;
- Треугольник PQR не пересекается с ребрами тетраэдра $ABCD$;
- Ни одна из точек треугольника PQR не лежит внутри тетраэдра $ABCD$.

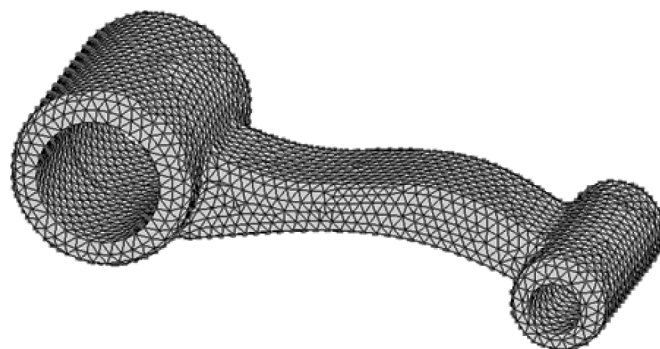


Рис. 1. Построенная сетка на модели linkrods

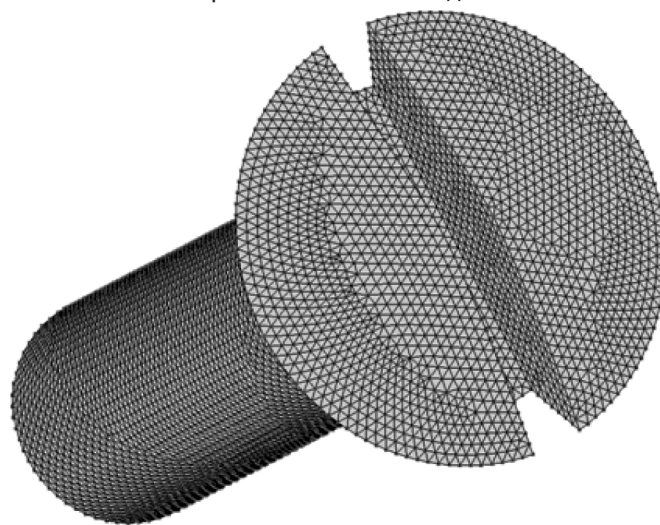


Рис. 2. Построенная сетка на модели screw

Для определения пересечения в настоящий момент используется описанный в [14] алгоритм (как самый проверенный и надежный) с некоторыми дополнениями. В частности, если отрезок является ребром треугольника, то это считается допустимым пересечением. Если у треугольника и отрезка одна вершина, то источник луча перемещается во второй конец ребра, и единственное допустимое пересечение между треугольником и ребром есть общая вершина. В случае, если общих вершин нет, в качестве источника выбирается любая вершина, и допустимых общих точек пересечения нет.

В качестве метрик расстояния используются расстояние между ребрами тетраэдра и ребрами активных граней фронта, расстояние от новой вершины тетраэдра до активных граней фронта, а также расстояние от узла фронта до рассматриваемого тетраэдра.

Результат работы последовательной версии генератора с используемыми правилами представлен на моделях linkrods и screw, распространяемыми вместе с ядром OpenCascade.

Заключение

В ходе исследования были сформулированы основные критерии, используемые для оценки качества очередного симплекса, состояния расчетной сетки в момент её построения и после. На основе проведенных исследований был сформирован и обоснован набор правил, используемых в разработке последовательной и параллельной версиях генератора симплицальных сеток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дронов А.Г. Об одном алгоритме генерации поверхностных сеток // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». — 2024. — №6. — С. 74–79.
2. Дронов А.Г., Болдарев А.С. О разработке параллельных алгоритмов построения расчетных сеток на системах с распределенной памятью // Перспективы науки. — 2024. — №6 (177). — С. 27–32.
3. MARPLE: программное обеспечение для мультифизического моделирования в задачах сплошных сред / В.А. Гасилов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2023. № 37. 40 с. Режим доступа: <https://doi.org/10.20948/prepr-2023-37>, <https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2023-37>.
4. Löhner, R. Progress in grid generation via the advancing front technique // Engineering with Computers. — 1996. — Vol. 12. — P. 186–210. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01198734>
5. Advancing front surface mesh generation in parametric space using a Riemannian surface definition / J.R. Tristano, S.J. Owen, S.A. Canann // In: International Meshing Roundtable. — 1998. — P. 429–445.
6. Shewchuk J.R. Delaunay refinement algorithms for triangular mesh generation // Computational geometry. — 2002. — Vol. 22. — P. 21–74. doi: 10.1016/S0925-7721(01)00047-5.
7. Mohammadi F., Shontz S.M. A direct method of generating quadratic curvilinear tetrahedral meshes using an advancing front approach // In: Proceedings of the 29th International Meshing Roundtable. — 2021. — P. 74–91. doi: 10.5281/zenodo.5559211.
8. Löhner, R. Recent advances in unstructured mesh and point generation // In: 1st Conference on Advances and Applications of GiD. — 20-22 February, Barcelona, Spain, 2002. — P. 5–22.
9. Lau T.S., Lo S.H. Finite element mesh generation over analytical curved surfaces // Computers & Structures. — 1996. — Vol. 59(2). — P. 301–309. doi:10.1016/0045-7949(95)00261-8.
10. Floater, M.S. Generalized barycentric coordinates and applications. // Acta Numerica. — Cambridge University Press, 2015. — Vol. 24. — P. 161–214. doi:10.1017/s0962492914000129.
11. Marschner S., Shirley P. Fundamentals of computer graphics, 5th edition — CRC Press, 2021. — 700 p.
12. Haines E. Point in polygon strategies // Graphics Gems IV. / Edited by P. Heckbert. — Morgan Kaufmann, 1994. — P. 24–46.
13. Ericson C. Real-time collision detection. — CRC Press, 2004. — 632 p.
14. Möller T., Trumbore B. Fast, Minimum Storage Ray-Triangle Intersection // Journal of Graphics Tools. — 1997. — Vol. 2. — P. 21–28. doi: 10.1080/10867651.1997.10487468.
15. Havel J., Herout A. Yet Faster Ray-Triangle Intersection (Using SSE4) // In: IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics — 2010. — Vol. 16(3). — P. 434–438. doi: 10.1109/TVCG.2009.73.
16. Pichler T.A. Fast CPU Ray-Triangle Intersection Method // Diplom-Ingenieur in Media Informatics — 2018.
17. Segura R.J., Feito F.R. Algorithms to test ray-triangle Intersection. Comparative study // Journal of WSCG — 2001. — Vol. 9(3). — P. 76–81.
18. A robust segment/triangle intersection algorithm for interference tests. Efficiency study / Juan J. Jiménez, Rafael J. Segura, Francisco R. Feito // Computational Geometry: Theory and Applications — Elsevier, 2010. — Vol. 43(5). — P. 474–492. doi: 10.1016/j.comgeo.2009.10.001.
19. Möller T. A Fast Triangle-Triangle Intersection Test // In: Journal of Graphics Tools. — 1997. — Vol. 2(2). — P. 25–30. doi: 10.1080/10867651.1997.10487472.
20. Guigue P., Devillers O. Fast and robust triangle-triangle overlap test using orientation predicates // Journals of graphics tools — 2003. — Vol. 8(1). — P. 25–42.
21. A fast triangle to triangle intersection test for collision detection / O. Tropp, A. Tal, I. Shimshoni // Computer Animation and Virtual Worlds — Wiley, 2006. — Vol. 17(5). — P. 527–535. doi: 10.1002/cav.115.
22. An improved algorithm for triangle to triangle intersection test / X. Ye et al. // In: 2015 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). — IEEE, 2015. — P. 2689–2694. doi: 10.1109/ICInfA.2015.7279740.
23. Sabharwal C.L., Leopold J. L. An Implementation of Triangle-Triangle Intersection for Qualitative Spatial Reasoning // In: Seventh International Conference on Wireless & Mobile Network. — 2015. doi: 10.5121/csit.2015.51003.

ДИНАМИКА ОБРАБОТКИ СЛУЧАЙНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В КОГНИТИВНЫХ СИСТЕМАХ

DYNAMICS OF PROCESSING OF STOCHASTIC INFORMATION INFLUENCES IN COGNITIVE SYSTEMS

K. Zhovnovatiy

Summary. This study aims to develop an analytical model describing the dynamics of processing stochastic information inputs in cognitive systems, accounting for significant variations in the processing speed for different information types. Input events are formalized using random process theory as a marked Poisson point process, where each event is defined by three key parameters: a random occurrence time, a random volume of transmitted information, and a random coefficient determining the system-specific speed of its processing. The state of the cognitive system at any given time is modeled as the accumulated sum of decaying response functions for each incoming event. These functions depend on the time elapsed since the information arrival, its initial volume, and the assigned processing speed coefficient.

The core result of the work is the rigorous derivation of analytical expressions for the mathematical expectations of two critical quantities: the total volume of information successfully processed by the system by a given time, and the volume of information remaining unprocessed (current «load»). A fundamental applicability constraint of the model is established: it is most adequate and informative when the characteristic time for the system to process a unit of information is comparable to the average time interval between consecutive event arrivals.

The obtained results provide a foundation for solving practical problems, such as optimizing the sequence of control actions on cognitive systems (biological or artificial), predicting and managing their workload, and for clearly specifying technical requirements for designed intelligent and cognitive systems, including requirements for throughput capacity and resilience to information flows.

Keywords: cognitive system, random point process, response function, processing speed coefficient.

Жовноватый Кирилл Евгеньевич
Аспирант, Российский Государственный
Университет им. А.Н. Косыгина
kirill.zhov@mail.ru

Аннотация. Целью данного исследования является разработка аналитической модели, описывающей динамику обработки случайных информационных воздействий в когнитивных системах с учетом существенных вариаций скорости их переработки для разных типов информации. Входные воздействия формализованы в рамках теории случайных процессов как меченный точечный процесс Пуассона, где каждое событие характеризуется тремя ключевыми параметрами: случайным временем возникновения, случайным объемом передаваемой информации и случайным коэффициентом, определяющим индивидуальную скорость ее обработки системой. Состояние когнитивной системы в произвольный момент времени моделируется как накопленная сумма убывающих функций отклика на каждое поступившее событие. Эти функции зависят от времени, прошедшего с момента поступления информации, ее исходного объема и присвоенного коэффициента скорости обработки.

Основным результатом работы являются строго выведенные аналитические выражения для математических ожиданий двух критически важных величин: общего объема информации, успешно переработанного системой к заданному моменту времени, и объема информации, остающегося непереработанным. Установлено фундаментальное ограничение применимости модели: она наиболее адекватна и информативна в ситуации, когда характерное время обработки единицы информации системой соизмеримо со средним интервалом времени между поступлениями последовательных событий.

Полученные результаты создают основу для решения практических задач, таких как оптимизация последовательности управляющих воздействий на когнитивные системы, прогнозирование и управление их нагрузкой, а также для четкой формализации технических требований к проектируемым интеллектуальным и когнитивным системам, включая требования к пропускной способности и устойчивости к информационным потокам.

Ключевые слова: когнитивная система, точечный случайный процесс, функция отклика, коэффициент скорости обработки.

Введение

Любое локализованное во времени случайное явление может трактоваться как точечный случайный процесс, в котором точки на временной оси указывают случайные времена появления событий. Наиболее изученным классом точечных процессов являются пуассоновские процессы и многочисленные процессы, порождаемые пуассоновским.

Пуассоновские процессы описывают широкий круг явлений, возникающих в физике, технике и в функцио-

нировании когнитивных систем. К таким процессам относятся, в частности, передача нервных импульсов [1], явления в гидрологии и гидроклиматологии [2]. Пуассоновские процессы используются в разработке моделей распределения пикселей в электронной микроскопии и улучшении качества изображения [3, с. 1; 4, с. 74; 5; 6, с. 29101], визуализации медицинской томографии [7, с. 80; 8, с. 4], анализе сетевого трафика [9, с. 107658]. Наиболее полное изложение теории точечных пуассоновских процессов содержится в [10, с. 480].

Целью работы является аналитическое описание динамики процессов обработки информации, протекающих в когнитивных системах.

В работе предпринято аналитическое описание последовательного случайного процесса возникновения воздействий и их последующей обработки некоторой когнитивной системой. Математическим описанием возникающих воздействий являются случайные числа, типичной трактовкой которых является количество информации, соответствующее возникновению некоторого образа.

В работе приняты следующие основные допущения.

Состояние системы описывается неотрицательной функцией четырех аргументов — текущего времени, случайного времени появления воздействия на систему, численного описания воздействия и коэффициента скорости обработки воздействия. Состояние системы, развивающееся во времени, отождествляется с ее реакцией на появление воздействия.

Считается, что система подвергается воздействиям, которые могут возникать в случайные локализованные моменты времени и интерпретируются как последовательность воздействий на временной оси, число и расположение которых является случайным. Воздействиям ставятся в соответствие точки на временной оси, и таким образом формируется случайный точечный процесс, а воздействие образов на систему моделируются случайным количеством информации, которое называется метками.

Для простоты считается, что моделью таких меток является меченый случайный точечный процесс, основными характеристиками которого являются интенсивность появления событий, имеющая смысл среднего числа событий, появившихся в течение выбранной единицы времени, а также вероятностное распределение меток для каждой точки.

Отклик системы на последовательность меченых точек является суммой откликов системы на отдельные точки, т.е. предполагается, что система является линейной. Процесс на выходе системы называется фильтрованным меченым точечным процессом.

1. Математическая модель случайного процесса на входе системы

Рассмотрим процесс функционирования системы, развивающийся в непрерывном времени, и предположим, что вход системы дискретно (скачкообразно) меняет свое состояние. Таким образом, на входе системы действует случайный процесс появления точек, каждая из которых характеризуется величиной скачков.

Пусть наблюдение начинается в момент времени t_0 , а через некоторое время t_1 в текущий момент времени W_1 на входе системы появилась некоторая информация, через некоторое другое время t_2 в текущий момент времени W_2 появилась другая информация и т.д.

Введем в рассмотрение процесс $N(t)$ счета точек, в которых возникала информация и назовем его процессом счета точек или счетным точечным процессом. Таким образом, процесс $N(t)$ является кусочно-постоянным, имеет единичные приращения в моменты появления точек W_i и показывает, сколько точек появилось на интервале времени $[t_0, t)$.

Процесс появления точек на входе системы управляется внешними по отношению к системе факторами (внешней средой) и в ряде приложений должен рассматриваться как случайный. В связи с этим сделаем ключевое предположение о том, что времена появления точек W_i , а поэтому интервалы времени между появлениями точек t_i и число точек $N(t)$ тоже являются случайными величинами.

Реакция системы на известные, детерминированные входные воздействия изучается в большом числе работ, посвященных организационным системам. Между тем, естественно предположить, что большой интерес для изучения представляет реакция системы на случайные, непредсказуемые заранее воздействия. Это объясняется тем обстоятельством, что как в соответствии с гносеологическими представлениями [4, с. 81; 5, с. 113996], так и в соответствии с математической теорией передачи информации [6, с. 29088] новое знание (информация) генерируется (возникает, предъясвляется) тогда, когда имеется возможность случайного выбора из множества.

Для создания стохастической модели случайных воздействий необходимо задать базовые статистические характеристики времен появления этих воздействий, их числа и их величин.

Рассмотрим произвольный интервал времени $[s, t)$, такой, что $t - s = T$ и предположим, что число точек, появившихся к моментам времени t и s равно соответственно $N(t)$ и $N(s)$. Обозначим через $N(t, s) = N(t) - N(s)$ число точек, появившихся на этом интервале, а через $P(N(t, s) = n)$ вероятность того, что это число точек окажется равным n .

Применим широко применяющееся в различных областях знаний предположение о том, что за малый промежуток времени $T = t$ вероятность того, что точка появится пропорциональна некоторой константе

с точностью до бесконечно малой по отношению к t и что вероятность появления за это время двух и более точек стремится к нулю:

$$\begin{aligned} P(N(t, s) = 1) = \\ = \lambda \Delta t + O(\Delta t), P(N(t, s) > 1) = O(\Delta t). \end{aligned} \quad (1.1)$$

Если дополнительно потребовать, чтобы точки появлялись независимо друг от друга, то распределение произвольного числа точек на интервале T является пуассоновским:

$$P(N(t, s) = n) = \frac{1}{n!} (\lambda T)^n e^{-\lambda T}. \quad (1.2)$$

Таким образом, будем теперь полагать, что точечный процесс является пуассоновским случайным точечным процессом или просто пуассоновским точечным процессом, в котором времена появления точек W_1, W_2, \dots, W_i и их число $N(t)$ к моменту времени t являются случайными величинами. Если теперь в (1.1) λ является функцией времени, то процесс становится неоднородным пуассоновским процессом с распределением

$$P(N(t, s) = n) = \frac{1}{n!} \left(\int_t^s \lambda(\tau) d\tau \right)^n \exp \left(- \int_t^s \lambda(\tau) d\tau \right), \quad (1.3)$$

Непосредственными вычислениями можно определить, что математическое ожидание числа точек, появившихся на интервале $[s, t]$ равно,

$$M(N(t, s)) = \int_t^s \lambda(\tau) d\tau. \quad (1.4)$$

Условие (1.1) часто называют предположением редких событий, имея в виду, что появление больше одной точки на интервале t стремится к нулю. Однако необходимо сделать следующие пояснения. Из соотношения (1.4) следует, что при $\lambda = \text{const}$ математическое ожидание числа точек, появившихся на интервале времени T равно λT , поэтому параметр λ характеризует интенсивность появления точек пуассоновского процесса, т.е. указывает среднее число точек, появляющихся в единицу времени, и имеет размерность 1 / время. При увеличении λ точки будут в среднем появляться чаще и наоборот.

Рассмотрим теперь случайный точечный процесс $\{N(t), t \geq t_0\}$ появления точек в процессе функционирования системы. Ассоциируем с каждой появившейся i -той точкой вектор V , состоящий из двух независимых случайных величин u_i и θ_i , и назовем этот вектор меткой, а соответствующий процесс — меченым пуассоновским процессом. Эти величины по определению являются внешними по отношению к точечному процессу, что значит, что они не могут влиять на интенсивность появления точек.

Каждая метка процесса V определяет случайное количество информации u_i , предъявленное системе для переработки, а также случайный коэффициент скорости обработки этой информации θ_i . Количество информации при этом может быть определено как энтропия источника случайных меток. Таким образом, значения u_i являются неотрицательными случайными величинами, имеющие положительное математическое ожидание, а значения θ_i являются строго положительными случайными величинами, имеющими положительное математическое ожидание.

Второй компонент меток V процесса обоснован тем, что когнитивные системы могут иметь свойство адаптации к обработке некоторой информации. Представим систему, на вход которой могут поступать различные типы информации, например, визуальная (изображения, видео) и текстовая. В зависимости от способа построения системы, визуальная информация может обрабатываться как быстрее, так и медленнее текстовой, при учете одинакового ее количества.

Представляет интерес изучение процесса накопления меток [7, с. 87] $\{u(t), t \geq t_0\}$ на интервале времени $[t, s]$:

$$u(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} u_i, \quad (1.5)$$

В формуле (1.5) $u(t)$ является суммой случайного числа случайных слагаемых. Математическое ожидание $M_{u(t)}$ вычисляется с использованием свойств условных математических ожиданий:

$$M_{u(t)} = M_N \{ M_u [u(t) / N(t)] \} = M_N \left\{ \sum_{i=1}^{N(t)} n_i \right\}.$$

Здесь применены очевидные обозначения для математических ожиданий с индексом, указывающим случайную величину, по которой происходит усреднение. Если все математические ожидания случайных меток равны n , то в соответствии с (1.4)

$$M_{u(t)} = n M_N N(t) = n \int_t^s \lambda(\tau) d\tau. \quad (1.6)$$

2. Динамические характеристики процесса переработки информации

Очевидно, что переработка информации должна занимать некоторое время, причем чем больше времени прошло с момента появления информации, тем меньшее ее количество остается неиспользованным. Пусть процесс переработки системой конкретного случайного количества информации описывается во времени функ-

цией $h(t, W_i, u_i, \theta_i)$. Тогда общее количество не переработанной к моменту времени t информации $y(t)$ равно

$$y(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} h(t, W_i, u_i, \theta_i). \quad (2.1)$$

Переработанное количество информации равно, очевидно, разности полученной и не переработанной информации:

$$\begin{aligned} \hat{y}(t) &= \sum_{i=1}^{N(t)} u_i - \sum_{i=1}^{N(t)} h(t, W_i, u_i, \theta_i) = \\ &= \sum_{i=1}^{N(t)} (u_i - h(t, W_i, u_i, \theta_i)). \end{aligned} \quad (2.2)$$

Процесс (2.1) называется фильтрованным пуассоновским процессом. Он является случайным, поскольку порожден случайным неоднородным пуассоновским процессом и зависит от случайных меток.

Функция h в (2.1) называется откликом системы на каждое событие появления меченой точки точечного процесса или переходной функцией состояния системы. Таким образом, в этом смысле функции (2.1) и (2.2) могут трактоваться как функции состояния когнитивной системы при возникновении в ней образа.

Функция должна удовлетворять свойству физической реализуемости, т.е. $h(t, W_i, u_i, \theta_i) = 0$ для t_0 и быть убывающей. Теоретически на форму функции отклика не накладывается никаких других ограничений. Физическая размерность функции отклика также может быть любой, однако поскольку по постановке задачи процесс $y(t)$ является количеством информации, то и функцию h удобно доопределять так, чтобы ее размерность совпала с размерностью $y(t)$. Очевидно, это всегда можно сделать, вводя в определение функции отклика размерные константы. Ниже на конкретном примере эти вопросы поясняются более подробно.

В дальнейшем изучении процессов в когнитивных системах основную роль играет такая неслучайная характеристика фильтрованного процесса, как его математическое ожидание. Математическое ожидание фильтрованного процесса на интервале времени $[0, t]$ можно легко получить, используя метод, примененный при выводе формулы (1.6). В результате получим

$$\begin{aligned} M_u y(t) &= \int_0^t \lambda(s) M h(t, s, u_i, \theta_i) ds, \\ M_u \{\hat{y}(t)\} &= M_N \{n_i\} - \int_0^t \lambda(s) M \{h(t, s, u_i, \theta_i)\} ds. \end{aligned} \quad (2.4)$$

3. Экспоненциальная функция отклика

Рассмотрим временной интервал $[W_i, t]$, включающий время W_i появления произвольной точки точечного

процесса с меткой u_i и текущее время t . Очевидно, что тогда функция h должна удовлетворять условию

$$h(W_i, W_i, u_i, \theta_i) = u_i. \quad (3.1)$$

Будем далее считать, что метки u_i имеют смысл количества информации, полученной системой в случайный момент времени W_i и измеряются, например, в двоичных единицах.

Пусть, далее, текущее время t получает малое приращение Δt . При этом функция отклика изменяется и становится равной $h(t + \Delta t, W_i, u_i, \theta_i)$. Поскольку физическим смыслом функции отклика является переработка информации, то потребуем, чтобы ее новое значение в момент времени $t + \Delta t$ уменьшилось на малую величину пропорционально некоторому коэффициенту k и величине приращения времени Δt , т.е.

$$h(t + \Delta t, W_i, u_i, \theta_i) = h(t, W_i, u_i, \theta_i) - kh(t, W_i, u_i, \theta_i) \Delta t.$$

Знак минус отвечает требованию уменьшения функции на интервале Δt . Легко заметить, что размерность коэффициента k равна $1 / \text{время}$. Переносим $h(t, W_i, u_i, \theta_i)$ в левую часть, деля обе части уравнения на и устремляя в процессе предельного перехода к нулю, получим дифференциальное уравнение

$$\frac{dh(t, W_i, u_i, \theta_i)}{dt} = -kh(t, W_i, u_i, \theta_i). \quad (3.2)$$

Таким образом, имеем дифференциальное уравнение для функции h (3.2) с начальными условиями (3.1). Непосредственной подстановкой легко убедиться, что решением этого уравнения является функция

$$h(t, W_i, u_i, \theta_i) = u_i e^{-k\theta_i(t-W_i)}, t \geq W_i.$$

В результате, при сделанных предположениях отклик системы на полученную в момент времени W_i информацию u_i уменьшается по экспоненте с коэффициентом k , причем функция зависит от разности временных аргументов, т.е. является стационарной. Для удобства физической интерпретации вместо k вводят в рассмотрение коэффициент $\tau = 1 / k$, имеющий размерность [время]. Параметр называется постоянной времени системы и полностью характеризует ее поведение во времени. Более подробно, этот параметр определяет скорость, с которой уменьшается функция отклика (не переработанная информация). Окончательно экспоненциальную функцию отклика запишем в вид

$$h(t, W_i, u_i, \theta_i) = u_i \exp\left(-\frac{\theta_i(t-W_i)}{\tau}\right), t \geq W_i. \quad (3.4)$$

Экспоненциальная функция отклика (3.4) широко применяется в физике и технике для описания убывающих процессов в связи с естественностью сделанных при ее выводе предположений. Постоянная времени определяет масштаб времени, в течение которого имеет смысл рассматривать поведение отклика.

В связи этим необходимо еще раз подчеркнуть, что приведенная математическая модель остается оправданной, если безразмерное произведение $\tau\lambda(t)$ равно нескольким единицам. Действительно, функция интенсивности $\lambda(t)$ определяет среднее число точек на временном интервале, а постоянная τ — время реагирования системы на эти точки. Если $\tau\lambda(t) \gg 1$ то теряется характерная дискретность процесса и для его описания можно привлечь более простые модели, а если $\tau\lambda(t) \ll 1$, то точечный процесс с точки зрения реакции системы распадается на единичные события и изучение ее динамики может быть проведено методами меченых (а не фильтрованных) процессов.

Изложенные особенности характерны, очевидно, для любой убывающей функции отклика, поэтому для любой функции отклика можно ввести в рассмотрение характерное время τ .

Для получения аналитического результата предположим, что функция интенсивности λ является постоянной, все значения u_i имеют одинаковое математическое ожидание $M\{u_i\} = n$, а все значения θ_i имеют одинаковое математическое ожидание $M\{\theta_i\} = 1$. Непосредственным вычислением в соответствии с (2.5) определим математическое ожидание на интервале времени $[0, t]$ фильтрованного пуассоновского процесса (3.4) с числом появившихся точек $N(t)$ и с функций отклика (3.1):

$$\begin{aligned} M_u y(t) &= \int_0^t \lambda(s) M\{h(t, s, u_i, \theta_i)\} ds = \\ &= \lambda e^{-\frac{tM\{\theta_i\}}{\tau}} M\{u_i\} \int_0^t e^{\frac{sM\{\theta_i\}}{\tau}} ds = \lambda \tau n \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right). \end{aligned} \quad (3.5)$$

Переработанная системой информация в соответствии с (2.8) принимает вид

$$M_u \hat{y}(t) = n\lambda t - n\lambda \tau (1 - e^{-t/\tau}). \quad (3.6)$$

Из (3.5) следует, что интеграл (2.7) сходится, равен $\lambda \tau n$ и, поэтому, переработанная информация (2.8) неограниченно возрастает:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (n\lambda t - n\lambda \tau (1 - e^{-t/\tau})) = \lim_{t \rightarrow \infty} n\lambda t. \quad (3.7)$$

Таким образом, экспоненциальная функция, по-видимому, правильно описывающая некоторые аспекты переработки информации когнитивными системами,

является одним из примеров из бесконечного числа подобных функций.

Заключение

В работе предложена и аналитически исследована стохастическая модель динамики обработки информации в когнитивных системах, основанная на теории меченых точечных процессов. Ключевым результатом является формализация процесса обработки случайных информационных воздействий с учетом вариаций скорости их переработки.

Основные достижения работы включают:

1. Обоснование входного процесса: Моделирование поступления информации как неоднородного пуассоновского точечного процесса, где каждая точка (событие) помечена двумя независимыми случайными величинами: объемом информации u_i и коэффициентом скорости ее обработки θ_i .
2. Разработка динамической модели: Описание состояния системы (непереработанной информации) как фильтрованного пуассоновского процесса $y(t)$, представляющего сумму убывающих функций отклика $h(t, W_i, u_i, \theta_i)$ на каждое событие.
3. Аналитическое решение для экспоненциального отклика: Получены замкнутые выражения для математического ожидания количества переработанной $M\{\hat{y}(t)\}$ и непереработанной $M\{y(t)\}$ информации при использовании экспоненциальной функции отклика $h(t, W_i, u_i, \theta_i) = u_i \exp(-\theta_i(t - W_i)/\tau)$.
4. Условия применимости модели: Установлено, что модель наиболее адекватна при безразмерном параметре $\tau\lambda(t) \sim 1$, где τ — характерное время обработки системы, а $\lambda(t)$ — интенсивность поступления событий. При $\tau\lambda(t) \gg 1$ или $\tau\lambda(t) \ll 1$ модель упрощается.

Полученные результаты позволяют количественно оценивать:

- Текущую нагрузку на когнитивную систему (ожидаемый объем непереработанной информации).
- Производительность системы (температура переработки информации).
- Влияние вариаций скорости обработки разных типов информации (через распределение θ_i).

Предложенная модель создает основу для:

- Оптимизации управления: Планирования последовательности воздействий на когнитивные системы с учетом их текущего состояния и прогноза нагрузки.

- Проектирования систем: Формализации требований к когнитивным и интеллектуальным системам (например, к необходимой скорости обработки θ_i или допустимой интенсивности входного потока $\lambda(t)$).
- Дальнейших исследований: Обобщения на нелинейные функции отклика, коррелированные метки (u_i, θ_i) или более сложные (не пуассоновские) потоки событий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Xue, N., Li, Y., Ding, D., Fan, Y. Analysis of Regularized Poisson GLM Spike-Train Modeling. // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Т. 2173.
2. Maity R. Statistical Methods in Hydrology and Hydroclimatology, Springer, New York City, New York, USA, 2018.
3. Nussinson, E., Ruimy, R., Elimelech, R., Israel, Y., Kaminer, I., Even-Haim, S. Quantum-Enhanced Microscopy Using Electron Number Pulses. // 2024 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). 2024. С. 1–2
4. Pham C.T., Tran T.T. An algorithm for hybrid regularizers based image restoration with Poisson noise // Kybernetika. 2021. Т. 57. № 3. С. 446–47.
5. Peters, J., Jones, L., Shibata, N., Katakami, S., Kusumi, T., Bekkevold, J., Ishikawa, R., Kawahara, K., Okada, M., Mullarkey, T. New Poisson denoising method for pulse-count STEM imaging. // Ultramicroscopy. 2024. Т. 264. С. 113996
6. Bal A., Banerjee M., Chaki R., Sharma P. An efficient method for PET image denoising by combining multi-scale transform and non-local means // Multimedia Tools and Applications. 2020. Т. 79. С. 29087–29120.
7. Diwakar M., Kumar M. A review on CT image noise and its denoising // Biomedical Signal Processing and Control. 2018. Т. 42. С. 73–88.
8. Zeng G.L., Lv L., Huang Q. Poisson-noise weighted filter for time-of-flight positron emission tomography // Visual Computing for Industry, Biomedicine and Art. 2020. Т. 3. № 10. С. 4.
9. Lamprinakou, S., Flaxman, S., Gandy, A., McCoy, E., Barahona, M., & Filippi, S. BART-based inference for Poisson processes. // Comput. Stat. Data Anal.. 2020. Т. 180. С. 107658.
10. Snyder D.L., Miller M. Random Point Processes in Time and Space. Springer-Verlag, 1991. 480 с.

© Жовноватый Кирилл Евгеньевич (kirill.zhov@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНЫМ ОТОПЛЕНИЕМ С БЕСПРОВОДНЫМ МОНИТОРИНГОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗОН

AUTOMATED GEOTHERMAL HEATING CONTROL SYSTEM WITH WIRELESS MONITORING OF TEMPERATURE ZONES

M. Zubarev

Summary. The purpose of the research is to develop and implement an automated zonal control system for a geothermal heat pump based on a wireless sensor network and intelligent temperature control algorithms. Hypothesis: the introduction of zonal regulation, taking into account the inertia of underfloor heating and ventilation detection, makes it possible to increase energy efficiency by 15-20% compared to traditional control systems. To achieve this goal, the tasks of constructing a mathematical model of the building's thermal balance, designing the architecture of a DIY monitoring system, and developing a two-level control algorithm based on ESP32 and Raspberry Pi were solved. Methods of numerical modeling, statistical processing of temperature data and adaptive control algorithms are applied. The simulation results confirmed the stable maintenance of set temperatures with an accuracy of $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ and a reduction in energy consumption to 3,200 kWh per year. The practical implementation of the system has shown high reliability and adaptability to various climatic conditions.

Keywords: geothermal heating, IoT, wireless sensors, control system, energy efficiency.

Зубарев Михаил Андреевич

Ассистент, аспирант,

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического приборостроения»
mishaniya1121@yandex.ru

Аннотация. Цель исследования — разработка и практическая реализация автоматизированной системы зонального управления геотермальным тепловым насосом на базе беспроводной сенсорной сети и интеллектуальных алгоритмов регулирования температурного режима. Гипотеза: внедрение зонального регулирования с учетом инерционности теплых полов и детекции проветривания позволяет повысить энергоэффективность на 15–20 % по сравнению с традиционными системами управления. Для достижения цели решались задачи построения математической модели теплового баланса здания, проектирования архитектуры DIY-системы мониторинга и разработки двухуровневого алгоритма управления на базе ESP32 и Raspberry Pi. Применены методы численного моделирования, статистической обработки температурных данных и алгоритмов адаптивного регулирования. Результаты моделирования подтвердили стабильное поддержание заданных температур с точностью $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ и снижение энергопотребления до 3200 кВт*ч в год. Практическая реализация системы показала высокую надежность и адаптивность к различным климатическим условиям.

Ключевые слова: геотермальное отопление, IoT, беспроводные датчики, система управления, энергоэффективность.

Введение

Геотермальные системы отопления демонстрируют высокую энергоэффективность в условиях холодного климата, обеспечивая коэффициент преобразования (COP) 2.5–4 даже при низких наружных температурах [1]. Однако эффективность таких систем в значительной степени зависит от качества управления тепловым режимом здания, особенно при использовании низкотемпературных систем отопления типа «теплый пол».

Существующие коммерческие системы управления геотермальными тепловыми насосами имеют ряд ограничений: высокую стоимость (от 150–300 тыс. руб.) [2, 3], привязку к конкретным производителям оборудования, ограниченные возможности настройки алгоритмов управления и слабую интеграцию с современными IoT-платформами [4]. Большинство систем используют простые термостатические алгоритмы, не учитывающие зо-

нальные особенности здания и инерционность системы теплых полов.

Развитие доступных микроконтроллерных платформ и беспроводных технологий создает возможности для разработки гибких и экономически эффективных систем управления. Использование DIY-подхода позволяет создать адаптивную систему управления с возможностью настройки под конкретные архитектурные и климатические особенности объекта при значительно меньших затратах.

Целью данного исследования является разработка и практическая реализация автоматизированной системы зонального управления геотермальным тепловым насосом с использованием беспроводной сенсорной сети и интеллектуальных алгоритмов регулирования температурного режима.

1. Архитектура системы и техническое описание объекта

Объектом исследования является частный дом общей площадью 100 м² с системой отопления на базе геотермального теплового насоса мощностью 10 кВт. Здание имеет следующее зонирование: отапливаемые помещения площадью 89 м² (кухня, спальни, холл, гостиная, душевая и санузел) и неотапливаемые «холодные» помещения площадью 11 м² (тамбур, прихожая, застекленная веранда). Система отопления реализована через теплые полы во всех помещениях с возможностью индивидуального регулирования температуры теплоносителя.

Геотермальный тепловой насос обеспечивает три ступени температуры теплоносителя: 35°C, 45°C и 55°C, а также три режима скорости циркуляции. Такая конфигурация позволяет реализовать девять различных режимов работы системы с максимальной тепловой мощностью 10 кВт при ограничении электрического потребления на том же уровне.

Архитектура беспроводной системы управления построена по централизованной схеме с единым управляющим узлом на базе Raspberry Pi Zero 2W. Данный одноплатный компьютер обеспечивает сбор данных от всех датчиков по протоколу Wi-Fi, выполнение алгоритмов управления и формирование команд управления тепловым насосом. Выбор Raspberry Pi Zero 2W обусловлен наличием встроенного Wi-Fi модуля, достаточной вычислительной мощностью для реализации алгоритмов управления и низким энергопотреблением (1.5–2 Вт).

Система мониторинга включает внешний термометр, расположенный на удалении 3–5 метров от дома для исключения влияния тепловых мостов и излучения от ограждающих конструкций. Внешний датчик передает данные о температуре наружного воздуха каждые 20 минут, что обеспечивает своевременную коррекцию алгоритмов управления при изменении погодных условий.

Температурные требования для различных зон установлены в соответствии с санитарными нормами и требованиями комфорта: жилые помещения (спальни, гостиная) поддерживаются в диапазоне 21–24°C, вспомогательные помещения (кухня, холл) — 19–22°C, санитарные помещения (душевая, санузел) — 22–25°C. Для «холодных» помещений контролируется лишь недопущение замерзания (температура выше 5°C), но активное отопление не производится для повышения энергоэффективности системы [5].

2. DIY-датчики температуры и влажности для системы мониторинга

Беспроводные датчики температуры и влажности разработаны на базе микроконтроллера ESP32-C3 Mini

и сенсора BME280 [6]. Выбор ESP32-C3 обусловлен наличием встроенного Wi-Fi модуля, низким энергопотреблением в режиме глубокого сна (10–15 мкА) и достаточной вычислительной мощностью для обработки данных сенсора. Сенсор BME280 обеспечивает высокую точность измерений: $\pm 0.5^\circ\text{C}$ для температуры, $\pm 3\%$ для относительной влажности и ± 1 гПа для атмосферного давления.

Конструкция датчика включает аккумулятор 18650 емкостью 3000 мАч, контроллер заряда TP4056 с защитой от переразряда и стабилизатор напряжения TPS63020 для обеспечения стабильного питания 3.3В при разряде аккумулятора. Корпус датчика выполнен с классом защиты IP40, что обеспечивает защиту от пыли.

Энергосберегающий режим работы датчиков реализован через периодическое пробуждение каждые 20 минут для выполнения измерений и передачи данных. Время активной работы составляет 5–8 секунд: 2 секунды на инициализацию сенсора и выполнение измерений, 3–6 секунд на установление Wi-Fi соединения и передачу данных. Остальное время датчик находится в режиме глубокого сна с отключенными Wi-Fi и Bluetooth модулями.

Расчет энергопотребления показывает следующие значения: активный режим с Wi-Fi — 150–170 мА, активный режим измерений — 20–30 мА, режим глубокого сна — 10–15 мкА. При заданном режиме работы суточное потребление составляет 12.4 мАч, что обеспечивает автономную работу около 8 месяцев от одного заряда аккумулятора [7].

Протокол передачи данных основан на HTTP POST запросах к веб-серверу, работающему на Raspberry Pi. Каждый датчик передает JSON-структуру, содержащую уникальный идентификатор датчика, временную метку, температуру, влажность, атмосферное давление и уровень заряда аккумулятора.

Размещение датчиков в помещениях выполняется с учетом особенностей теплообмена: высота установки 1.5 м от пола. В помещениях с теплыми полами датчики размещаются в центральной части комнаты для получения усредненных показаний температуры.

3. Алгоритм управления тепловым насосом

Центральный алгоритм управления реализован на Raspberry Pi Zero 2W с использованием языка программирования Python и библиотек NumPy для численных расчетов, Flask для веб-интерфейса и sqlite3 для ведения базы данных температурных измерений. Алгоритм выполняется в виде службы системы с периодичностью анализа данных каждые 5 минут.

Основной цикл управления включает следующие этапы: сбор и валидация данных от всех датчиков, анализ

температурных зон и выявление помещений с температурой ниже установленных порогов, принятие решения о необходимости изменения режима работы теплового насоса, формирование команд управления и их передача на тепловой насос через релейные модули.

Двухуровневая система регулирования обеспечивает оптимальное сочетание скорости реакции и энергоэффективности. Первый уровень регулирования основан на изменении скорости циркуляции теплоносителя в системе отопления. При обнаружении зон с температурой ниже установленного порога (19°C для большинства помещений) система увеличивает скорость циркуляции с минимальной на среднюю, а затем на максимальную. Изменение скорости циркуляции обеспечивает быструю реакцию системы (время отклика около 30 минут) при минимальном увеличении энергопотребления.

Второй уровень регулирования активируется при неэффективности изменения скорости циркуляции в течение 2 часов. В этом случае система повышает температуру теплоносителя с 35°C до 45°C, а при необходимости — до 55°C. Временная задержка в 2 часа учитывает инерционность системы теплых полов и предотвращает излишние переключения температурных режимов.

Алгоритм детекции проветривания основан на анализе скорости изменения температуры в отдельных помещениях. При обнаружении резкого снижения температуры (более 2°C за 20 минут) в одном помещении при стабильной температуре в остальных зонах система классифицирует это как проветривание и временно исключает данное помещение из алгоритма управления на период до 120 минут. Это позволяет избежать излишней реакции системы на кратковременные температурные возмущения.

Ограничение в режиме пиковой производительности (55 градусов температура теплоносителя и третья (максимальная) скорость циркуляции) установлено на значении электропотребления в 10 кВт. Данное ограничение обусловлено предельной мощностью источника электропитания.

ПИД-регулятор используется для точной подстройки параметров управления [8]. Коэффициенты регулятора настраиваются индивидуально для каждого типа помещений: $K_p=0.8$, $K_i=0.1$, $K_d=0.05$ для жилых комнат; $K_p=0.6$, $K_i=0.08$, $K_d=0.03$ для вспомогательных помещений. Различия коэффициентов обусловлено разными требованиями к точности поддержания температуры и скорости реакции системы.

5. Математическая модель системы управления

Математическая модель системы управления основана на тепловом балансе здания с учетом зонального

распределения температуры и инерционности системы теплых полов. Общее уравнение теплового баланса для i -й зоны записывается в виде:

$$C_i * dT_i/dt = Q_{heat,i} - Q_{loss,i} + Q_{exchange,i}$$

где: C_i — теплоемкость i -й зоны (Дж/К), T_i — температура воздуха в i -й зоне (°C), $Q_{heat,i}$ — тепловая мощность, подводимая системой отопления (Вт), $Q_{loss,i}$ — теплопотери i -й зоны (Вт), $Q_{exchange,i}$ — теплообмен между зонами (Вт) [9].

Теплоемкость каждой зоны определяется как сумма теплоемкостей воздуха, ограждающих конструкций и внутренних предметов. Для жилых помещений площадью 20 м² с высотой потолков 2.7 м теплоемкость составляет приблизительно 15–18 МДж/К, для вспомогательных помещений — 8–12 МДж/К.

Модель теплопотерь учитывает передачу тепла через ограждающие конструкции, инфильтрацию и вентиляцию:

$$Q_{loss,i} = k_{walls,i} * (T_i - T_{out}) + k_{inf,i} * (T_i - T_{out}),$$

где: $k_{walls,i}$ — приведенный коэффициент теплопередачи ограждающих конструкций i -й зоны (Вт/К), $k_{inf,i}$ — коэффициент теплопотерь на инфильтрацию (Вт/К), T_{out} — температура наружного воздуха (°C).

Теплообмен между зонами моделируется через коэффициент теплопередачи внутренних перегородок:

$$Q_{exchange,i} = \sum k_{ij} * (T_j - T_i),$$

где: k_{ij} — коэффициент теплопередачи между i -й и j -й зонами (Вт/К).

Модель системы теплых полов учитывает инерционность нагрева стяжки и распределение температуры по площади помещения. Тепловая мощность теплого пола определяется выражением:

$$Q_{floor,i} = k_{floor,i} * S_i * (T_{coolant} - T_i)^n,$$

где $k_{floor,i}$ — коэффициент теплопередачи теплого пола (Вт/(м²·Кⁿ)), S_i — площадь теплого пола в i -й зоне (м²), $T_{coolant}$ — температура теплоносителя (°C), n — показатель степени (обычно 1.1–1.3 для систем теплых полов).

Инерционность системы моделируется через дифференциальное уравнение первого порядка с постоянной времени, зависящей от толщины стяжки и теплофизических свойств материала:

$$\tau_{floor} * dQ_{floor,i} / dt + Q_{floor,i} = Q_{floor,target,i}$$

где: τ_{floor} — постоянная времени системы теплых полов (обычно 2–4 часа), $Q_{floor,target,i}$ — целевая тепловая мощность.

Модель энергопотребления теплового насоса связывает электрическую мощность с тепловой через коэффициент преобразования [1]:

$$P_{electric} = Q_{heat} / COP(T_{source}, T_{supply}, Load_factor),$$

где: COP — коэффициент преобразования, зависящий от температуры источника T_{source} , температуры подачи T_{supply} и коэффициента загрузки $Load_factor$.

Зависимость COP от температурных условий аппроксимируется полиномом второй степени:

$$COP = COP_{nom} * (1 + 0,08 * (T_{source} - 5) - 0,04 * (T_{supply} - 35) - 0,002 * (T_{source} - 5))$$

где: $COP_{nom} = 3.5$ — номинальный коэффициент преобразования при $T_{source} = 5^{\circ}\text{C}$ и $T_{supply} = 35^{\circ}\text{C}$.

Алгоритм прогнозирования потребности в тепле основан на анализе тренда изменения наружной температуры и текущих показаний датчиков в помещениях. Прогнозируемая температура в i -й зоне через время t рассчитывается по формуле:

$$T_{i(t)} = T_{i(0)} + (Q_{heat,i} - Q_{loss,i}) * t / C_i,$$

Данная модель позволяет упреждающе корректировать режим работы теплового насоса при прогнозируемом изменении наружной температуры.

Алгоритм детекции проветривания использует производную температуры по времени и статистический анализ отклонений:

$$dT_i/dt = (T_{i(t)} - T_{i(t-\Delta t)})/\Delta t$$

$$\text{Проветривание}_i = (dT_i/dt < -0,2 \text{ К/мин}) \text{AND} (|dT_j/dt| < 0,05 \text{ К/мин для } j \neq i)$$

5. Результаты моделирования и экспериментальные данные

Численное моделирование работы системы выполнено для температуры наружного воздуха от -5°C до -15°C . Моделирование проводилось на интервале 72 часа с шагом интегрирования 5 минут (рис. 1).

Результаты моделирования демонстрируют эффективность двухуровневой системы регулирования. При температуре наружного воздуха от -5°C до -15°C система успешно поддерживает заданные температурные режимы во всех зонах с точностью $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Время отклика системы при изменении скорости циркуляции составляет 25–35 минут, что обеспечивает быструю реакцию на изменения температурных условий. Переход на более высокую температуру теплоносителя (второй

уровень регулирования) происходит через 2 часа при неэффективности первого уровня, что учитывает инерционность системы теплых полов. Система демонстрирует стабильную работу без колебательных процессов благодаря правильно настроенным ПИД-регуляторам с коэффициентами $K_p=0.8$, $K_i=0.1$, $K_d=0.05$ для жилых комнат.

На втором графике (рис. 2) представлен алгоритм управления с учётом проветриваний и демонстрации режимов изменения скорости циркуляции жидкости в системе. Алгоритм детекции проветривания показывает высокую эффективность: время детекции проветривания составляет 15–20 минут при резком снижении температуры более 2°C за 20 минут. Исключение помещения из алгоритма управления на 120 минут предотвращает излишнее энергопотребление и повышает стабильность работы системы при кратковременных температурных возмущениях.

Анализ энергопотребления показывает значительные различия между режимами работы. Режим 35°C с минимальной скоростью циркуляции обеспечивает $COP = 3.8$ при потреблении 2.6 кВт, режим 45°C со средней скоростью дает $COP = 3.4$ при потреблении 4.1 кВт, а режим 55°C с максимальной скоростью характеризуется $COP = 2.9$ при потреблении 6.9 кВт. Сезонный коэффициент эффективности (SCOP) составляет 3.2–3.6 в зависимости от климатических условий. Экономия электроэнергии относительно систем без зонального управления достигает 15–20 %, что составляет экономию 2400–3200 кВт·ч в год для рассматриваемого объекта площадью 100 м².

Вывод

В результате проведенного исследования разработана и практически реализована интеллектуальная система управления геотермальным тепловым насосом на базе DIY-компонентов и беспроводных технологий. Система демонстрирует высокую эффективность в поддержании температурного комфорта при значительном снижении энергопотребления.

Основными достижениями работы являются создание полнофункциональной системы управления стоимостью в 5–7 раз меньше коммерческих аналогов при сопоставимой функциональности, достижение повышения энергоэффективности на 15–20 % благодаря зональному управлению и интеллектуальным алгоритмам регулирования, разработка двух взаимосвязанных математических моделей теплового баланса здания и динамики системы теплых полов, обеспечивающих точное прогнозирование поведения системы и оптимизацию алгоритмов управления [10].

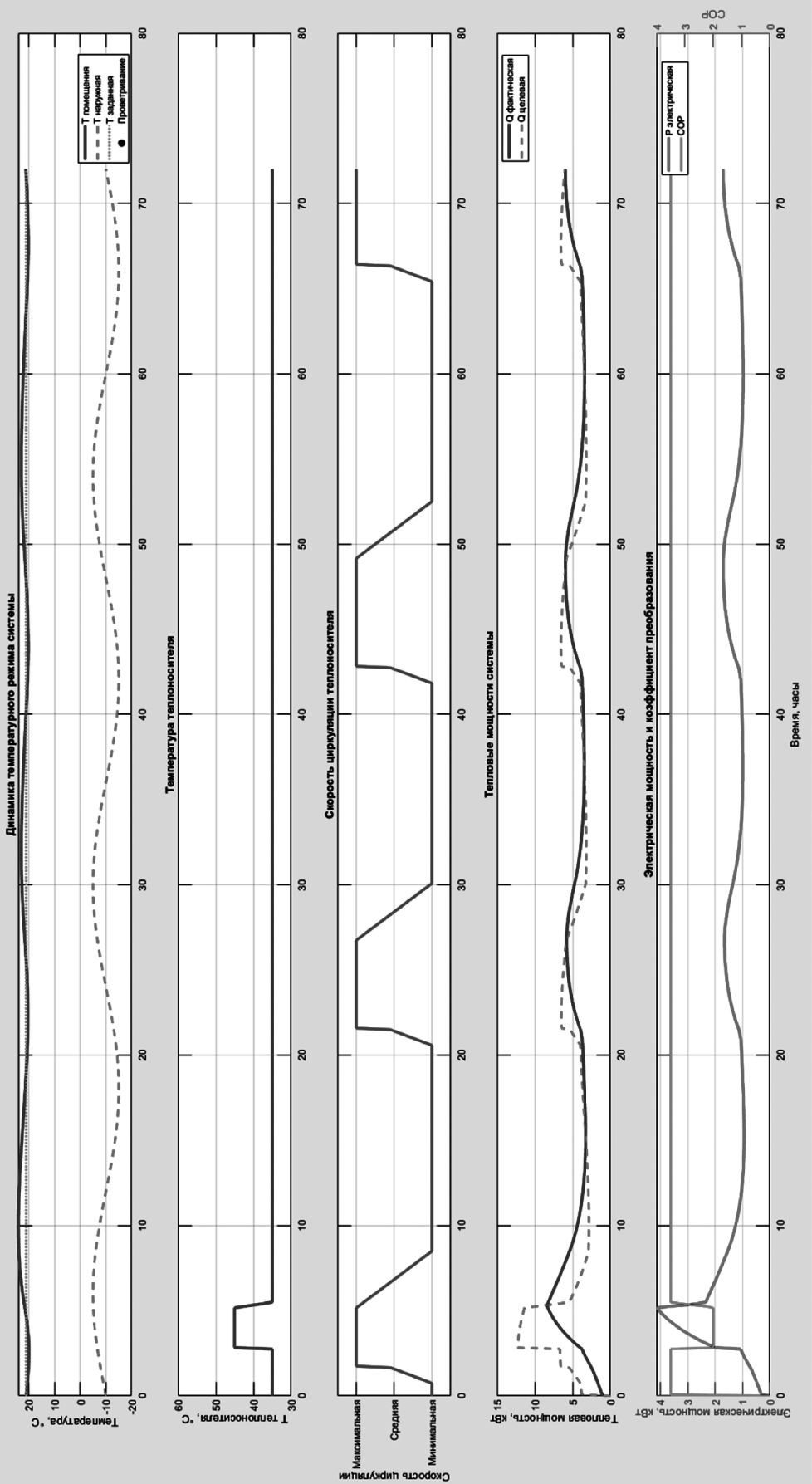


Рис. 1. Динамика температурного режима системы



Разработанная математическая модель теплового баланса здания с учетом зонального распределения температуры позволяет прогнозировать температурный режим каждого помещения и оптимизировать работу системы отопления. Модель системы теплых полов с учетом инерционности нагрева стяжки обеспечивает понимание динамических характеристик системы и необходимость упреждающего управления с постоянной времени 2–4 часа.

Реализованный двухуровневый алгоритм управления с детекцией проветривания обеспечивает стабильную работу системы без ложных срабатываний, при этом первый уровень регулирования через изменение скорости циркуляции обеспечивает быстрый отклик си-

стемы за 30 минут, а второй уровень через изменение температуры теплоносителя активируется при неэффективности первого уровня через 2 часа.

Система успешно адаптируется под различные архитектурные решения и климатические условия, поддерживает температурные требования для жилых помещений 21–24°C, вспомогательных помещений 19–22°C и санитарных помещений 22–25°C с точностью $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Практическая значимость работы подтверждается возможностью тиражирования решения для широкого класса объектов при значительной экономической эффективности и простоте реализации на базе доступных компонентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Deng J., Su Y., Peng C., Qiang W., Cai S., Qingpeng W., Zhang H. How to improve the energy performance of mid-deep geothermal heat pump systems: Optimization of heat pump, system configuration and control strategy // *Energy*. — 2023. — Vol. 285. — 129537. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129537>
2. Johnson B., Krishnamoorthy S. Where are Today's Residential Heat Pump Technologies Cost-Effective? // *ASHRAE Transactions*. — 2021. — Vol. 127, № 1. — С. 496. — ISSN 0001-2505.
3. Kijo-Kleczkowska A., Bruś P., Więciorkowski G. Economic analysis of heat pump exploitation — A case study // *Energy*. — 2023. — Vol. 280. — 128184. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128184>
4. Yaici W., Entchev E., Longo M. Internet of Things (IoT)-Based System for Smart Home Heating and Cooling Control // 2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). — Prague, Czech Republic, 28 июня — 01 июля 2022 г. — IEEE, 2022. <https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope54979.2022.9854634>
5. СП 60.13330.2020. Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. СНиП 41-01-2003 : утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 30.12.2020 N 921/пр. — М. : Стандартинформ, 2021. — 138 с. — URL: <https://минстрой.рф/upload/%D0%A1%D0%9F%2060.13330.2020.pdf> (дата обращения: 23.05.2025).
6. Gada U., Joshi B., Kadam S., Jain N., Kodeboyina S., Menon R. IoT based Temperature Monitoring System // 2021 4th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE). — NaviMumbai, India, 15–16 января 2021 г. — IEEE, 2021. — С. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICNTE51185.2021.9487691>
7. Md Dzahir M.A.S., Chia K.S. Evaluating the Energy Consumption of ESP32 Microcontroller for Real-Time MQTT IoT-Based Monitoring System // 2023 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT). — Sakheer, Bahrain, 20–21 ноября 2023 г. — IEEE, 2023. <https://doi.org/10.1109/3ICT60104.2023.10391358>
8. Rahmadini V.F., Ma'arif A., Abu N.S. Design of Water Heater Temperature Control System using PID Control // *Control Systems and Optimization Letters*. — 2023. — Vol. 1, № 2. — С. 111–117. — ISSN 2985-6116. <https://doi.org/10.59247/csol.v1i2.41>
9. Узаков Г.Н., Ташмаматов Б.М., Камолов Б.И. Математическое моделирование теплового режима типового сельского дома // *Инновационные технологии*. — 2024. — Т. 55, № 3. — С. 50–57. — ISSN 2181-4732.
10. Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XXXIX Международной научно-практической конференции (Пенза, 25 апреля 2021 г.) / отв. ред. Ф.Ю. Гуляев. — Пенза: Наука и Просвещение, 2021. — 90 с. — ISBN 978-5-00159-822-0.

© Зубарев Михаил Андреевич (mishaniya1121@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИНТЕГРАЦИЯ ВНЕШНИХ ИСТОЧНИКОВ ДАННЫХ В СИСТЕМУ УЧЕТА ОТЧЕТНОСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ КОМПАНИИ: АРХИТЕКТУРА И РЕАЛИЗАЦИЯ

Ильин Илья Игоревич

Аспирант, ФГБОУ ВО «Московский государственный
технологический университет Станкин»
hitsukey@yandex.ru

INTEGRATION OF EXTERNAL DATA SOURCES INTO THE ACCOUNTING SYSTEM OF A TELECOMMUNICATION COMPANY: ARCHITECTURE AND IMPLEMENTATION

I. Ilyin

Summary. To improve the completeness and integrity of data, telecommunications companies need to solve the problem of integrating various external data sources into internal accounting systems.

The article describes the implemented architecture of the integration module with the accounting system of technical maintenance reports in PJSC VimpelCom.

The analysis demonstrates the need for a variety of interfaces (REST API, mobile application, telegram bot, web interface) for effective work with various categories of users (company employees, employees of various contractors, other systems within the company).

The implementation of the integration module has improved the transparency of the maintenance process, reduced the time for data processing, and increased the reliability of interaction between systems.

Keywords: JSON, Kafka, REST API, Telegram bot, data integration, telecommunications, maintenance, token, reporting.

Аннотация. Для повышения полноты и целостности данных, телекоммуникационным компаниям требуется решить задачу интеграции различных внешних источников данных во внутренние системы учета.

В статье описана реализованная архитектура модуля интеграций с системой учета отчетности о техническом обслуживании в компании ПАО «Вымпелком».

Проведенный анализ демонстрирует необходимость многообразия интерфейсов (REST API, мобильное приложение, telegram-бот, веб-интерфейс) для эффективной работы с различными категориями пользователей (сотрудники компании, сотрудники различных подрядных организаций, другие системы внутри компании).

Внедрение модуля интеграций позволило обеспечить улучшение прозрачности процесса проведения технического обслуживания, сократить время на обработку данных, а также повысить надежность взаимодействия между системами.

Ключевые слова: JSON, Kafka, REST API, Telegram-бот, интеграция данных, телекоммуникации, техническое обслуживание, токен, учет отчетности.

Введение

Телекоммуникационные компании работают с большим количеством распределенных объектов и подрядных организаций, что требует постоянного обмена данными между различными системами учета, мобильными приложениями и сервисами автоматизации. Особенно остро стоит задача консолидации и учета отчетов о техническом обслуживании (ТО) базовых станций, которые формируются как вручную, так и автоматически. Для повышения прозрачности процессов, снижения количества ошибок и оптимизации документооборота необходимо внедрение решений, обеспечивающих прием данных из внешних источников, их проверку, маршрутизацию и регистрацию в системе учета отчетности.

Целью данной работы является проектирование и реализация архитектуры интеграции внешних источников данных в систему учета отчетности телекомму-

никационной компании, а также внедрение механизма обмена данными с мобильными приложениями, чат-ботами и корпоративными платформами.

Научная значимость работы заключается в обобщении практики проектирования распределенной интеграционной архитектуры, устойчивой к изменениям в источниках данных и масштабируемой под различные интерфейсы взаимодействия. Практическая значимость состоит во внедрении решений, уже используемых в ПАО «Вымпелком».

Литературный обзор

Интеграция внешних источников данных в корпоративные учетные системы является ключевым направлением цифровой трансформации в сфере телекоммуникаций. Эффективность автоматизации отчетности зависит от выбора архитектурных решений, способов синхронизации данных и применяемых технологий обмена информацией между разнородными системами.

На примере автоматизированных производственных систем Аксенов К.А. и Спицина И.А. [1] исследуют практическую реализацию задач интеграции с учетом специфики сложных объектов. Это особенно актуально для внедрения модулей обработки отчетов, получаемых с различных базовых станций и объектов телекоммуникационной инфраструктуры.

Особенности цифровизации отчетности и её влияние на производственные и сервисные отрасли рассмотрены в работе Амановой Ай., Сахедова Я. и Мыратлыева Д. [2], где подчеркивается роль автоматизации как этапа перехода к цифровому управлению данными. Подобные преобразования становятся особенно актуальными для организаций с распределённой структурой и высокой интенсивностью документооборота, таких как телекоммуникационные компании.

В статье Багаутдинова К.Ш. подтверждается актуальность задачи интеграции систем. В своей работе он рассматривает методы интеграции информационных систем, архитектуры систем интеграции, механизмы отображения моделей данных, современные подходы к интеграции данных. Эти исследования могут лечь в основу разрабатываемых способов интеграции внешних источников данных в систему учета отчетности телекоммуникационной компании.

Белалова Г.А. [4] проводит классификацию методов интеграции и подчеркивает важность выбора адаптивной архитектуры при проектировании распределенных информационных систем, способных масштабироваться под нагрузку и изменяющиеся требования. Эти аспекты критичны для устойчивой обработки большого массива отчетных данных.

Иванюгин М.А. [5] рассматривает общие принципы взаимодействия между подсистемами в интеграционных архитектурах, акцентируя внимание на стандартах и протоколах обмена. Это имеет значение при реализации REST API и формировании гибкой модели прав доступа, как в системах сбора и контроля отчетности.

Особенности системной интеграции в транспортной логистике приведены у Искандерова Ю.М. [6], где подчеркивается роль согласованной структуры данных и мониторинга обмена. Это перекликается с задачами регистрации и контроля отправки/приема отчетов в распределенных учетных системах телекоммуникационного сектора.

Общие подходы к интеграции информационных систем и особенности их реализации в разнородных ИТ-ландшафтах рассмотрены в работе Карпова О.Э., Субботина С.А., Здирук К.К., Шишканова Д.В., Дьяченко П.С., Толпыгина А.С. и Стрельцова А.Н. [7]. Авторы делают ак-

цент на практических аспектах внедрения интеграционных решений в крупной медицинской организации. Эти принципы могут быть адаптированы к нуждам телекоммуникационной отрасли при построении систем учета технического обслуживания (ТО).

Исторический и технологический обзор развития технологий интеграции информационных систем приводит Тёмкина Т.А. [8], выделяя эволюцию от централизованных решений к микросервисной архитектуре. Подобная архитектура обеспечивает модульность, отказоустойчивость и масштабируемость системы учета отчетности.

Практические аспекты построения интеграционных решений и управления правами доступа к ним раскрываются в работе Тимакина О.А. и Радзивон В. [9], что может быть использовано при проектировании API-интерфейсов для модулей взаимодействия с внешними приложениями (мобильными, ботами и др.).

В своей статье Хан А.О. и Никитин К.А. [10] рассматривают основные компоненты интегрированных информационных систем, а также их преимущества. Авторы заявляют, что такие системы предоставляют платформу для инноваций через внедрение передовых технологий, таких как искусственный интеллект, машинное обучение, большие данные и автоматизация процессов, которые могут открыть новые направления для роста и развития предприятия.

Таким образом, проведенный анализ литературы подтверждает высокую степень разработанности теоретических и практических основ интеграции информационных систем. Это создаёт основу для разработки специализированного решения — модуля интеграции внешних источников данных в систему учета отчетности о проведенном ТО в телекоммуникационной компании.

Материалы и методы

Часть пользователей системы проводит ТО и фиксирует собранные данные с помощью мобильного приложения. При завершении работ, приложение формирует JSON-объект с данными и отправляет его в Kafka. Модуль интеграций подписан на соответствующий топик в Kafka, из которого считывает сообщения. Полученный JSON и сопроводительная информация по запросу фиксируется в БД. Все полученные JSON-объекты обрабатываются и парсятся, а все полученные данные распределяются по таблицам БД. После записи в БД система формирует ответный JSON с результатом обработки и отправляет его обратно в Kafka, откуда мобильное приложение считывает сообщение и отображает результат пользователю во всплывающем уведомлении.

Для этой интеграции в БД разработана таблица BeetrackKafka, которая хранит в себе всю основную информацию по каждому запросу. Поля таблицы, их типы и описания представлены в таблице 1.

Таблица 1.
Структура таблицы БД BeetrackKafka

Поле	Тип	Описание
ID	int	Первичный ключ. Уникальный идентификатор записи в таблице.
Key	varchar(50)	Ключ запроса, идентифицирующий его в Kafka.
InsertTimestamp	timestamp	Дата и время добавления записи в таблицу.
RequestTimestamp	timestamp	Дата и время добавления запроса в Kafka.
RequestPayload	longtext	JSON с данными о проведенном ТО.
ResponsePayload	text	JSON с ответом от системы.
IsWorked	bit	Флаг, обработан ли запрос системой.

Поле	Тип	Описание
WorkedTimestamp	timestamp	Дата и время обработки запроса системой.
IsResponseSent	bit	Флаг, отправлен ли ответ системы в Kafka.
ResponseSentTimestamp	timestamp	Дата и время отправки ответа системы в Kafka.

Система считывает из запроса в Kafka ключ (фиксируется в Key), время помещения запроса в Kafka (фиксируется в RequestTimestamp), JSON с данными проведенного ТО (фиксируется в RequestPayload). При добавлении этой информации в таблицу BeetrackKafka, фиксируется дата и время (в InsertTimestamp). После обработки JSON и записи полученных данных в соответствующих таблицах, в BeetrackKafka фиксируется факт и временная отметка обработки запроса системой (IsWorked и WorkedTimestamp). Когда все данные получены и стоит соответствующая отметка, система отправляет сформированный ответ на запрос (ResponsePayload) в Kafka, а в таблице BeetrackKafka фиксируется факт и временная отметка отправки ответа в Kafka (IsResponseSent и ResponseSentTimestamp).

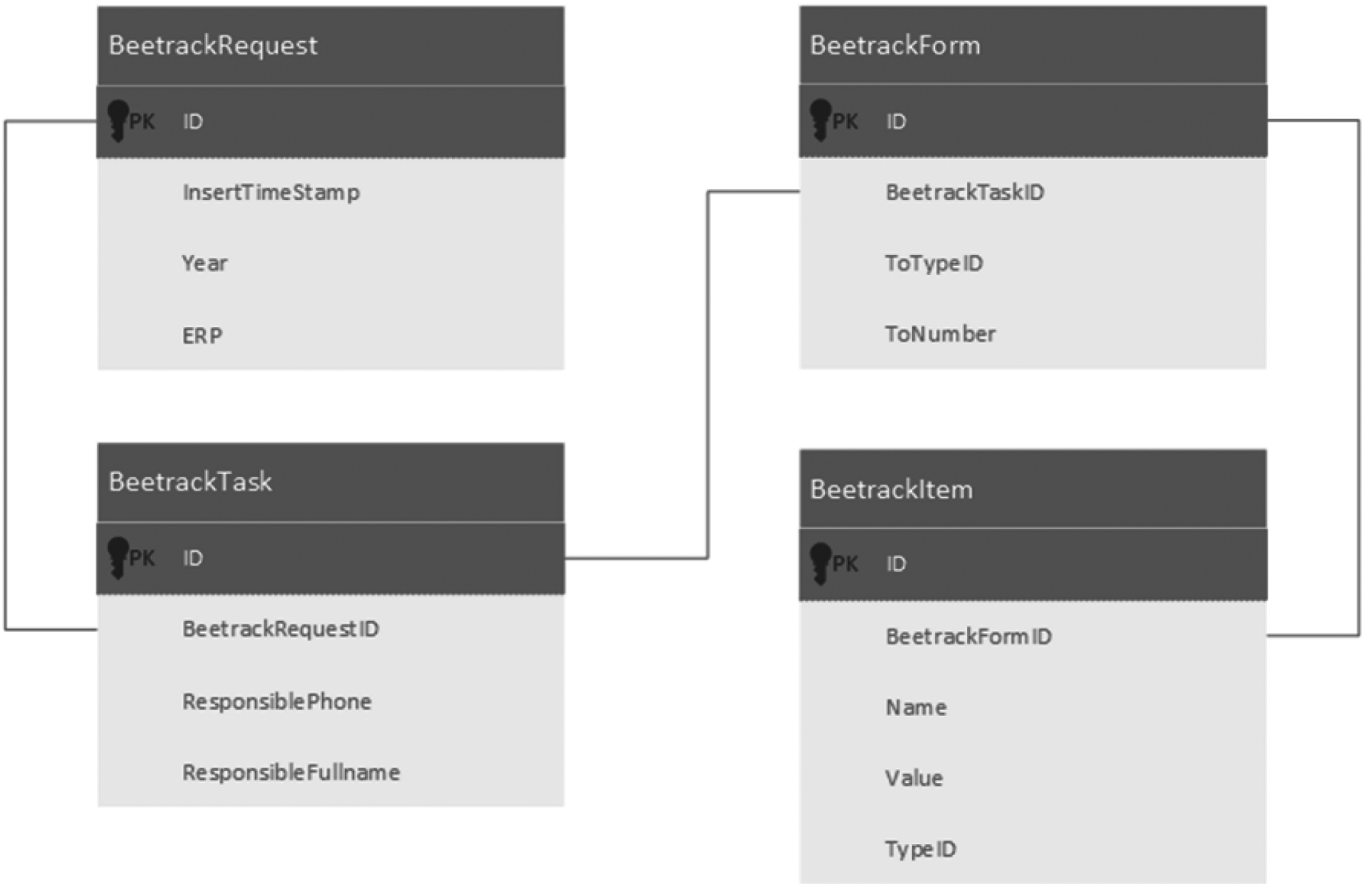


Рис.1. Схема таблиц БД для хранения данных из мобильного приложения

Важно отметить, что для идентификации в системе любого ТО, необходима связка параметров, состоящая из года проведения ТО, ERP, типа ТО, номера ТО в рамках года.

На стороне мобильного приложения проведение ТО реализовано таким образом, что создается запрос на проведение работ, затем создается задача на каждого члена группы. В процессе выполнения ТО члены группы фиксируют различные формы по одному или нескольким типам ТО.

В связи с этими ограничениями на стороне мобильного приложения, формируемый JSON-объект с данными имеет такую структуру, что после его обработки, данные можно распределить по 4 таблицам БД. Схема этих таблиц БД представлена на рисунке 1.

Таблица BeetrackRequest хранит данные о дате и времени, когда данные появились в этих таблицах, годе проведения ТО, ERP кода позиции, на которой проводилось ТО. Поля таблицы, их типы и описания представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Структура таблицы БД BeetrackRequest

Поле	Тип	Описание
ID	varchar(50)	Первичный ключ. Уникальный идентификатор записи в таблице. В это поле записывается значение Key запроса, полученного из Kafka.
InsertTimestamp	timestamp	Дата и время добавления записи в таблицу.
Year	int	Год проведения ТО.
ERP	varchar(11)	ERP код позиции, на которой проводилось ТО. Состоит из 11 цифр.

Таблица BeetrackTask хранит ID записи из таблицы BeetrackRequest и данные об ответственных исполнителях (контактная информация и ФИО). Поля таблицы, их типы и описания представлены в таблице 3.

Таблица BeetrackForm хранит ID записи из таблицы BeetrackTask и данные о типе и номере проведенного ТО. Поля таблицы, их типы и описания представлены в таблице 4.

Таблица BeetrackItem хранит ID записи из таблицы BeetrackForm и данные о параметрах и полученных значениях, а также их типах. Поля таблицы, их типы и описания представлены в таблице 5.

В ходе работы разработан REST API для работы с системой учета. Для осуществления гибкой настройки

Таблица 3.

Структура таблицы БД BeetrackTask

Поле	Тип	Описание
ID	bigint	Первичный ключ. Уникальный идентификатор записи в таблице.
BeetrackRequestID	varchar(50)	Уникальный идентификатор (поле ID) связанной записи из таблицы BeetrackRequest.
ResponsiblePhone	varchar(250)	Контактная информация ответственного исполнителя, проводившего ТО.
ResponsibleFullName	varchar(50)	ФИО ответственного исполнителя, проводившего ТО.

Таблица 4.

Структура таблицы БД BeetrackForm

Поле	Тип	Описание
ID	bigint	Первичный ключ. Уникальный идентификатор записи в таблице.
BeetrackTaskID	bigint	Уникальный идентификатор (поле ID) связанной записи из таблицы BeetrackTask.
ToTypeID	int	ID типа ТО из соответствующей таблицы.
ToNumber	int	Номер проведенного ТО в рамках года.

Таблица 5.

Структура таблицы БД BeetrackItem

Поле	Тип	Описание
ID	bigint	Первичный ключ. Уникальный идентификатор записи в таблице.
BeetrackFormID	bigint	Уникальный идентификатор (поле ID) связанной записи из таблицы BeetrackForm.
Name	varchar(500)	Наименование параметра. В дальнейшем используется, например, при сборке отчета.
Value	varchar(2500)	Значение параметра, полученное в ходе проведения ТО.
TypeID	int	ID типа параметра. Дата, целое число, строка, и т.п. Типы хранятся в отдельном справочнике.

прав доступа, каждому потребителю присваивается свой уникальный токен (уникальная последовательность символов). Благодаря этому токenu можно однозначно идентифицировать источник запроса. Каждому токenu предоставляются права на часть методов REST

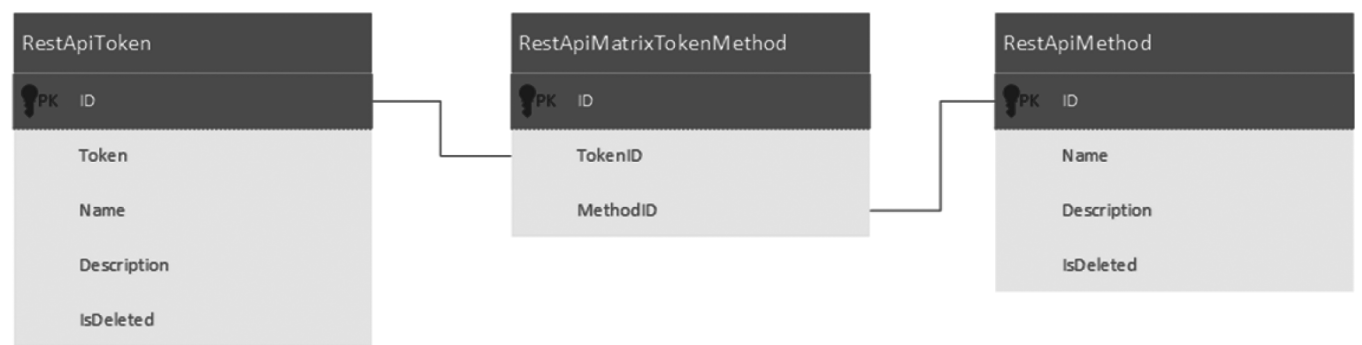


Рис. 2. Схема таблиц БД для управления правами доступа к методам REST API

API, в зависимости от согласования уровня прав. Для такого управления доступами к методам REST API, было разработано 3 таблицы БД. Схема этих таблиц представлена на рисунке 2.

Таблица RestApiToken хранит записи о токенах. Запись содержит уникальный ID, сам уникальный токен, наименование владельца токена (обычно какая-то система), описание (если требуется более подробное объяснение), флаг активности токена (удален он или нет). Поля таблицы, их типы и описания представлены в таблице 6.

Таблица 6.
Структура таблицы БД RestApiToken

Поле	Тип	Описание
ID	int	Первичный ключ. Уникальный идентификатор записи в таблице.
Token	varchar(50)	Уникальный токен, по которому предоставляется доступ.
Name	varchar(250)	Наименование системы, которой был предоставлен токен.
Description	varchar(1000)	Подробное описание системы или параметров интеграции.
IsDeleted	bit	Флаг, показывающий удалена запись или нет.

Таблица RestApiMethod хранит записи о методах. Запись содержит уникальный ID, название метода (который является его маркером), описание метода, флаг активности метода (удален он или нет). Поля таблицы, их типы и описания представлены в таблице 7.

Таблица RestApiMatrixTokenMethod хранит записи об активных связках токенов и методов. Наличие связки в этой таблице говорит о том, что у указанного токена есть права на доступ к указанному методу. Запись содержит уникальный ID, ID токена из таблицы RestApiToken, ID метода из таблицы RestApiMethod. Поля таблицы, их типы и описания представлены в таблице 8.

Таблица 7.
Структура таблицы БД RestApiMethod

Поле	Тип	Описание
ID	int	Первичный ключ. Уникальный идентификатор записи в таблице.
Name	varchar(250)	Маркер-название метода.
Description	varchar(1000)	Описание метода.
IsDeleted	bit	Флаг, показывающий удалена запись или нет.

Таблица 8.
Структура таблицы БД RestApiMatrixTokenMethod

Поле	Тип	Описание
ID	int	Первичный ключ. Уникальный идентификатор записи в таблице.
TokenID	int	Уникальный идентификатор токена.
MethodID	int	Уникальный идентификатор метода.

В качестве еще одного способа взаимодействия с системой учета, пользователям доступен telegram-бот, который взаимодействует с системой через REST API. Алгоритм взаимодействия пользователя с системой через telegram-бота показан на рисунках 3, 4.

Алгоритм работы:

1. Telegram-бот проверяет, авторизован ли пользователь (вызывается соответствующий метод API для проверки по номеру телефона).
2. Если пользователь не авторизован:
 - 2.1. Telegram-бот отображает пользователю сообщение и кнопку «Авторизация».
 - 2.2. Пользователь нажимает на кнопку «Авторизация».
 - 2.3. Telegram-бот вызывает метод API для проверки УЗ пользователя. Проверяется, есть его УЗ в системе и есть ли у него доступ к работе с telegram-ботом.
 - 2.4. Если пользователь найден и доступ есть:

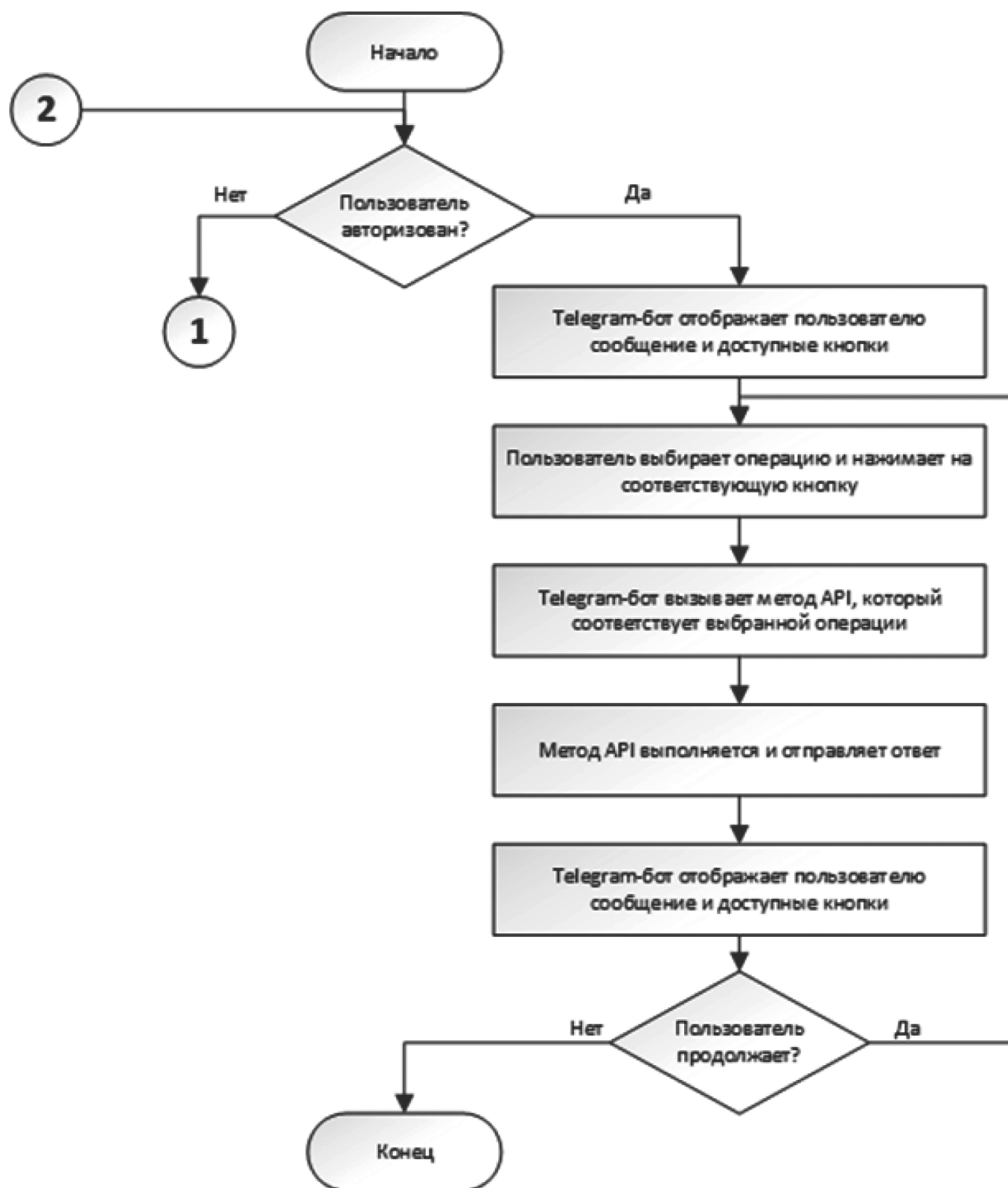


Рис. 3. Алгоритм работы с системой через telegram-бота — часть 1

2.4.1. Метод API возвращает сообщение об ошибке.

2.5. Если пользователь не найден или у него нет доступа:

2.5.1. Метод API фиксирует в БД telegramID пользователя.

2.5.2. Метод API возвращает сообщение об успехе.

2.6. Telegram-бот отображает пользователю полученное сообщение.

3. Если пользователь авторизован:

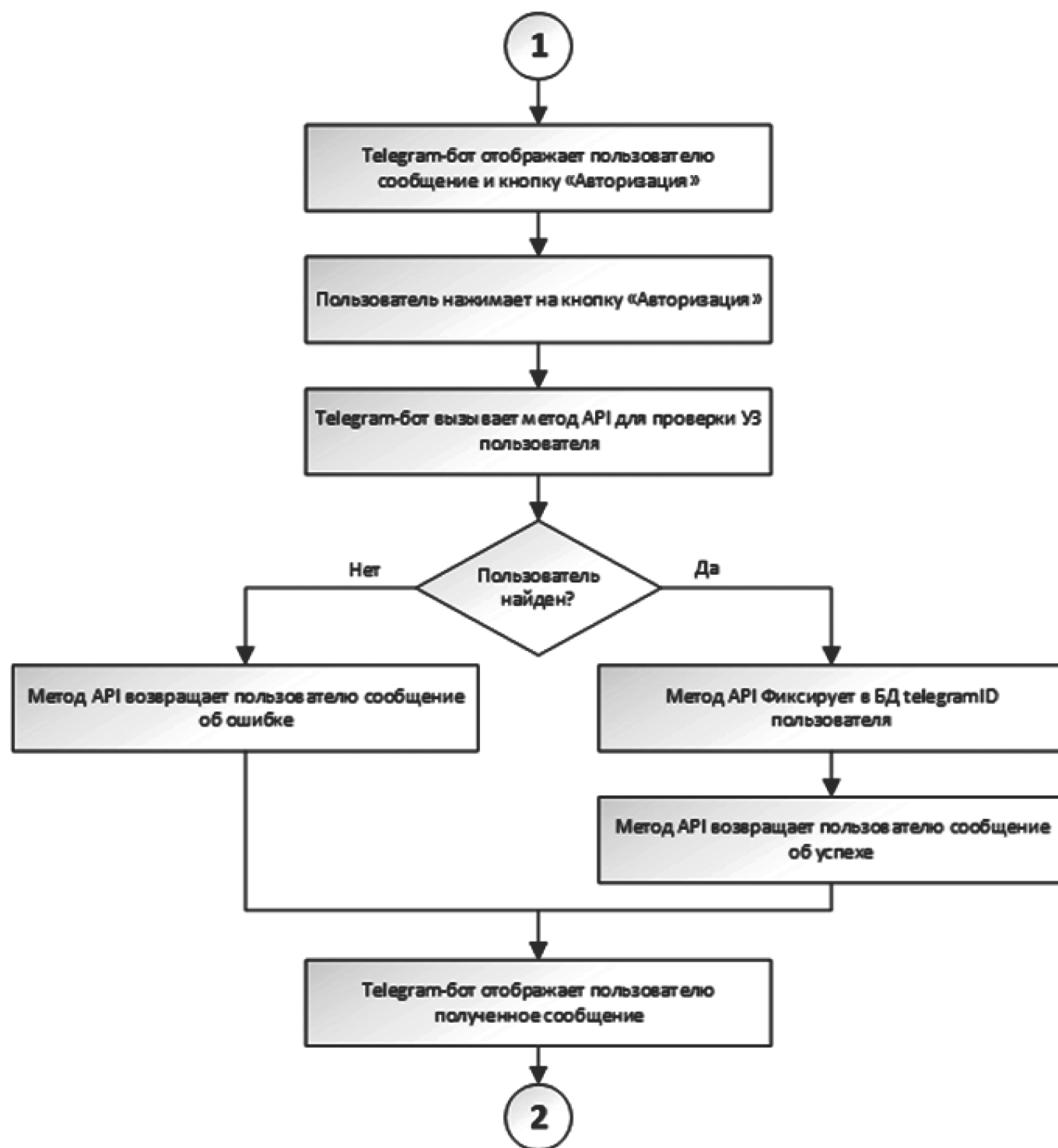


Рис. 4. Алгоритм работы с системой через telegram-бота — часть 2

- 3.1. Telegram-бот отображает пользователю сообщение и доступные кнопки.
- 3.2. Пользователь выбирает операцию и нажимает на соответствующую кнопку.
- 3.3. Telegram-бот вызывает метод API, который соответствует выбранной операции.
- 3.4. Метод API выполняется и отправляет результат в сторону telegram-бота.

- 3.5. Telegram-бот отображает пользователю полученный ответ и доступные кнопки.
4. Если пользователь завершил работу, то он выходит из чата с telegram-ботом. Есть опция сбросить авторизацию, если это требуется.

Результаты

В ходе работы был разработан модуль интеграции с системой. Внедрение разработанного модуля в ПАО «Вымпелком» дало следующие результаты:

- Успешно реализована интеграция с мобильным приложением. Более 3 000 операций ТО в месяц проходят через Kafka и обрабатываются без участия оператора.
- Разработан REST API, к которому подключены 5 внешних систем и 2 внутренних микросервиса.
- Telegram-бот используется более 80 сотрудниками подрядных организаций, выполняющими ТО в полевых условиях.
- Время регистрации отчета о ТО сократилось с 30 минут до менее чем 3 минут.
- Объем ручного ввода данных снизился на 60 %.
- Инциденты, связанные с несвоевременной передачей отчетов, сократились на 40 %.

Обсуждение

Использование распределенной архитектуры позволяет гибко расширять систему: подключать новых потребителей, масштабировать Kafka-топики, добавлять новые методы API. Механизм токенов обеспечивает

безопасный и контролируемый доступ, а их иерархическая настройка прав упрощает администрирование. Telegram-бот обеспечивает доступ к системе даже в условиях ограниченного интернет-соединения, облегчая работу подрядчиков.

Главным ограничением является необходимость строгого соблюдения формата JSON и структуры сообщений, а также дополнительная нагрузка на команду поддержки при появлении новых потребителей.

Заключение

Реализация интеграции внешних источников данных с системой учета отчетности в ПАО «Вымпелком» позволила повысить скорость и качество регистрации данных о техническом обслуживании базовых станций. Разработка Kafka-интеграции с мобильным приложением, REST API с разграничением прав и Telegram-бота обеспечила многоуровневое и отказоустойчивое взаимодействие с различными потребителями. В будущем планируется расширение API, внедрение валидации входящих данных и формирование единой платформы мониторинга состояния всех подключенных систем. Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность и масштабируемость предложенной архитектуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов К.А., Спицина И.А. Решение задачи интеграции информационных систем на примере автоматизированной системы выпуска металлургической продукции // ИВД. 2023. №6 (102). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/reshenie-zadachi-integratsii-informatsionnyh-sistem-na-primere-avtomatizirovannoy-sistemy-vypuska-metallurgicheskoy-produktsii> (дата обращения: 03.04.2025).
2. Аманова Ай., Сахедов Я., Мырталыев Д. Модернизация информационных систем в условиях диджитальной трансформации // Вестник науки. 2024. №9 (78). С. 296–300.
3. Багаудинов К.Ш. Методы интеграции информационных систем на основе универсального анализатора онлайн-информации // ВК. 2019. №3 (35). С. 52–60. DOI: 10.34822/1999-7604-2019-3-52-60
4. Белалова Г.А. Анализ методов интеграции информационных систем // Цифровые модели и решения. 2023. №3. С. 61–68. DOI: 10.29141/2949-477X-2023-2-3-5
5. Иванюгин М.А. Интеграция информационных систем // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2020. №5–1. С. 80–83. DOI: 10.24411/2500-1000-2020-10455
6. Искандеров Ю.М. Интеграция информационных ресурсов для управления транспортными процессами: системные аспекты // SAEC. 2021. №3. С. 254–260. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id21-375
7. Карпов О.Э., Субботин С.А., Здирук К.К., Шишканов Д.В., Дьяченко П.С., Толпыгин А.С., Стрельцов А.Н. Интеграция с внешними информационными системами. Особенности многопрофильного медицинского учреждения // Вестник Национального медико-хирургического Центра им. Н.И. Пирогова. 2018. №4. С. 4–9. DOI: 10.25881/BPNMSC.2018.73.80.001
8. Тёмкина Т.А. Эволюция технологий интеграции информационных систем // T-Comm. 2011. №7. С. 151–155.
9. Тимакин О.А., Радзивон В. Описание интеграционных решений информационной системы и особенности ее использования // Евразийский научный журнал. 2015. №12. С. 298–303.
10. Хан А.О., Никитин К.А. Интегрированные информационные системы: инновационный путь к цифровой трансформации // Вестник науки. 2024. №5 (74). С. 1569–1577.

© Ильин Илья Игоревич (hitsukey@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ МОДУЛЯ МАССОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ДАННЫХ В КОЛЛЕКЦИЯХ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ УЧЕТА ОТЧЕТНОСТИ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ КОМПАНИИ: АРХИТЕКТУРА И ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ

Ильин Илья Игоревич

Аспирант, ФГБОУ ВО «Московский государственный
технологический университет Станкин»
hitsukey@yandex.ru

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A MODULE FOR MASS DATA CHANGES IN COLLECTIONS FOR AUTOMATION OF ACCOUNTING REPORTING IN A TELECOMMUNICATIONS COMPANY: ARCHITECTURE AND FUNCTIONALITY

I. Ilyin

Summary. In the context of digitalization and constantly growing volumes of information, telecommunications companies are faced with the need for prompt and flexible management of accounting reports. In particular, the ability to make mass changes to data in collections — sets of structured information used in reporting and accounting processes — is of great importance. The article discusses the architecture and functionality of the developed module for mass data changes, implemented in the accounting system of a telecommunications company.

Development of a module for mass data changes allows to increase the efficiency of information processing and automate key accounting and reporting processes.

The module provides the ability to simultaneously change multiple records, taking into account specified filters, with preliminary visualization and the ability to cancel changes. Data validation tools, access rights delimitation, and change logging are implemented.

Cases of module application are considered, including adjustment of reporting data, mass assignment of statuses, and recalculation of analytical values.

An assessment of the implementation efficiency was conducted, which showed a significant reduction in processing time and an increase in data accuracy.

Prospects for further development of the module are discussed, including integration with REST API and other corporate systems. The results obtained confirm the relevance and scientific significance of the chosen direction.

Keywords: reporting automation, information systems, data collections, mass changes, telecommunications, data accounting.

Аннотация. В условиях цифровизации и постоянно растущих объемов информации телекоммуникационные компании сталкиваются с необходимостью оперативного и гибкого управления учетной отчетностью. В частности, большое значение приобретает возможность массовых изменений данных в коллекциях — наборах структурированной информации, используемой в отчетных и учетных процессах. В статье рассматривается архитектура и функциональность разработанного модуля массовых изменений данных, внедренного в систему учета отчетности телекоммуникационной компании. Разработка модуля массовых изменений данных позволяет повысить эффективность обработки информации и автоматизировать ключевые учетные и отчетные процессы.

Модуль предоставляет возможности одновременного изменения множества записей с учетом заданных фильтров, с предварительной визуализацией и возможностью отмены изменений. Реализованы средства валидации данных, разграничения прав доступа, ведения журналов изменений.

Рассматриваются кейсы применения модуля, включая корректировку отчетных данных, массовое назначение статусов и пересчет аналитических значений.

Проведена оценка эффективности внедрения, которая показала значительное снижение времени на обработку и повышение точности данных.

Обсуждаются перспективы дальнейшего развития модуля, включая интеграцию с REST API и другими корпоративными системами. Полученные результаты подтверждают актуальность и научную значимость выбранного направления.

Ключевые слова: автоматизация отчетности, информационные системы, коллекции данных, массовые изменения, телекоммуникации, учет данных.

Введение

Современные телекоммуникационные компании оперируют с обширными объемами учетной и отчетной информации, хранимой в виде коллекций. Эти коллекции содержат как структурированные показатели, так и метаданные, связанную с техническим обслуживанием, контролем качества, выполнением работ и т.п. Часто возникает необходимость массово изменить данные — будь то обновление статуса, редактирование даты, замена связанного атрибута. Вручную подобные операции крайне трудоемки и подвержены ошибкам.

Настоящая работа посвящена разработке программного модуля массовых изменений данных в коллекциях и его внедрению в систему учета отчетности ПАО «Вымпелком». Модуль предназначен для упрощения и автоматизации рутинных операций с отчетными данными, обеспечивая при этом надежность, прозрачность и контроль изменений. В статье подробно изложены архитектурные решения, примененные технологии и сценарии использования.

Литературный обзор

Современное развитие телекоммуникационной отрасли требует высокой степени автоматизации процессов обработки и учета данных. Особую актуальность приобретают подходы к проектированию баз данных и разработке модулей массовых изменений информации. В этой связи представленные исследования формируют целостное представление о теоретических и практических аспектах данной проблематики.

Работа Ахатова Р., Анналыева А., Атагарыевой М. и Ахатова Р. [1] акцентирует внимание на структурировании данных, построении систем хранения и интеграции источников. Эти подходы формируют базу для построения устойчивых к изменениям и хорошо масштабируемых БД.

В статье Бозорова Ж.С. [2] рассматриваются аспекты, связанные с эксплуатационной поддержкой систем, включая их информационную составляющую. Автор отмечает необходимость эффективного учета большого количества параметров, что требует комплексного подхода к построению баз данных с возможностью группового редактирования.

В статье Васильевой К.Н. и Хусаиновой Г.Я. [3] проведен сравнительный анализ современных СУБД, таких как MySQL и PostgreSQL. Реляционная модель данных является наиболее распространенной при реализации систем учета, и правильный выбор СУБД определяет эффективность работы модуля массовых изменений.

Статья Денисова В.В. [4] раскрывает методы обработки Big Data, включая предварительную очистку, агрегацию и трансформацию данных. Эти методы применимы при массовых изменениях информации, обеспечивая консистентность и эффективность последующего анализа.

Исследование Доценко В.О. и Шевниной Е.И. [5] фокусируется на специфике телекоммуникационных систем, включая вопросы отказоустойчивости, гибкости и масштабируемости. Эти характеристики критичны для построения модуля массовых изменений данных в крупных компаниях связи.

В работе Ильясова А. и Чарыевой Г. [6] представлены базовые характеристики эффективной БД — надежность, масштабируемость и простота модификации. Эти критерии напрямую соотносятся с задачами проектирования модулей, предназначенных для автоматизации массовых изменений.

В статье Исакова И.С., Жамковой В.С. и Фомичева А.М. [7] подчеркивается значимость автоматизации как основы для эффективного сбора и анализа больших объемов данных. Особое внимание уделяется системам, позволяющим обеспечить достоверность и полноту учетной информации, что напрямую коррелирует с задачами массовых изменений в БД.

Аспект информационной безопасности подробно рассматривается в статье Казаряна К.К. [8]. В условиях массового редактирования данных и доступа множества пользователей к одному хранилищу, безопасность является критическим фактором. Рассматриваются механизмы аутентификации, разграничения прав доступа и защиты от несанкционированных изменений.

Статья Лосевой С.С. и Бардина В.Д. [9] вносит в рассмотрение аспект пользовательской адаптивности систем. В условиях телекоммуникационных компаний, где массовое изменение данных может выполняться разными сотрудниками, интуитивный интерфейс и логика взаимодействия с системой играют важную роль в снижении ошибок и повышении производительности.

В статье Рустамовой Ш.А. [10] описан опыт создания информационной системы, поддерживающей постоянное обновление и хранение пользовательских данных. С точки зрения массовых изменений, в данной работе ценно применение распределенной архитектуры и обеспечение синхронизации данных в реальном времени.

Наконец, работа Саиди Д.Р., Рустамовой Ш.А. и Набиева Д.Б. [11] демонстрирует подход к модульной архитектуре автоматизированных систем учета. Приведенные принципы проектирования и внедрения подобных модулей являются применимыми и в телекоммуникацион-

ной сфере — при адаптации под специфику договорного и отчетного учета.

Материалы и методы

Разработка модуля велась на PHP и JavaScript. В качестве СУБД использовалась MySQL. В архитектуре модуля были реализованы следующие компоненты:

- Интерфейс выбора коллекции и фильтрации записей.
- Отображение выбранных записей в табличной форме.
- Механизм группового выбора полей для изменения.
- Валидация новых значений с учетом типа поля и бизнес-правил.
- Подтверждение и исполнение массовой операции.
- Журналирование изменений с записью старых и новых значений.
- Возможность отката изменений при необходимости.

Для обеспечения безопасности реализована система разграничения прав, при которой доступ к модулю получают только авторизованные пользователи с определенными ролями.

Для модуля массовых изменений значений параметров коллекций разработана схема таблиц БД. Также в статье приводится начальное наполнение справочников для демонстрации работы модуля. Разработанная схема таблиц позволяет достаточно гибко настраивать модуль, расширяя набор коллекций и параметров, доступных для массовых изменений. Схема таблиц и их атрибуты, а также их отношения показаны на рисунке 1.

Таблица MassUpdates — очередь массовых изменений. Атрибуты представлены в таблице 1.

Таблица MassUpdatesChangeParams — изменяемые параметры в массовых изменениях. Атрибуты представлены в таблице 2.

Таблица MassUpdatesParams — справочник «Параметры (Массовые изменения)». Атрибуты представлены в таблице 3.

Таблица MassUpdatesParamTypes — справочник «Типы параметров (Массовые изменения)». Атрибуты представлены в таблице 4.

Таблица MassUpdatesCollections — справочник «Коллекции (Массовые изменения)». Атрибуты представлены в таблице 5.

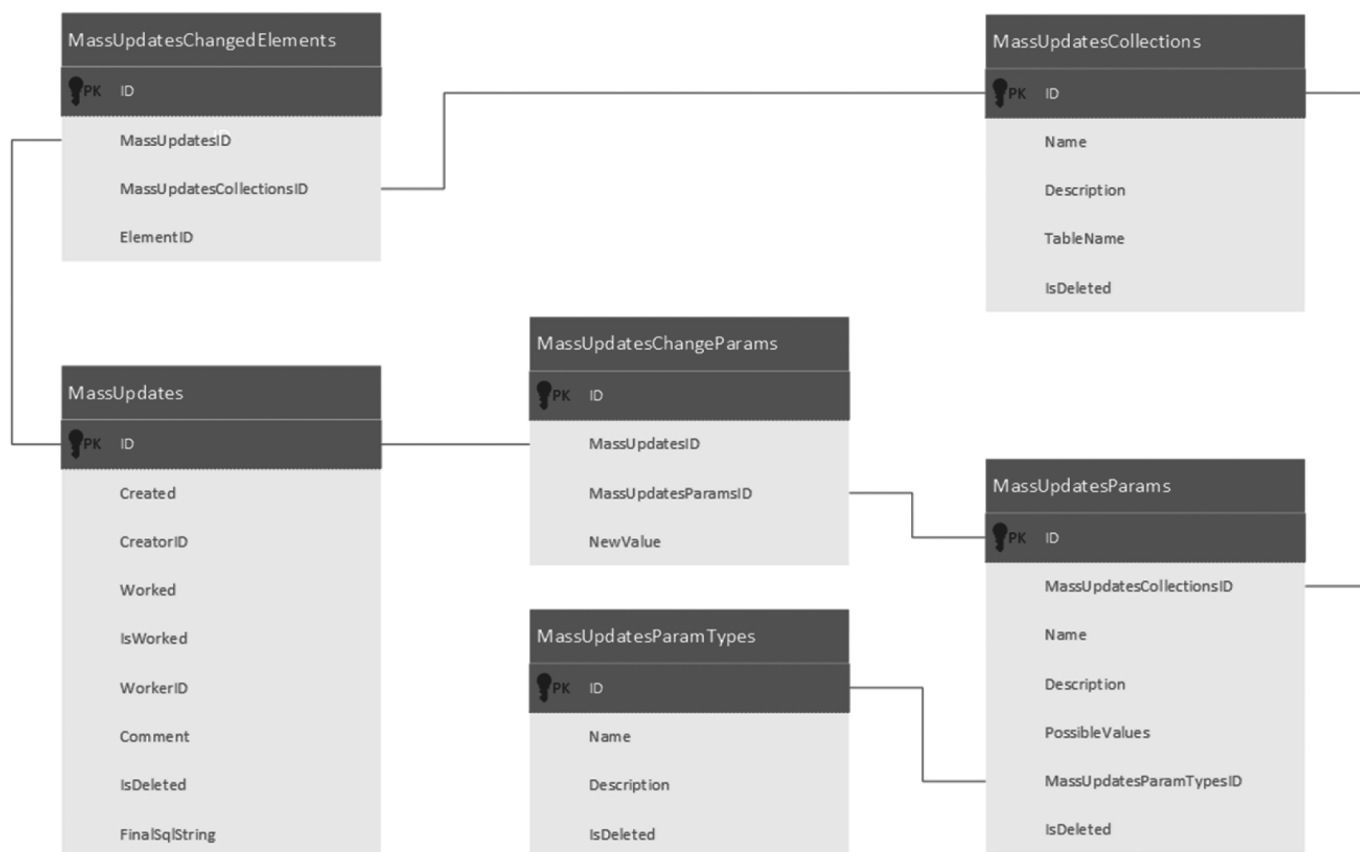


Рис. 1. Схема данных модуля массовых изменений параметров коллекций

Таблица 1.

Атрибуты таблицы MassUpdates

Поле	Тип	Описание
ID	int	Первичный ключ. Уникальный идентификатор записи в таблице.
Created	datetime	Дата и время создания записи в очереди.
CreatorID	int	Идентификатор пользователя, который создал задачу в очереди.
Worked	datetime	Дата и время исполнения задачи из очереди.
IsWorked	bit	Флаг, показывающий факт исполнения задачи.
WorkerID	int	Идентификатор пользователя, который отправил в работу задачу из очереди.
Comment	varchar(max)	Комментарий к записи.
IsDeleted	bit	Флаг, показывающий удалена задача или нет.
FinalSqlString	varchar(max)	Итоговый SQL-запрос, который выполняется задачей из очереди.

Таблица 2.

Атрибуты таблицы MassUpdatesChangeParams

Поле	Тип	Описание
ID	int	Первичный ключ. Уникальный идентификатор записи в таблице.
MassUpdatesID	int	Идентификатор из таблицы MassUpdates. Для определения принадлежности записи к конкретной записи в очереди массовых изменений.
MassUpdatesParamsID	int	Идентификатор из таблицы MassUpdatesParams. Для определения, какой параметр из справочника подвергается изменению.
NewValue	varchar(max)	Новое значение параметра.

Таблица MassUpdatesChangedElements — элементы коллекций, затронутые массовыми изменениями. Атрибуты представлены в таблице 6.

Для наглядности ниже представлен пример наполнения справочников данными, необходимыми для реализации возможности массовых изменений для коллекции филиальных сетей.

Таблица 3.

Атрибуты таблицы MassUpdatesParams

Поле	Тип	Описание
ID	int	Первичный ключ. Уникальный идентификатор записи в таблице.
MassUpdatesCollectionsID	int	Идентификатор из таблицы MassUpdatesCollections. Для определения принадлежности параметра к конкретной коллекции.
Name	varchar(500)	Наименование параметра.
Description	varchar(1000)	Описание параметра.
PossibleValues	varchar(max)	Доступные значения (в виде SQL-запроса). Если NULL — значит, что возможно любое значение (для строк).
MassUpdatesParamTypesID	int	Идентификатор из таблицы MassUpdatesParamTypes. Для определения, какой тип из справочника соответствует параметру.
IsDeleted	bit	Флаг, показывающий удалена запись или нет.

Таблица 4.

Атрибуты таблицы MassUpdatesParamTypes

Поле	Тип	Описание
ID	int	Первичный ключ. Уникальный идентификатор записи в таблице.
Name	varchar(100)	Наименование типа.
Description	varchar(1000)	Описание типа.
IsDeleted	bit	Флаг, показывающий удалена запись или нет.

Примеры наполнения справочников «Коллекции (Массовые изменения)» (таблица MassUpdatesCollections), «Типы параметров (Массовые изменения)» (таблица MassUpdatesParamTypes), «Параметры (Массовые изменения)» (таблица MassUpdatesParams) представлены на рисунках 2, 3, 4 соответственно.

Разработанная структура таблиц БД позволяет создать модуль массовых изменений значений в параметрах коллекций, который будет достаточно гибким и масштабируемым, а также предоставит пользователям возможность быстро применять массовые изменения без помощи разработчиков.

Таблица 5.
Атрибуты таблицы MassUpdatesCollections

Поле	Тип	Описание
ID	int	Первичный ключ. Уникальный идентификатор записи в таблице.
Name	varchar(500)	Наименование коллекции.
Description	varchar(1000)	Описание коллекции.
TableName	varchar(100)	Название таблицы с коллекцией из БД.
IsDeleted	bit	Флаг, показывающий удалена запись или нет.

Таблица 6.
Атрибуты таблицы MassUpdatesChangedElements

Поле	Тип	Описание
ID	int	Первичный ключ. Уникальный идентификатор записи в таблице.
MassUpdatesID	int	Идентификатор из таблицы MassUpdates. Для определения принадлежности записи к конкретной записи в очереди массовых изменений.
MassUpdatesCollectionsID	int	Идентификатор из таблицы MassUpdatesCollections. Для определения принадлежности записи к конкретной коллекции.
ElementID	int	Идентификатор изменяемой записи из таблицы ее коллекции.

Таким образом, часть операций можно переложить с разработчиков на самих пользователей, а суммарное время, затрачиваемое на процедуру массовых изменений параметров, существенно сократится.

Результаты

Модуль был внедрен в отчетную систему телекоммуникационной компании и интегрирован с существующим веб-интерфейсом. Он позволил:

- Сократить время массовой корректировки данных примерно в 8 раз.
- Уменьшить количество ошибок, связанных с человеческим фактором, более чем в 2 раза.
- Повысить прозрачность операций благодаря механизму логирования.
- Обеспечить гибкость за счет фильтрации и возможности предварительного просмотра изменений.

	ID	Name	Description	TableName	IsDeleted
1	1	Филиальные сети	Коллекция филиальных сетей	NetworkBranches	0

Рис. 2. Пример наполнения справочника «Коллекции (Массовые изменения)» (таблица MassUpdatesCollections)

	ID	Name	Description	IsDeleted
1	1	int	Целое число	0
2	2	varchar	Строка	0
3	3	bit	Булево значение	0

Рис. 3. Пример наполнения справочника «Типы параметров (Массовые изменения)» (таблица MassUpdatesParamTypes)

На практике модуль применяется для:

- Массового переноса сроков выполнения ТО.
- Изменения статусов отчетов.
- Назначения ответственных лиц.
- Группового обновления аналитических параметров.

Пользовательский интерфейс был адаптирован под требования сотрудников с минимальной технической подготовкой.

Обсуждение

Разработка данного модуля показала, что создание гибких инструментов взаимодействия с данными позволяет значительно повысить производительность учетных подразделений. Важную роль сыграла реализация предварительной проверки и отображения изменений, что исключило риск потери или искажения данных.

Отдельного внимания заслуживает возможность дальнейшей интеграции с REST API, что откроет доступ к модулю для внешних систем и мобильных интерфейсов. Также планируется расширение функционала: добавление шаблонов изменений, интеграция с модулями отчетности, автоматизация на основе расписания.

Заключение

Модуль массовых изменений данных в коллекциях стал важной частью системы учета отчетности ПАО «Вымпелком». Его внедрение позволило значительно повысить эффективность обработки отчетных массивов, обеспечить гибкость и контроль при работе с данными.

Научная значимость работы заключается в описании архитектурного подхода к реализации таких решений, включая контроль, безопасность, интеграцию и возможность масштабирования. В перспективе развитие модуля будет связано с автоматической генерацией сценариев изменений, интеграцией с системами аналитики и прогнозирования, а также поддержкой взаимодействия с распределенными системами хранения данных.

	ID	MassUpdatesCollectionsID	Name	Description	PossibleValues	MassUpdatesParamTypesID	IsDeleted
1	1	1	NetworkBranchTypeID	Тип филиальной сети	select ID, Name from ip3g.dbo.t_Network_Branch_Type	1	0
2	2	1	Comment	Комментарий	select 1 as ID, ' as Name	2	0
3	3	1	Active	Активна	select 0 as ID, 0 as Name union select 1 as ID, 1 as Name	3	0

Рис. 4. Пример наполнения справочника «Параметры (Массовые изменения)» (таблица MassUpdatesParams)

ЛИТЕРАТУРА

- Ахатов Р., Анналыев А., Атагаррбиева М., Ахатов Р. Стратегии управления данными в телекоммуникационных сетях // Вестник науки. 2024. №9 (78). С. 330–333.
- Бозоров Ж.С. Техническое обслуживание телекоммуникационных оборудования и станций // Экономика и социум. 2023. №1-2 (104). С. 599–602.
- Васильева К.Н., Хусаинова Г.Я. Реляционные базы данных // Colloquium-journal. 2020. №2 (54). С. 22–23.
- Денисов В.В. Применение технологий анализа больших данных в сфере телекоммуникаций // Просвещение и познание. 2021. №1 (1). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-tehnologiy-analiza-bolshih-dannyh-v-sfere-telekommunikatsiy> (дата обращения: 19.03.2025).
- Доценко В.О., Шевнина Е.И. Исследование актуальных требований для разработки систем мониторинга и управления телекоммуникационной сети // Вестник СибГУТИ. 2022. №2 (58). С. 23–32.
- Ильясов А., Чарыева Г. База данных и требования к базе данных // Ceteris paribus. 2022. №12. С. 28–30.
- Исаков И.С., Жамкова В.С., Фомичев А.М. Автоматизация сбора данных о финансово-хозяйственной деятельности предприятий отрасли // Экономика космоса. 2023. №5. С. 42–48. DOI: 10.48612/agat/space_economics/2023.02.05.04
- Казарян К.К. Безопасность базы данных // StudNet. 2022. №1. С. 497–508.
- Лосева С.С., Бардин В.Д. Эргономические базы данных // Теория и практика современной науки. 2022. №6 (84). С. 169–172.
- Рустамова Ш.А. Разработка и внедрение виртуального дневника для дуального образования в технических специальностях: инновации и перспективы // Universum: технические науки. 2024. №12 (129). С. 4–9.
- Саиди Д.Р., Рустамова Ш.А., Набиев Д.Б. Разработка модуля автоматизации учета договоров для образовательных учреждений в контексте дуального образования // Universum: технические науки. 2024. №12 (129). С. 10–15.

© Ильин Илья Игоревич (hitsukey@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПЕРИОДИЧНОСТЬ ГЕНЕРАТОРОВ СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ, ПОСТРОЕННЫХ НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАШИНЕ

PERIODICITY OF RANDOM NUMBER GENERATORS BUILT ON A COMPUTING MACHINE

A. Kasyanov

Summary. In the context of exponential growth in cyber threats, the task of developing and analyzing pseudorandom number generators is becoming increasingly important. As of today, the relevance of the issue concerning finiteness of the period of generated sequences remains, due to the deterministic nature of the algorithms implemented on computing machines. Purpose of the study — to demonstrate the fundamental impossibility of constructing a generator with an infinite period based on a finite automaton, which is a mathematical model of a computing machine. The research is based on formal methods of finite automata theory, including the application of Kleene's theorem to establish equivalence between pseudo-random number generator algorithms and finite automata, and the theorem on the impossibility of recognizing non-periodic sequences, which justifies the finiteness of the period. The analysis performed in the framework of automata theory demonstrates that pseudorandom number generation algorithms can be implemented as finite automata, and are therefore subject to the limitation of the number of internal states and, consequently, the finiteness of the period of the generated sequence. Scientific novelty lies in the explicit application of theoretical results of finite automaton theory to justify the limitation of the period of pseudorandom number generators. The results obtained contribute to the understanding of the fundamental limitations imposed by the computing environment on the properties of generated sequences.

Keywords: algorithm, finite automata, regular expressions, non-periodic infinite sequences, Kleene's theorem, pseudorandom number generators.

Касьянов Александр Владимирович

Аспирант, Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»

им. В.И. Ульянова (Ленина);

Научный сотрудник отдела криптографического
анализа, Специальный Технологический Центр
(ООО «СТЦ»), г. Санкт-Петербург, Россия

kasjanov@inbox.ru

Аннотация. В условиях экспоненциального роста киберугроз, задача разработки и анализа генераторов псевдослучайных чисел приобретает исключительную актуальность. На сегодняшний день сохраняется актуальность вопроса, связанного с конечностью периода генерируемых последовательностей, обусловленный детерминированной природой алгоритмов, реализуемых на вычислительных машинах. Цель исследования — демонстрация принципиальной невозможности построения генератора с бесконечным периодом на основе конечного автомата, являющегося математической моделью вычислительной машины. Основу исследования составили формальные методы теории конечных автоматов, включая применение теоремы Клини для установления эквивалентности между алгоритмами генераторов псевдослучайных чисел и конечными автоматами, и теоремы о невозможности распознавания неперiodических последовательностей, обосновывающей конечность периода. Проведенный анализ в рамках теории автоматов демонстрирует, что алгоритмы генерации псевдослучайных чисел реализуемы в виде конечных автоматов, а значит, подвержены ограничению числа внутренних состояний и, следовательно, конечности периода генерируемой последовательности. Научная новизна заключается в явном применении теоретических результатов теории конечных автоматов для обоснования ограниченности периода генераторов псевдослучайных чисел. Полученные результаты вносят вклад в понимание фундаментальных ограничений, накладываемых вычислительной средой на свойства генерируемых последовательностей.

Ключевые слова: алгоритм, конечные автоматы, регулярные выражения, неперiodические бесконечные последовательности, теорема Клини, генераторы псевдослучайных чисел.

Введение

Сохраняющаяся дискуссия о конечности периода генераторов псевдослучайных чисел (ГПСЧ), реализованных на вычислительных платформах, определяет актуальность настоящего исследования. Несмотря на отдельные заявления о создании ГПСЧ с неограниченным периодом [1, 2, 3], в научной литературе, включая работы [4, 5, 6] и др., утвердилось представление о конечности периода всех ГПСЧ, построенных на детерминированных вычислительных машинах. Данное противоречие подчеркивает необходимость даль-

нейшего углубленного анализа теоретических ограничений, накладываемых архитектурой вычислительных машин на свойства генерируемых последовательностей, а также разработки строгих критериев оценки длины периода и методов ее максимизации в рамках существующих ограничений. Разрешение указанного противоречия имеет принципиальное значение для обеспечения надежности и безопасности криптографических приложений.

Последовательности случайных чисел играют значительную роль в генерации криптографических ключей,

инициализации криптографических алгоритмов, обеспечении анонимности и целостности данных [7]. Однако, несмотря на их широкое применение, получение псевдослучайных последовательностей с характеристиками эквивалентными «истинно» случайным последовательностям остается сложной задачей.

В настоящее время вследствие высокой стоимости и значительных массогабаритных характеристик аппаратных генераторов случайных чисел, генерация энтропии в большинстве случаев осуществляется программно, посредством алгоритмов.

В современной вычислительной математике и информатике понятие алгоритма является фундаментальным. «Алгоритм — описанная на некотором формальном языке точная конечная система правил, определяющая содержание и порядок действий над некоторыми объектами, строгое выполнение которых дает решение поставленной задачи» [8, С.7].

К ключевым характеристикам алгоритма относятся: «формальность, детерминированность, дискретность, массовость, результативность» [8, С.8].

В данной работе будет исследован вопрос возможности построения ГПСЧ с бесконечным периодом, с точки зрения теории автоматов.

Конечные автоматы как абстрактные модели алгоритмических ГПСЧ

Для строгого обоснования ограничений на длину периода алгоритмических ГПСЧ, необходимо рассмотреть их представление в виде формальных моделей. Теория конечных автоматов предоставляет мощный инструмент для абстрактного описания вычислительных процессов. В данном разделе рассматриваются основные понятия теории конечных автоматов, а также доказывается теорема, устанавливающая принципиальную невозможность генерации непериодических последовательностей с помощью конечных автоматов. Этот результат имеет ключевое значение для понимания фундаментальных ограничений на период ГПСЧ, реализованных на вычислительных машинах.

Теорема. [9] Клини (совпадение классов автоматных и регулярных языков). Классы автоматных и регулярных языков совпадают. Т.е. любой регулярный язык является автоматным и любой автоматный язык является регулярным.

Дополнительно, в соответствии с [10] все реальные дискретные устройства, предназначенные для переработки информации, могут иметь только конечное число внутренних состояний (в виду ограниченности памяти

устройств), т.е. их абстрактными моделями являются конечные автоматы.

Следовательно, каждый автоматный язык является регулярным множеством. «Для каждого регулярного выражения R может быть построен конечный автомат (возможно недетерминированный), распознающий выражение, задаваемое R » [9, С.17].

Поскольку конструкции алгоритмов программ могут быть описаны при помощи регулярных выражений, то согласно следствию из теоремы Клини алгоритм любой программы реализуем в виде конечного автомата.

Конечный автомат, как формальная модель в теории алгоритмов, представляет собой модель дискретного устройства с конечным числом состояний, входом и выходом. Входные воздействия и текущее состояние определяют выходной сигнал и следующее состояние. Различают детерминированные (ДКА), недетерминированные (НДА) и вероятностные (ВКА) конечные автоматы, характеризующиеся способом определения следующего состояния.

По теореме (о детерминизации) «для любого конечного автомата может быть построен эквивалентный ему детерминированный конечный автомат» [11, С.33]. Причем, «максимально возможное число состояний детерминированного автомата, полученного в результате детерминизации эквивалентного ему недетерминированного автомата, представленного m частными состояниями, не может быть больше, чем 2^m » [12, С.30] и определится из выражения:

$$M \leq \sum_{k=0}^m C_m^k = 2^m, \quad (1)$$

где C_m^k — число сочетаний из m по k .

Максимальная длина периода псевдослучайной последовательности, генерируемой ГПСЧ, основанном на ДКА с m состояниями, не может превышать m . Следовательно, для ГПСЧ, представимого НДА с m частными событиями, верхняя граница длины периода составляет 2^m , поскольку это максимальное число различных состояний, которое может быть достигнуто при развёртывании НДА в ДКА.

В зависимости от структуры и функций переходов алгоритма [12], период ГПСЧ, на практике, может быть существенно меньше, чем верхняя граница, равная 2^m .

Определение. «Конечным автоматом называется система:

$$A = (S, X, Y, \delta, \lambda), \quad (2)$$

где S — конечное множество состояний автомата; X, Y — конечные входной и выходной алфавиты соответственно, из которых формируются строки, считываемые и выдаваемые автоматом; $\delta : S \times X \rightarrow S$ — функция переходов; $\lambda : S \times X \rightarrow Y$ — функция выходов.

Если, кроме того, в автомате A выделено одно некоторое состояние, называемое начальным s_0 , то полученный автомат называется инициальным» [13, С.295].

В отсутствие указанного начального состояния поведение автомата не детерминировано. Полное детерминированное описание автомата, согласно [13]:

$$A = (S, X, Y, \delta, \lambda, s_0). \quad (3)$$

Классификация конечных автоматов включает автоматы Мура, выход которых зависит лишь от внутреннего состояния, и автоматы Мили, выход которых определяется как внутренним состоянием, так и входным сигналом.

Лемма. «Для каждого конечного автомата Мили может быть построен эквивалентный ему конечный автомат Мура, и наоборот» [14, С.16].

На основании леммы, анализ возможностей автомата сводится к анализу автомата Мура. Представляя автомат Мура как автомат без выходов с классифицированными состояниями, возможно разделение состояний на два класса. Без потери общности автоматы можно переопределить, как автоматы без выходов [13]:

$$A = (S, X, \delta, x_1, F), \quad (4)$$

где $F \subseteq X$ — множество заключительных состояний, A — инициальный автомат без выхода с начальным состоянием x_1 .

Событие (определение из теории грамматик) $E \subseteq S^*$ (S^* — множество слов (конечной длины) в алфавите S , включая пустое слово) представимо в автомате $A = (S, X, \delta, x_1, F)$, если $\delta(x_1, \alpha) \in F$, тогда и только тогда, когда $\alpha \in E$. Т.е. событие E — множество разрешимое в A .

Теорема. Конечные автоматы не способны распознавать непериодические бесконечные последовательности.

Доказательство (от противного). Предположим, непериодическая последовательность α распознаётся автоматом A с n состояниями. Тогда, по принципу Дирихле, при обработке α автомат повторит состояние, создавая цикл. Этот цикл позволяет построить периодическую последовательность α , распознаваемую в A , что

противоречит не периодичности α и распознаванию α автоматом A .

Полученное противоречие опровергает предположение о возможности распознавания непериодической последовательности конечным автоматом.

Следствие. Любой алгоритмический генератор случайных чисел, построенный на вычислительной машине, генерирует периодическую последовательность.

Анализ конечных автоматов с конечной памятью и их влияния на периодичность генераторов псевдослучайных чисел

В целях обеспечения более глубокого понимания вопроса исследовании в настоящем разделе представлены определения «систем с конечной памятью» [15, С.211], их представление конечными автоматами и теорема об оценке периодов генерируемых последовательностей.

Определение. «Системой с конечной памятью называется система, представляемая конечным автоматом, в котором выходная реакция в любой дискретный момент времени зависит только от конечного ненулевого числа прошлых входных воздействий и от конечного числа прошлых выходных реакций.

Значит система с конечной памятью представима конечным автоматом, соотношение вход-выход которого может быть записана в форме» [15, С.211-212]:

$$y_v = g(x_{v-i_1}, x_{v-i_2}, \dots, x_{v-i_u}, y_{v-j_1}, y_{v-j_2}, \dots, y_{v-j_p}), \quad (5)$$

где y_v — выходной символ

Определение. «Конечный автомат, представляющий систему с конечной памятью, называется автоматом с конечной памятью» [15]. Таким образом, автомат с конечной памятью A , является автоматом, в котором

$$y_v = f(x_v, x_{v-1}, \dots, x_{v-\mu_1}, y_v, y_{v-1}, \dots, y_{v-\mu_2}), \quad (6)$$

где числа μ_1, μ_2 — называются соответственно x -памятью и z -памятью автомата A , а целое число $\mu = \max(\mu_1, \mu_2)$ называется максимальной памятью A .

Определение. «Линейный двоичный автомат — автомат с конечной памятью, входным и выходным алфавитом $\{0, 1\}$ и выход в любой заданный момент времени равен сумме по модулю 2 (\oplus) значений выбранных входных символов в прошедшие моменты времени и выходных символов в прошедшие моменты времени» [15, С.227].

$$y_v = x_{v-i_1} \oplus x_{v-i_2} \oplus \dots \oplus x_{v-i_u} \oplus y_{v-j_1} \oplus y_{v-j_2} \oplus \dots \oplus y_{v-j_p}, \quad (7)$$

где $0 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_u$ и $1 \leq j_1 < j_2 < \dots < j_p$.

Теорема. «Пусть A — линейный двоичный автомат с памятью μ и μ -памятью μ . Тогда свободная выходная последовательность станет периодической не более чем через $2^{\mu'} + \mu - 1$ символов и ее период» [15, С. 233]:

$$\rho \leq 2^{\mu'} - 1. \quad (8)$$

Следовательно, любая последовательность на выходе n -разрядного регистра сдвига с обратной связью всегда периодична, причем ее период:

$$\rho \leq 2^n - 1. \quad (9)$$

Обсуждение

Вопрос о соотношении конечной природы вычислительных ресурсов и потенциальной бесконечности математических объектов, таких как число π или период ГПСЧ вроде Вихря Мерсенна (алгоритм, разработанный в 1997 году японскими учёными Макото Мацумото и Такудзи Нисимура) [16], затрагивает проблемы теории вычислений и прикладной реализации алгоритмов [17]. Алгоритм, способный вычислять число π или e с произвольной точностью, на первый взгляд, вступает в противоречие с концепцией конечного автомата или вычислительной машины с ограниченными ресурсами. Однако, кажущееся противоречие снимается при рассмотрении реализации бесконечных процессов в конечных системах посредством аппроксимации и ограничения точности вычислений [18].

Трансцендентность числа π обуславливает бесконечное непериодическое десятичное представление, что предполагает итеративный характер алгоритмов его получения. Несмотря на потенциальную бесконечность процесса вычисления, практическая реализация предполагает остановку после достижения целевой точности, необходимой для решения стоящей задачи или ограничениями, накладываемыми вычислительными ресурсами. Как было показано выше, алгоритм, представляя собой конечный набор инструкций и может быть реализован на конечной вычислительной машине. Бесконечность проявляется в потенциально неограниченном числе итераций, а не в структуре самого алгоритма. Поскольку потребность в абсолютной точности встречается редко, алгоритмы вычисления π включают критерий остановки, базирующийся на достижении заданной степени точности. Следовательно, вычисление числа π , несмотря на его теоретическую бесконечность, сводится к конечной аппроксимации, достаточной для конкретного приложения.

Вихрь Мерсенна — широко распространенный ГПСЧ, характеризующийся большим периодом ($2^{19937} - 1$). Несмотря на значительную величину периода, он является конечным, что подразумевает неизбежное повторение последовательности при достаточно продолжительной генерации. В отличие от истинной случайности, не демонстрирующей детерминированных закономерностей, псевдослучайность представляет собой детерминированный процесс, моделирующий свойства случайности. Следовательно, период любого ГПСЧ конечен.

Необходимо отметить, что даже при периоде ГПСЧ, превосходящем оценочное число атомов во Вселенной, такой генератор не может рассматриваться как идеально случайный. Так как все ГПСЧ демонстрируют статистические отклонения и закономерности, выявляемые специализированными статистическими тестами, например «Стопка книг». Вихрь Мерсенна не предназначен для получения криптографически стойких случайных последовательностей чисел.

Выбор ГПСЧ должен основываться на строгом соответствии требованиям конкретной задачи, подкреплённом детальным анализом его статистических характеристик. Критически важным параметром, определяющим степень непредсказуемости и пригодности ГПСЧ для использования в криптографических приложениях, является оценка энтропии генерируемой последовательности. Низкая энтропия может свидетельствовать о скрытых корреляциях, компрометирующих надёжность ГПСЧ.

Заключение

В настоящей работе исследованы ограничения, накладываемые теорией конечных автоматов на алгоритмические ГПСЧ. Проведен строгий теоретический анализ, основанный на применении теоремы Клини и теоремы о невозможности распознавания непериодических последовательностей конечными автоматами для строгого обоснования принципиальной ограниченности периода ГПСЧ, который демонстрирует, что детерминированная природа алгоритмов, реализуемых на вычислительных машинах, формализуемых в виде конечных автоматов, неизбежно приводит к конечности периода генерируемых псевдослучайных последовательностей.

Осознание принципиальной ограниченности периода ГПСЧ критически важно при выборе подходящего ГПСЧ для криптографических приложений (генерация ключей, потоковое шифрование и др.). Необходимо выбирать ГПСЧ с максимально возможным периодом (близким к теоретической границе), чтобы избежать риска повторения ключевой последовательности и компрометации системы шифрования.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке гибридных генераторов, сочетающих несколько ГПСЧ, для увеличения общей длины периода и повышения криптографической стойкости. Понимание ограничений каждого отдельного ГПСЧ помогает строить более надежные и эффективные алгоритмы, способные приближаться к теоретической границе по длине периода при сохранении высокой производительности

и криптографической стойкости. Также результаты могут быть полезны для анализа безопасности и обоснования рекомендаций по выбору существующих ГПСЧ (например, используемых в операционных системах, криптографических библиотеках) для различных приложений с учетом требований к безопасности и производительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kalyanov, K. Random number generator based on the standard mapping / K. Kalyanov // Colloquium-Journal. — 2019. — No. 12-2(36). — pp. 67–68. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38317591> (дата обращения: 06.06.2025).
2. Koranne, Advay. Non-Periodic Pseudo-Random Number Generator Using Sinai Billiards. Washington, DC: Society for Science — 2019. URL: <https://abstracts.societyforscience.org/Home/FullAbstract?ProjectId=18805>
3. Кренделев, С.Ф. Генераторы псевдослучайных чисел, не имеющие периода / С.Ф. Кренделев, А.Ю. Кузьменок // Математические заметки СВФУ. — 2014. — Т. 21, № 4. — С. 31–38. — EDN UISITV. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24160562_27528359.pdf (дата обращения: 06.06.2025).
4. Мирзоян, С.А. Критерии качества и распространенные ошибки разработки генераторов псевдослучайных чисел / С.А. Мирзоян // Вестник современных цифровых технологий. — 2024. — № 21. — С. 44–48. — EDN LMNBHD. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=78472480> (дата обращения: 06.06.2025).
5. Нечаев, К.А. Исследование способов формирования псевдослучайных чисел с большим периодом / К.А. Нечаев, М.А. Орлов, Н.А. Иванов // Наука и бизнес: пути развития. — 2022. — № 1(127). — С. 19–27. — EDN TPCUPF. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48219985>, (дата обращения: 06.06.2025).
6. Вопросы построения программных систем оценки качества стохастических алгоритмов / А.О. Прокофьев, И.В. Чугунков, Е.А. Матрюхина, Е.А. Гриднева // Современные информационные технологии и ИТ-образование. — 2016. — Т. 12, № 3-1. — С. 169–178. — EDN XBWGUR. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27411989>, (дата обращения: 06.06.2025).
7. Grishentsev A.Yu., Arustamov S.A., Korobeynikov A.G., Kozin O.V. Orthogonal noise-like signal symbols for broadband channel protection. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 280–291 (in Russian). DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-280-291, (дата обращения: 06.06.2025).
8. Бочарова, Т.А. Основы алгоритмизации: учебное пособие / Т.А. Бочарова, Н.О. Бегункова; М-во образования и науки Российской Федерации, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «Тихоокеанский гос. ун-т». — Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2011. — 63 с.: ил.; 21 см.; ISBN 978-5-7389-0966-5. — Текст: непосредственный.
9. Мاستихина А.А. Формальные языки и автоматы [Электрон. ресурс]: метод. указ. к выполнению домашнего задания по дискретной математике / Мастихина А.А.; ред. Исмагилов Р. С. // МГТУ им. Н.Э. Баумана. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. — 23 с. URL: http://hoster.bmstu.ru/~fn1/wp-content/uploads/2011/08/uchebno-metod/Mastihina_Form_yaz_Avt.pdf. (дата обращения: 06.06.2025).
10. Энциклопедия кибернетики: [в 2 т.] / Акад. наук Укр. ССР; редкол.: В.М. Глушков (отв. ред.) [и др.]. — Киев: Главная редакция Украинской Советской Энциклопедии, 1974. — Загл. обл.: ЭК. — Текст: непосредственный. Т. 1: Абс-Мир. — 1974. — 608, [1] с.: ил., табл., [5] л. цв. ил.; 24 см. — (впер.): Б.ц.
11. Касьянов, В.Н. Лекции по теории формальных языков, автоматов и сложности вычислений: [учебное пособие для студентов-математиков и информатиков] / В.Н. Касьянов; Гос. ком. Рос. Федерации по высш. образованию, Новосиб. гос. ун-т Новосибирск: Редакционно-издательский отдел НГУ, 1995, 112 с.: ил. — Текст: непосредственный.
12. Вашкевич, Н.П. Недетерминированные автоматы и их использование для реализации систем параллельной обработки информации: моногр. / Н.П. Вашкевич, Р.А. Бикташев. — Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. — 394 с. ISBN 978-5-906831-93-4. — Текст: непосредственный.
13. Кузнецов, О.П. Дискретная математика для инженера / О.П. Кузнецов, Г.М. Адельсон-Вельский — [2-е изд., перераб. и доп.]. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 479, [1] с. ил.; 22. — ISBN 5-283-01563-7. — Текст: непосредственный.
14. Гуренко, В.В. Введение в теорию автоматов [Электронный ресурс]: электронное учебное издание: учебное пособие по дисциплинам «Теория автоматов», «Прикладная теория цифровых автоматов» / В.В. Гуренко; Московский гос. технический ун-т им. Н.Э. Баумана, Фак. «Информатика и системы управления», Каф. «Компьютерные системы и сети». — Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. — URL: https://e-learning.bmstu.ru/ru6/pluginfile.php/2978/mod_data/content/1282/bmstu_IU-6_automates_theory.pdf, (дата обращения: 06.06.2025).
15. Гилл, Артур. Введение в теорию конечных автоматов / Пер. с англ. А.Т. Дауровой [и др.]; Под ред. П.П. Пархоменко. — Москва: Наука, 1966. — 272 с.: черт.; 21 см. — (Теоретические основы технической кибернетики). — Текст: непосредственный.
16. Makoto Matsumoto, Takuji Nishimura. 1998. Mersenne twister: a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator. ACM Trans. Model. Comput. Simul. 8, 1 (Jan. 1998), 3–30. <https://doi.org/10.1145/272991.272995>
17. Поляков, В.И. Основы теории алгоритмов: учебное пособие / В.И. Поляков, В.И. Скорубский. — Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2012. — 51 с. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/43564> (дата обращения: 07.06.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
18. Кнут, Д.Э. Искусство программирования, т. 2. Получисленные алгоритмы, 3-е изд.: Пер. с англ. — СПб.: ООО «Диалектика», 2020. — 832 с.: ил. — Парал. тит. англ. — ISBN 978-5-907144-15-6. — Текст: непосредственный.

© Касьянов Александр Владимирович (kasjanov@inbox.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭКОТУРИЗМА В РОССИИ: ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ СЕРВИСОВ ДЛЯ ТУРИСТОВ

DIGITAL TRANSFORMATION OF ECOTOURISM IN RUSSIA: DESIGNING DIGITAL SERVICES FOR TOURISTS

**M. Logachev
Kh. Kuchmezov**

Summary. Ecotourism, being a special form of tourism, is related to the goals of sustainable development, ensuring the development of territories taking into account the ecological balance, preservation of cultural heritage and economic development. The article studies the current state of ecotourism in Russia and concludes that it is necessary to digitally transform the processes of its organization and management. The integrated use of system analysis methods allowed to establish key objects, processes and their characteristics to create functional requirements for the software product. The main categories of users, their level of access to resources and functional capabilities, and the level of interaction of users of one category with each other and with other categories were determined. The use of object-oriented design method allowed us to develop a model of interaction of user categories with the functionality of the designed software product.

Keywords: specially protected natural area, process management, sustainable development, digitalization, ecology.

Логачёв Максим Сергеевич

Кандидат технических наук,

Московский политехнический университет

logachevmaxim@gmail.com

Кучмезов Хамзат Хакимович

Кандидат экономических наук, Финансовый

университет при Правительстве РФ, Москва

kkkuchmezov@fa.ru

Аннотация. Экотуризм, являясь особой формой туризма, связан с целями устойчивого развития, обеспечивая развитие территорий с учетом экологического баланса, сохранения культурного наследия и экономического развития. В статье проводится исследование текущего состояния экотуризма в России и делается вывод о необходимости цифровой трансформации процессов его организации и управления. Комплексное использование методов системного анализа позволило установить ключевые объекты, процессы и их характеристики для создания функциональных требований к программному продукту. Установлены основные категории пользователей, их уровень доступа к ресурсам и функциональным возможностям, а также определен уровень взаимодействия пользователей одной категории между собой и другими категориями. Использование объектно-ориентированного метода проектирования позволило разработать модель взаимодействия категорий пользователей с функциональными возможностями проектируемого программного продукта.

Ключевые слова: особо охраняемая природная территория, управление процессами, устойчивое развитие, цифровизация, экология.

Введение

Современное состояние мировой туристской отрасли характеризуется тенденцией выбора относительно нетронутых хозяйственной деятельностью мест для отдыха. Профильные специалисты в своих работах отмечают, что отрасль становится более «зеленой», так как туристы все больше внимания уделяют вопросам экологии: при передвижении по маршруту или размещении выбираются те, которые оказывают минимальное негативное воздействие на окружающую среду [1]. Несмотря на это, любой туризм является формой экономической деятельности, для которой характерно дефектное воздействие на природную среду, т.е. любые его механизмы и принципы направлены на обеспечение жизнедеятельности человека путем потребления множества разных ресурсов [2]. Концепция же экотуризма предполагает экологически осознанное отношение к природным объектам.

В настоящее время отсутствует единое определение понятия «экотуризм» [3]. В соответствующих работах

можно встретить в разной степени тождественные понятия, относящиеся к экотуризму и объединяющиеся по разным принципам: социально-культурного сохранения (этнографический туризм), сохранения природы (мягкий, зеленый туризм), цели (ноосферный, природный туризм), экономической эффективности (экотехнологический, устойчивый туризм), принципах сохранения природы (био-, ответственный туризм), принципах управления (сбалансированный туризм) и т.д. Выводы авторов работ, связанных с определением экотуризма, сводятся к утверждениям, что (1) ключевым его отличием от других форм массового туризма является доминирование природной среды [2]; (2) целью является познание дикой природы [1] и (3) выражается в устойчивом развитии [3, 4]. В российском законодательстве экотуризм относится к форме экологического просвещения, т.е. фокус устанавливается на образовании, познании и изучении культурных и исторических особенностях местности. Однако, ведутся работы по совершенствованию законодательных норм, определяя главными факторами экотуризма, природу и окружающую среду и сопутствующей им экономической и познавательной деятельности [5].

Совершенствование отечественной законодательной базы в сфере экотуризма объясняется ростом интереса и развития внутреннего туризма. Площадь страны и ее территориальное положение подразумевает обширное природное разнообразие, позволяя составить конкуренцию странам, являющимися традиционными лидерами в сфере экологического туризма (страны Африки, Азии и Латинской Америки), так как их основным ландшафтом является нетронутая дикая природа. Популярность экомаршрутов стран Северной Америки, Европы и Австралии обеспечивается в основном наличием множества национальных парков [6]. Во многих странах созданы и активно разрабатываются национальные программы по продвижению экотуризма, так как получаемый доход составляет значительную долю в ВВП страны [1].

Одним из факторов, определяющим развитие отечественного экотуризма, является использование цифровых технологий. С их помощью создаются инструменты, формирующие тенденции устойчивого развития регионов. В работах отмечается, что цифровая трансформация процессов туристской отрасли обеспечивает мониторинг и управление ресурсами, повышает качество обслуживания, позволяет эффективно управлять процессами, принимать обоснованные решения по управлению территориями, поддерживая устойчивость экосистем и т.д. [4, 7].

Таким образом, целью работы является создание цифрового продукта, обеспечивающего поддержку принятия решений в сфере экотуризма для туриста. Для этого необходимо выполнить следующие задачи: определить ключевые объекты и процессы предметной области; установить между ними отношения, влияющие на изменение состояний; определить ключевых пользователей и соответствующие им функциональные возможности программного продукта.

Научная новизна исследования заключается в создании алгоритмов, обеспечивающих адаптивное управление процессами экотуризма на основе реальных данных (спроса на конкретные услуги, загруженности инфраструктурных объектов, погодных условий и т.д.) и прогнозов (активности туристов от внешних факторов).

Теоретическая значимость исследования заключается в создании междисциплинарного подхода в изучении интегрированных разнородных данных и знаний разных областей (экологии, экономики, социологии и информационных систем и технологий). Полученные таким образом модели и методы могут быть использованы в исследованиях, связанных с устойчивым развитием, и проектах по созданию программных продуктов, обеспечивающих прогнозирование изменения состояний экосистем от антропогенного на нее воздействия.

Практическая значимость исследования заключается в получении инструмента, обеспечивающего единые подходы к организации, обеспечению и управлению процессами экотуризма для различных участников отрасли (государственными органами, частными компаниями, местными сообществами и физическими лицами). Таким образом, создается единая и прозрачная система, формирующая в культуру поведения во время путешествий и условия для оказания качественных туристических услуг.

Объекты и методы

Объектом исследования является экотуризм.

Предметом исследования является поддержка в принятии решений туристом при организации прохождения экомаршрутов.

Для обеспечения точности и эффективности в принятии решений требуется использование специализированных цифровых средств. Цифровая трансформация обеспечивает интеграцию цифровых технологий в процессы управления, работу с большими данными и помогает адаптироваться к изменениям потребностей клиентов. Создание средств, обеспечивающих цифровую трансформацию процессов, представляет собой систематический подход, включающий в себя ряд событий и действий по преобразованию идей в определенный полноценный программный продукт. Этапы и технологии, необходимые для их реализации, строго определены в соответствии с выбранной моделью жизненного цикла программного продукта. Существует множество концепций, определяющих состав работ в таких моделях, но общим является необходимость в проведении тщательного анализа предмета исследования и создания на его основе проектного решения для использования во время выполнения этапа разработки программного продукта. Основным методом, использующимся в работе и позволяющим выполнить указанные действия, был метод системного анализа.

Метод системного анализа является общенаучным методом, с помощью которого любой объект возможно представить в виде комплекса взаимосвязанных элементов [8]. С его помощью любую сложную систему возможно представить в виде совокупности элементов и связей, исследование взаимодействия которых позволяет получить новые свойства. Методология системного анализа объединяет в себе математические, статистические и логические подходы, обеспечивающие всестороннее исследование предметной области.

Основным принципом системного анализа является последовательная дедукция. Она предполагает постепенную декомпозицию сложной системы до состояния,

в котором полученные компоненты и связи между ними соответствуют целям исследования. Объект исследования является сложной системой, включающей в себя множество разнородных элементов. Для реализации системного анализа комплексно применялись методы структурного анализа, пошагового уточнения, классификации, синтеза и статистического анализа. Полученные результаты позволили установить ключевые процессы экотуризма и соответствующие им параметры, а также условия, влияющие на их изменения состояний.

Использование графического и объектно-ориентированных методов позволило разработать:

1. Модели, показывающие характер изменения величин с течением времени. Для создания таких моделей были проанализированы данные, опубликованные Федеральной службой государственной статистики России за период с 2001 по 2024 гг. и связанные с экотуризмом. Полученные модели позволили структурировать данные и визуализировать зависимости для использования их в разработке моделей, осуществляющих прогнозирование изменений и получения наиболее точных рекомендаций с помощью программных средств.
2. Модель процесса использования проектируемого программного продукта в зависимости от роли пользователя. Метод структурного анализа позволил установить ключевых пользователей и их характеристики, которые могут применять в экотуризме цифровые технологии. На основании этого разработана диаграмма прецедентов, являющейся моделью, показывающей реакцию системы на внешние воздействия. Нотация диаграммы прецедентов является универсальной, так как в ней используется условно-графический язык, с помощью которого показывается взаимодействие процессов в системе между собой, а также внешними объектами. Такой подход позволил в работе осуществить документирование функци-

ональных требований к цифровому продукту для улучшения управления этапами проектирования и разработки.

Результат

Анализ состояния экотуризма в России

Экотуризм в России является развивающимся направлением и составляет около 3 % от всей туристической индустрии [2]. Его государственное регулирование не выделено в отдельную сферу и все стратегии развития рассматриваются в пределах общего развития туристической сферы. Анализ статистических данных показывает, что к экотуризму относят посещение особо охраняемых природных территорий. На рис. 1 показаны изменения в количестве действующих экомаршрутов в национальных парках и государственных природных заповедниках.

Посещение таких мест строго регламентировано и подразумевает оформление специального разрешения. Вид разрешения и продолжительность пребывания туриста на территории природного объекта определяется в зависимости от зонирования его территории. Например, для посещения Тункинского национального парка существуют следующие виды разрешений:

1. Туристическое разрешение, дающее право на посещение всей территории национального парка (взимается плата с лиц, старше 18 лет).
2. Льготное разрешение, предусматривающее бесплатное посещение всей территории национального парка для определенных категорий людей.
3. Разрешение для посещения населенных пунктов, находящихся в границах национального парка (бесплатно для всех посетителей). На территории парка находится около 35 населенных пунктов [10].
4. Разрешение на целевое посещение национального парка: проведение научной, волонтерской деятельности или другой цели.

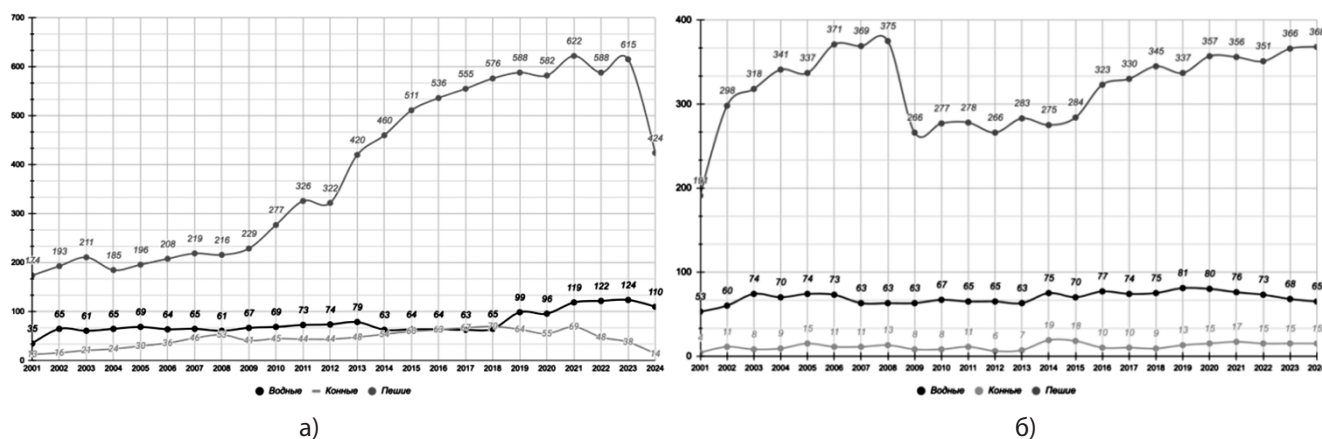


Рис. 1. Экотропы (а) в национальных парках России, (б) в государственных природных заповедниках России (ед.; составлено по данным Федеральной службы государственной статистики [9])

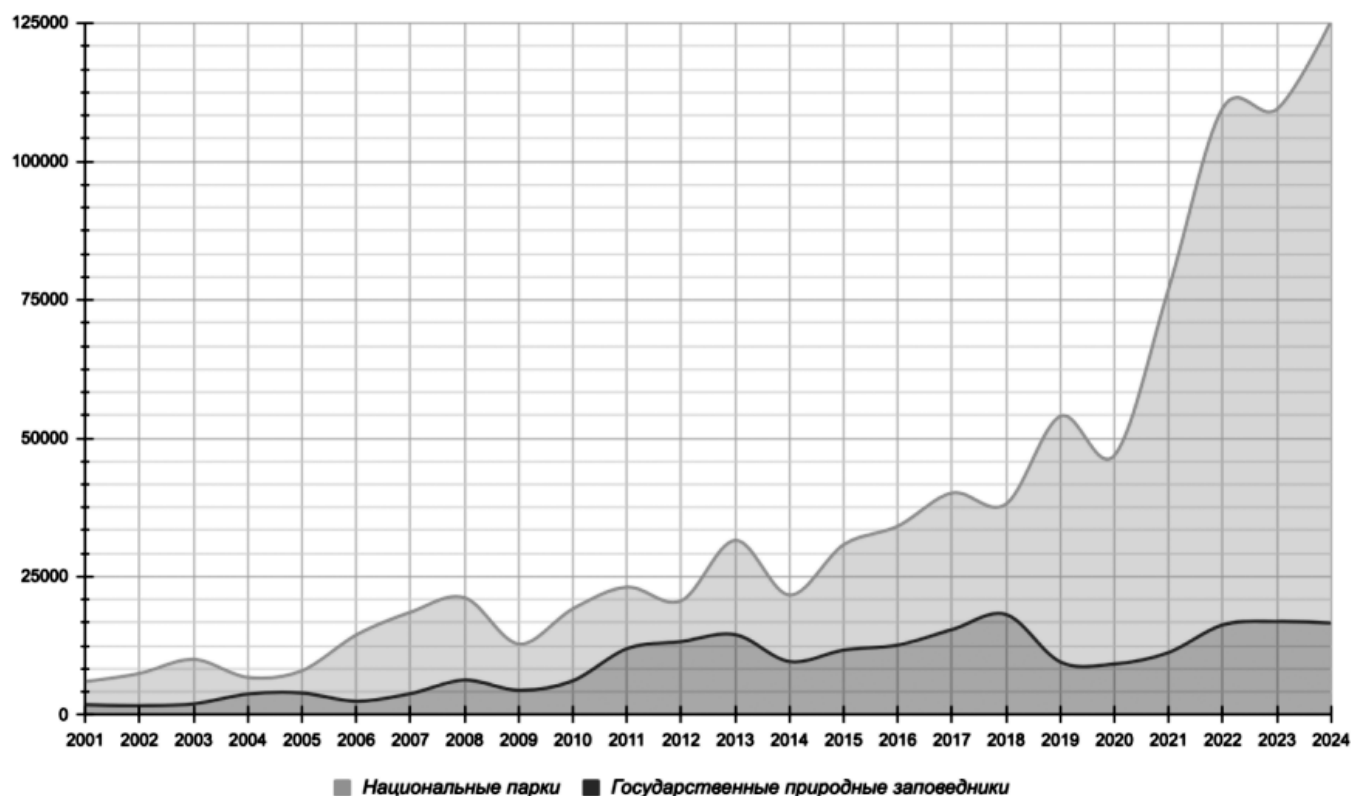


Рис. 2. Количество посетителей экотроп России (сотен чел.; составлено по данным Федеральной службы государственной статистики [9])

Экотуризм в России медленно развивался и не привлекал внутренних туристов. Это было связано с отсутствием инфраструктуры, больших расстояний и как следствие высоких цен. В 2020 г. произошел спад посещений из-за ограничений, связанных с пандемией коронавирусной инфекции. Отмена ограничений, популяризация и финансирование внутреннего туризма, ограничения, связанные с антироссийскими санкциями, стали катализатором для привлечения туристов и, как следствие, с 2021 г. наблюдается рост посещений в особо охраняемых природных зонах (рис. 2).

В опубликованных статистических данных отмечается, что прирост общего числа посетителей в 2024 г. составил 8 % по сравнению с 2023 г. (+4 %) [11]. Самыми посещаемыми стали Кисловодский и Сочинский нацпарки, Лосиный остров в Москве и Московской области и Куршская коса (Калининградская область) [12]. На рост туристического потока повлияло привлечение туристов из дружественных стран, в том числе за счет упрощения визового режима (с Китаем, Турцией, Индией, Вьетнамом, Таиландом, Египтом, Республикой Корея, Саудовской Аравией, ОАЭ и Малайзией) [11].

Роли пользователей и характеристика доступных им функциональных возможностей

Цифровой инструмент, обеспечивающий управление процессами экотуризма, предоставляет свои функци-

ональные возможности двум группам пользователей: управляющие (уровень 1–3) и получающие доступ к ресурсам системы (уровень 4–6). Выделяются следующие категории пользователей:

1. Главный администратор определяет алгоритмы функционирования программного продукта.
2. Менеджер осуществляет управление группой администраторов, работающих в определенном сегменте.
3. Администратор осуществляет управление ресурсами в сегменте (туристические маршруты, продажа экипировки, служба поддержки).
4. Турист — пользователь с категорией «Посетитель», находящийся за пределами основного своего места пребывания.
5. Посетитель имеет учетную запись и установивший место своего постоянного пребывания или открывший доступ к своей геолокации.
6. Гость — незарегистрированный или непрошедший авторизацию пользователь.

На рис. 3 представлена связь основных функциональных возможностей в цифровой системе в зависимости от категории пользователя.

Уровень каждой категории пользователей определяет доступность функций и ресурсов программного продукта, а также возможность управления другими

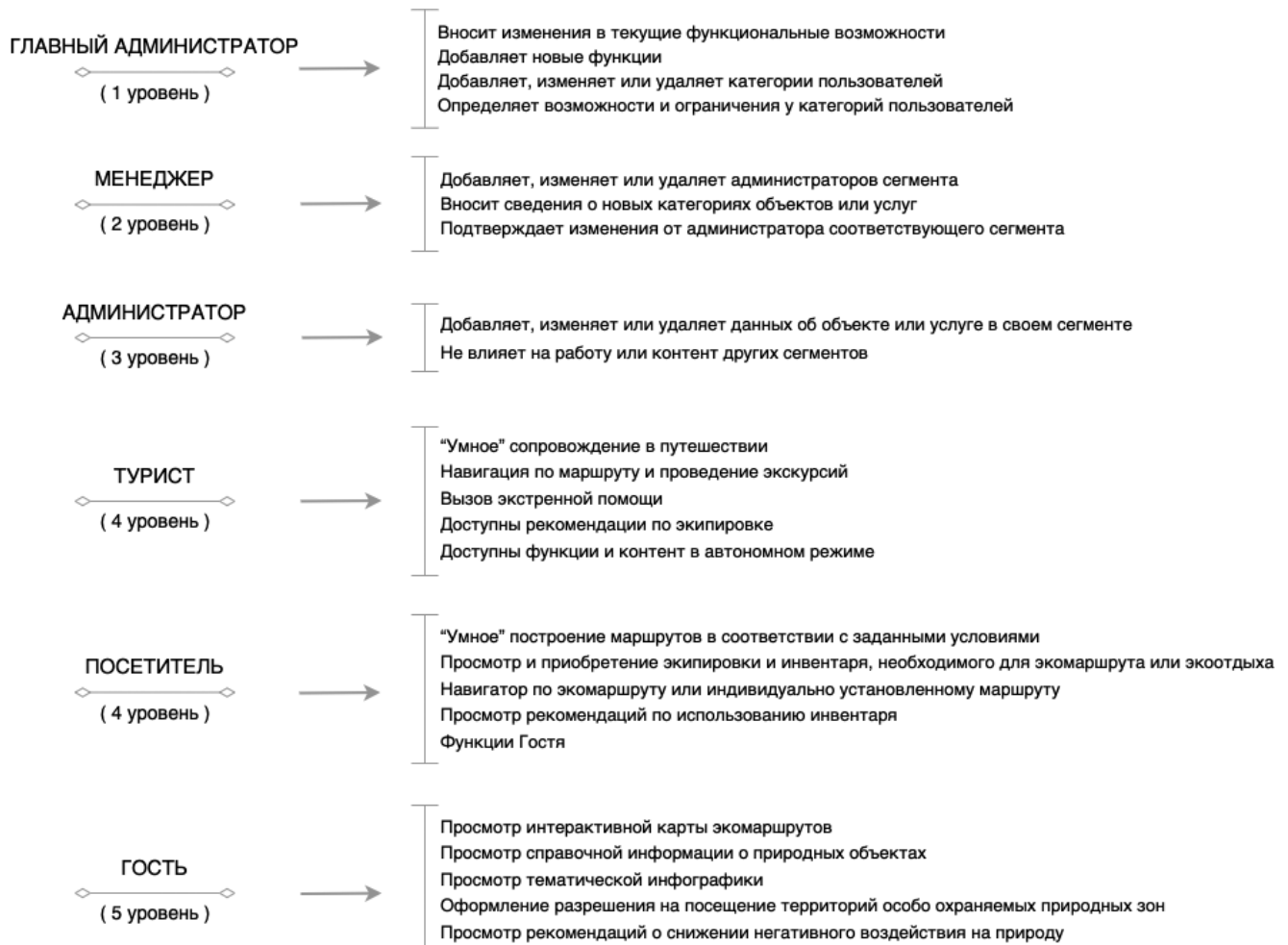


Рис. 3. Роли пользователей в цифровой системе

категориями пользователей. Количество пользователей на каждом уровне имеет ограниченное значение:

1. Главный администратор может быть только один.
2. Главный администратор сегмента может быть только один по количеству соответствующих сегментов. Соответственно, работа каждого главного администратора сегмента не зависит от другого на этом уровне.
3. Может быть один или множество администраторов одного сегмента с равными правами доступа в рамках роли. Подчиняются главному администратору соответствующего сегмента. Результаты работы доступны для пользователей уровней 4–5.
4. Пользователей, относящихся к уровню категорий 4–5, может быть множество.

Один и тот же пользователь может одновременно относиться к двум категориям 4-го уровня (переход между уровнями осуществляется только при изменении геолокации). Это означает, что посетитель (4 уровень) получает доступ к ресурсам и функциям, которые доступны в пределах населенного пункта и близлежащей территории, где он живет (зоны отдыха, музеи, экотропы, пляжи

и т.д.). При перемещении между городами в пределах одного региона или между ними пользователю присваивается в автоматическом режиме категория «Турист» с дополнительными возможностями. Такой подход позволяет вести статистику по востребованности туристических услуг и других предложений в регионе.

Функциональные возможности цифровой системы и ее архитектура

Для сопоставления категорий пользователей и доступных им функциональных возможностей разработана диаграмма прецедентов (рис. 4). Каждая категория пользователей ассоциирована с точкой доступа к определенному комплексу функциональных возможностей. Каждый прецедент (обозначен эллипсом) является набором задач, которые логически объединены в отдельные функции по принципу использования одних и тех же ресурсов или реализации схожих алгоритмов. Следует отметить, что отдельные прецеденты для выполнения внутренних задач могут использовать технологии искусственного интеллекта.

Приведем в качестве примера прецедент «Обработать пользовательские данные». Он может быть реализован как набор совместно работающих фильтров, списков и текстовых полей, так и в виде диалогового окна, реализующего сценарий беседы по заданной теме. В любом случае, будут получены данные, необходимые для формирования запросов на получения доступа к ресурсам или вызову других функций. Вызовы функций в модели показаны стрелками со стереотипами:

1. `<<include>>` — прецедент включает в себя выполнение другого прецедента (например, прецедент «Создать список индивидуальных маршрутов» будет выполняться всегда совместно с прецедентом «Обработать пользовательские данные»).
2. `<<extend>>` — выполнение прецедента зависит от наличия определенных внешних условий (например, прецедент «Выполнить функции навигатора» может быть выполнен только в случае, если пользователь предоставил доступ к своей геолокации и реализован прецедент «Получить геолокацию»).

Для систематизации прецедентов и исключения дублирования связей в модели категории 4-го уровня объединены в «ТУРИСТ». Такой подход показывает, что разделение функциональных возможностей осуществляется на программном уровне и пользователь не испытывает трудностей в использовании программным продуктом.

На этапе разработки программного продукта связанные между собой прецеденты модели могут быть представлены в виде программных модулей. Такой подход позволяет в дальнейшем сформировать точки масштабирования приложения.

Общая структура приложения представляет собой трехуровневую клиент-серверную архитектуру: уровни клиента, сервера и приложений. Уровень клиента представляет собой пользовательский интерфейс: мобильное приложение и веб-сайт, предоставляющие пользователю доступ к ресурсам системы и получающие данные для последующего формирования запроса. На уровне приложений сосредоточена бизнес-логика, реализующая набор правил, которым подчиняются объекты, сущности, классы и данные внутри программы, связанные между собой определенной функциональностью. На уровне сервера хранятся данные, которые получены по результатам обработки действий всех пользователей.

Обсуждение

Проектирование любого программного продукта является важным этапом в модели его жизненного цикла. По результатам его выполнения определяются методы и стратегии решения проблемы, устанавливаются огра-

ничения на бизнес-логику и структуру всех компонентов системы, формируются требования к архитектуре программного обеспечения и т.д. Как отмечается в работах, связанных с управлением IT-проектов, таким образом создается проектная документация, необходимая для обеспечения согласованной коммуникации в команде проекта при распределении и выполнении задач, определяющая точные пользовательские требования и технические спецификации [8, 13]. В работе представлены результаты, которые могут быть использованы в проектной документации.

Применение общенаучных методов исследования позволило получить систему значимых элементов в пределах заявленной проблемы, а также связей, влияющих на изменение состояний процесса взаимодействия между ними. Исследователи в своих работах утверждают, что выявление объектов и причинно-следственных связей, приводящих к возникновению проблемы, позволяет установить варианты разрешения системных проблем с учетом рисков, ограничений или неопределенности среды [8]. Экотуризм является областью, состоящей из трудноформализуемых процессов из-за наличия множества факторов, влияющих на их изменения, в т.ч. случайного характера. Это соответствует определению сложной системы, которая требует системного подхода к ее изучению. В работах отмечается, что в таком случае необходимо использовать инструменты и методы системного анализа [4, 8]. Выбранная методология для анализа объекта исследования и его формализации соответствует концепции проведения системного анализа, который может использоваться в организационных, экономических, технических, информационных или военных системах.

Для упрощенного представления объектов или явлений используются методы, позволяющие их формализовать в соответствии с общепринятыми правилами и логикой. В работах, связанных с созданием формальных моделей процессов и систем, исследователями предлагается использовать графические методы или методы с условно-графической нотацией [4, 9]. Условно-графическая нотация представляет собой набор стандартных графических символов, которыми обозначаются элементы системы и связи между ними, и позволяет абстрагироваться от неключевых аспектов системы и наглядно показать структуру или отношения сложных объектов или процессов. Созданные в работе схемы позволили отразить изменения состояний для определения закономерностей, необходимых для моделирования и прогнозирования отдельных процессов программного продукта (например, текущая загруженность экомаршрутов, популярность объектов). Разработанная модель функционирования программного продукта является диаграммой прецедентов, которая относится к методологии объектного моделирования и активно использу-

ется в области разработки программного обеспечения и моделирования бизнес-процессов [13].

Исследование имеет предметно-смысловые ограничения. Разработка моделей и функциональных требований к программному продукту основывались на определениях экотуризма, установленных законодательством Российской Федерации. При изменении норм закона или региона эксплуатации используемые ресурсы и предлагаемые функциональные возможности могут быть изменены, благодаря гибкости и масштабируемости цифровой системы.

Заключение

Создание специализированного программного обеспечения, функциональные возможности которого предполагают организацию и управление процессами экотуризма, соответствуют основным принципам стратегии развития туризма в России, предусматривающей свою реализацию до 2035 г. Она предполагает комплексное развитие внутреннего и въездного туризма путем создания и популяризации конкурентоспособного туристского продукта, обеспечении доступности туристских услуг, отдыха и оздоровления граждан. Дополнительным стимулом для развития экотуризма служит вступивший в силу федеральный закон о развитии туризма на особо охраняемых природных территориях, определяющий правила организации посещения национальных пар-

ков и заповедников. Несмотря на проблемы, связанные с недостатком инфраструктуры, спрос на экологические экскурсии достаточно высок. Использование цифровых инструментов позволяет не только сделать доступными услуги и информацию об особо охраняемых природных территориях, но и интегрировать экомаршруты с туроператорскими программами, обучающими и познавательными турами.

Современное общество характеризуется повышенным вниманием к экологическим вопросам — это общемировой тренд. Создание единых цифровых сервисов или платформ, объединяющих экопроекты, международные практики или инициативы, позволяет воспитать культуру природопользования, предусматривающую ответственное потребление природных ресурсов, закрепление правил бережного отношения к природе, регулирование хозяйственной деятельности в соответствии с текущей устойчивостью региональных природных систем.

Создание и внедрение цифровых инструментов в сфере экотуризма позволяет не только реализовать разные проекты, но и создавать системно работающие решения. Они позволяют комплексно анализировать состояние рынка для выбора бизнес-модели и интеграции ресурсов доступных цифровых экосистем других проектов, принимать решения о развитии инфраструктуры, повышении качества сервиса и уровня образования населения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gutierrez I. Digital transformation and the new combinations in tourism: A systematic literature review / I. Gutierrez, J.J. Ferreira, P.O. Fernandes // *Tourism and Hospitality Research*. — 2025. — № 25(2). — С. 194–213. — DOI: 10.1177/14673584231198414.
2. Афанасьев О.Е. Концепт «Экологического туризма» в мировой и российской практике: компаративный анализ и кейсы / О.Е. Афанасьев, А.В. Афанасьева // *Современные проблемы сервиса и туризма*. — 2017. — № 11(4). — С. 7–26.
3. Штебнер С.В. Развитие экологического туризма / С.В. Штебнер, Е.Г. Ерыгина // *Бюллетень науки и практики*. — 2022. — Т. 8, № 6. — С. 126–133. — DOI: 10.33619/2414-2948/79/14. — EDN: VXPEKS.
4. Orlik L. Exploring the functional possibilities of intelligent systems for active recreation / L. Orlik, I. Krasnikova // *BIO Web Conf.* — 2024. — № 145. — С. 06011. — DOI: 10.1051/bioconf/202414506011.
5. Иванова Д.В. Экологический туризм как вид экологического предпринимательства: новое в регулировании особо охраняемых природных территорий / Д.В. Иванова // *Гражданское право*. — 2024. — № 01/2024. — С. 38–41. — DOI: 10.18572/2070-2140-2024-1-38-41.
6. Mancini M.S. Ecological Footprint and tourism: Development and sustainability monitoring of ecotourism packages in Mediterranean Protected Areas / M.S. Mancini, D. Barioni, C. Danelutti [и др.] // *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*. — 2022. — № 38. — С. 100513. — DOI: 10.1016/j.jort.2022.100513.
7. Boikova G. Alloy modeling in ecological tourism development concept in Russia / G. Boikova, Y. Smirnova // *BIO Web Conf.* — 2024. — № 141. — С. 04048. — DOI: 10.1051/bioconf/202414104048.
8. Buede D.M. The engineering design of systems: models and methods / D.M. Buede, W.D. Miller. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2024. — 464 с.
9. Особо охраняемые природные территории [Электронный ресурс] // Федеральная служба государственной статистики. — Режим доступа: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/os_oxr_ter_2024.xlsx (дата обращения: 25.04.2025).
10. Тункинский национальный парк [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://tunkapark.ru> (дата обращения: 07.04.2025).
11. Задера С. Заповедные территории РФ в 2024 году посетили более 17,5 миллиона туристов [Электронный ресурс] / С. Задера // *Российская газета*. — Режим доступа: <https://rg.ru/2025/02/03/reg-szfo/zapovednye-territorii-rf-v-2024-godu-posetili-bolee-175-milliona-turistov.html> (дата обращения: 07.04.2025).
12. РСТ: нацпарки и заповедники России в 2024 году посетили почти 17,6 млн туристов [Электронный ресурс] // *Российский союз туристической индустрии*. — Режим доступа: <https://rst.ru/novosti/novosti-turizma/rst-nacparki-i-zapovedniki-rossii-v-2024-godu-posetili-pochti-17-6-mln-turistov.html> (дата обращения: 07.04.2025).
13. Гумерова Г.Р. Моделирование требований к программному обеспечению / Г.Р. Гумерова, Т.Г. Мансурова // *Вестник Алтайской академии экономики и права*. — 2023. — № 12-1. — С. 42–52. — DOI: 10.17513/vaael.3131. — EDN: XKWBHD.

© Логачёв Максим Сергеевич (logachevmaxim@gmail.com); Кучмезов Хамзат Хакимович (kkkuchmезov@fa.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СОВРЕМЕННЫЕ УГРОЗЫ БЕЗОПАСНОСТИ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ И КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МЕТОДОВ ДЛЯ ИХ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ

MODERN WEB APPLICATION SECURITY THREATS AND A COMPREHENSIVE APPROACH TO USING METHODS TO PREVENT THEM

M. Malyavin

Summary. With the rapid growth in the number of web applications and integration into key professional and everyday areas of human activity, ensuring their security is becoming a priority. Modern threats such as SQL injection, cross-site scripting, denial of service attacks and zero-day vulnerability exploitation pose serious risks to private users and organizations. The purpose of this article is to analyze current cyber threats, identify their features and consider an integrated approach to the use of protection methods. The study summarizes modern attack prevention strategies, including the use of web firewalls, authentication and authorization mechanisms, anomaly monitoring, and the use of machine learning technologies to identify threats. The author confirms the necessity and importance of an integrated (combined) approach to ensure multi-level protection of modern web applications. The results of the work will allow us to form a holistic view of the necessary measures to ensure the security of web applications. The presented materials can be useful to cybersecurity specialists, software developers, and web system administrators, as well as used in the future to develop effective protection strategies.

Keywords: Web application, web development, security, information security, protection, attack, cyber threat.

Малыavin Максим Юрьевич

Аспирант, Московский информационно-технологический университет, Московский архитектурно-строительный институт МАСИ
max-malyavin@bk.ru

Аннотация. В условиях стремительного роста количества веб-приложений и интеграции в ключевые как профессиональные, так и бытовые сферы деятельности человека, становится приоритетной задачей обеспечение их безопасности. Современные угрозы, такие как SQL-инъекции, межсайтовый скриптинг, атаки типа «отказ в обслуживании» и эксплуатация уязвимостей нулевого дня, создают серьезные риски для частных пользователей и организаций. Целью настоящей статьи является выполнение анализа актуальных киберугроз, выявление их особенностей и рассмотрение комплексного подхода к использованию методов защиты. В ходе исследования обобщены современные стратегии предотвращения атак, включая применение веб-фаерволов, механизмов аутентификации и авторизации, мониторинга аномалий и использования технологий машинного обучения для выявления угроз. Автором подтверждается необходимость и значимость комплексного (комбинированного) подхода для обеспечения многоуровневой защиты современных веб-приложений. Результаты работы позволяют сформировать целостное представление о необходимых мерах по обеспечению безопасности веб-приложений. Представленные материалы могут быть полезны специалистам в области кибербезопасности, разработчикам программного обеспечения и администраторам веб-систем, а также использоваться в дальнейшем при разработке эффективных стратегий защиты.

Ключевые слова: Веб-приложение, веб-разработка, безопасность, информационная безопасность, защита, атака, киберугроза.

Введение

Безопасность веб-приложений является одной из ключевых задач в области кибербезопасности, поскольку их уязвимости могут привести к утечке данных, финансовым потерям и компрометации систем. В последние годы наблюдается рост атак на веб-приложения, что требует совершенствования существующих методов защиты. По результатам анализа В. Бесединой (аналитика Positive Technologies), в третьем квартале 2024 года количество инцидентов увеличилось на 15 % по сравнению с аналогичным периодом 2023 года и лишь незначительно уменьшилось (на 4 %) по сравнению с предыдущим кварталом [1]. Вредоносное ПО остается основным инструментом злоумышленников, применяясь в 65 % успешных атак на орга-

низации и в 72 % атак на частных лиц. Дополнительно, специалисты компании BI.Zone выяснили, что 25 % веб-уязвимостей, обнаруживаемых ежемесячно, могут представлять высокие риски для кибербезопасности организаций [2]. Это подчеркивает критическую важность своевременного выявления и устранения уязвимостей, а также внедрения комплексных мер защиты.

Ключевой проблемой на современном этапе исследований является недостаточный уровень защиты веб-приложений, обусловленный как ростом сложности атак, так и несовершенством применяемых мер безопасности. В связи с этим материалы настоящей статьи посвящены анализу актуальных угроз и формированию комплекса решений, которые на 2025 год способны обеспечить достаточный уровень защиты веб-приложений,

минимизируя риски кибератак. Автором предполагается, что применение комплексного подхода, включающего как традиционные методы защиты, так и новейшие технологии, такие как машинное обучение и искусственный интеллект для обнаружения аномалий, а также автоматизированные системы для мониторинга безопасности в реальном времени, позволит значительно повысить уровень защиты веб-приложений. В статье также рассматриваются методы предотвращения уязвимостей, связанные с неправильной настройкой безопасности, а также угрозы, возникающие из-за недостаточной защиты пользовательских данных и слабых мест в кодировании. Проводимый анализ направлен на формиро-

вание практических рекомендаций для улучшения киберзащиты, что поможет разработчикам, специалистам по безопасности и организациям повысить надежность своих веб-приложений и снизить риски в условиях постоянно меняющихся угроз.

Результаты и обсуждение

На фоне быстрого развития технологий в 2025 году угроза безопасности веб-приложений продолжает оставаться одной из наиболее актуальных проблем в области киберзащиты. Как отмечают Ю. Быкова и А.В. Звягинцева, в первую очередь, это связано с ростом числа

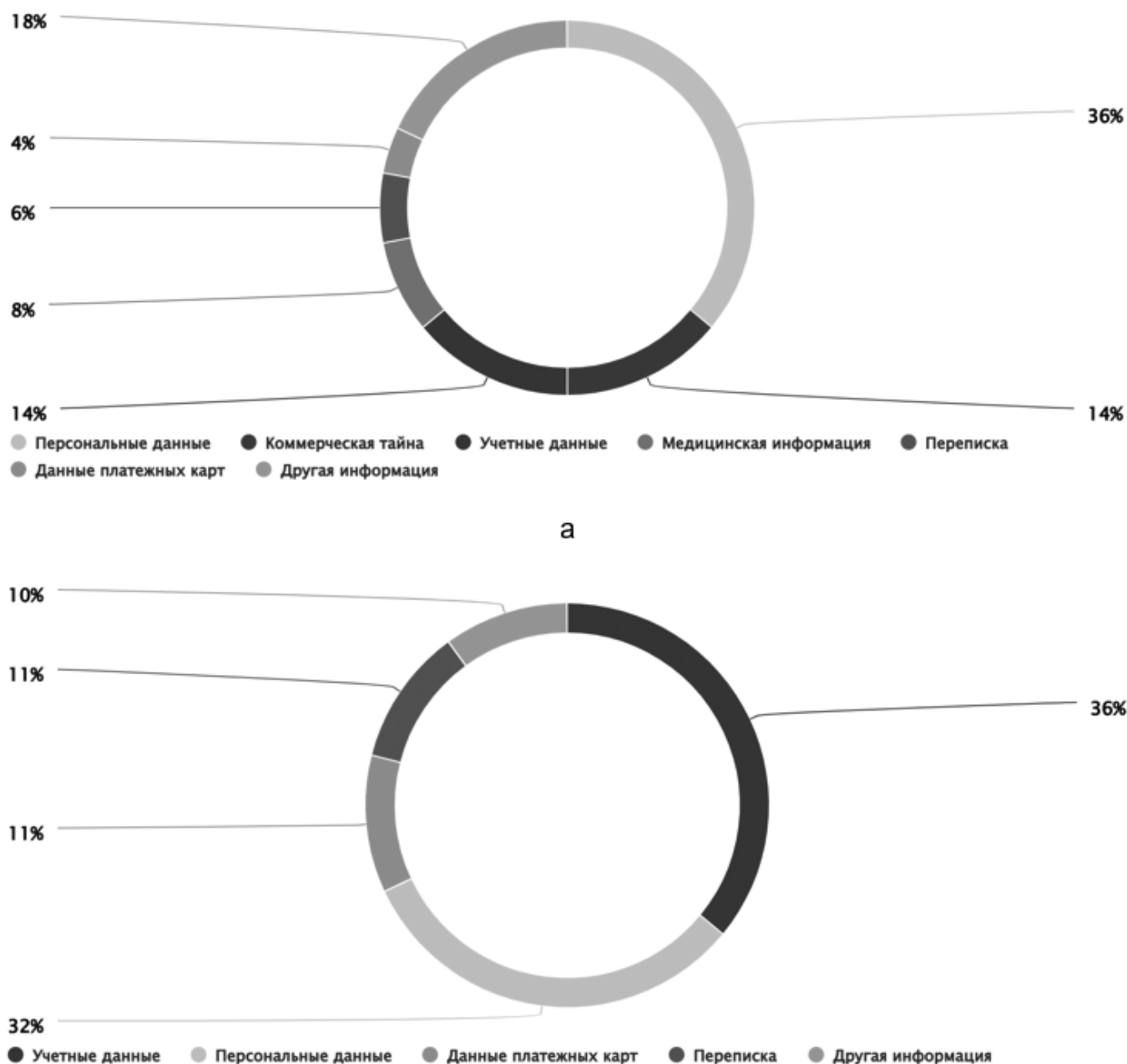


Рис. 1. Типы украденных данных: а — в атаках на организации; б — в атаках на частных лиц

и сложности кибератак, направленных на нарушение функционирования веб-приложений и утечку конфиденциальной информации [3]. Одной из главных угроз остаются атаки с использованием вредоносного ПО, которое используется злоумышленниками для организации киберпреступлений. Согласно данным из обзора крупнейших киберинцидентов 2024 года, в 65 % успешных атак на организации и в 72 % — на частные лица использовалось вредоносное ПО. Так, например, в одном из крупных инцидентов 2024 года злоумышленники применили вирус-вымогатель, что привело к компрометации корпоративных данных и крупным финансовым потерям. По данным отчета аналитика компании Cloud Networks A. Савиной за первый квартал 2024 года хакеры атаковали более 19 млн российских пользователей Android-смартфонов с помощью изначально занесённых на устройства вирусов [4].

Атаки на веб-приложения с целью утечки конфиденциальной информации все также продолжают быть широко распространенными на момент 2025 года. По данным отчета аналитиков компании Positive technologies, в этих атаках злоумышленники чаще всего ориентировались на похищение персональных данных (36 %), учетных данных (36 %) и коммерческой тайны (14 %). Эти данные подтверждают, что персональные данные и учетные данные являются приоритетными целями для хакеров, что усиливает необходимость разработки и применения надежных механизмов защиты веб-приложений [5]. Рис. 1 иллюстрирует эти данные и показывает основные направления атак. Также на основе анализа материалов М.А. Лапиной, А.Р. Багаутдиновой и Н. Загнетовой, становится очевидным, что текущие методы защиты не всегда способны эффективно справляться с новыми угрозами, такими как атаки на уровне приложений, использующие уязвимости в API, и атаки на базы данных [6].

Как результат, на основе анализа актуальных угроз безопасности веб-приложений можно утверждать о высоком уровне их актуальности в 2025 году. Наблюдаемое увеличение количества инцидентов и использование все более сложных методов атак ставит перед исследователями и разработчиками веб-приложений задачу создания комплексных решений, способных эффективно противодействовать этим угрозам. В частности, необходимо сосредоточиться на разработке систем защиты, включающих современные технологии, такие как искусственный интеллект, машинное обучение и расширенные системы мониторинга в реальном времени. В связи с этим, как подчеркивает М.В. Шатурный, обеспечение комплексного подхода к защите веб-приложений станет необходимым шагом на пути повышения уровня киберзащиты и защиты конфиденциальной информации в условиях современных угроз [7]. На основе анализа актуальных материалов и киберинцидентов 2024 года автором настоящей статьи разработана следующая

табл. 1, отражающая актуальные угрозы безопасности веб-приложений. Данная таблица позволяет выделить основные угрозы, с которыми сталкиваются веб-приложения в 2025 году, а также дает представление о распространенности и возможных последствиях каждой угрозы в современном сегменте веб-приложений.

Таблица 1.
Актуальные угрозы безопасности веб-приложений в 2025 году

№	Угроза	Описание	% случаев воздействия
1	Утечка персональных данных	Включает кражу личных данных пользователей, таких как ФИО, адреса, телефонные номера, email и номера банковских карт.	36 % (по данным BI.Zone)
2	Атаки с использованием вредоносного ПО	Вредоносное ПО используется для взлома и повреждения системы, часто с целью получения конфиденциальной информации.	65 % (по данным Positive Technologies)
3	SQL-инъекции	Атаки через уязвимости в базе данных веб-приложений, что позволяет злоумышленникам манипулировать запросами к базе данных.	22 % (по оценке автора статьи)
4	Кросс-сайтовый скриптинг (XSS)	Уязвимости, позволяющие внедрять вредоносный JavaScript код на страницы веб-приложений, что может привести к утечке данных.	18 % (по оценке автора статьи)
5	Атаки через уязвимости в API	Злоумышленники используют недостатки в API для получения доступа к данным и управления системой.	25 % (по данным Positive Technologies)
6	Атаки на сессии и куки	Хищение сессионных данных или фальсификация куков для получения несанкционированного доступа к учетным записям.	15 % (по данным Cloud Networks)

На основе анализа актуальных угроз безопасности веб-приложений, представленных ранее в работе, следует сделать следующие выводы, которые подтверждают необходимость применения комплексного подхода к обеспечению безопасности веб-приложений. Так, современные угрозы, такие как утечка персональных данных, атаки с использованием вредоносного ПО, SQL-инъекции и XSS-уязвимости, показывают, что традиционные методы защиты оказываются недостаточными для

эффективной защиты от множества атакующих факторов. Учитывая быстрое развитие технологий, появление новых уязвимостей и инновационных методов атаки, требуется создание многоуровневой системы защиты, которая обеспечит целостность и безопасность данных на всех уровнях взаимодействия с веб-приложениями. Как отмечают М.В. Зейкан, Е.В. Вершинин и В.О. Фёдоров, комплексность защиты веб-приложений состоит в интеграции методов и технологий, которые в совокупности создают многослойную архитектуру безопасности [8]. Такой подход позволяет эффективно противодействовать широкому спектру угроз, минимизируя риски взлома или утечки данных. Наиболее важными элементами комплексной защиты являются комбинация различных методов аутентификации и авторизации, защита соединений, защита данных при передаче и защита API.

Одним из основных методов является использование OAuth 2.0 и JWT (JSON Web Tokens), которые обеспечивают надежную аутентификацию и авторизацию пользователей, предотвращая несанкционированный доступ к ресурсам веб-приложения. С.А. Лесько подтверждает, что данные технологии позволяют надежно передавать информацию о пользователе и контролировать доступ к различным сервисам и данным, исключая возможность подмены данных злоумышленниками [9]. Другим важным элементом является использование HTTPS, Content Security Policy (CSP) и CORS для защиты соединений между клиентом и сервером. HTTPS обеспечивает шифрование данных, предотвращая их перехват в процессе передачи. CSP и CORS служат защитой от атак типа XSS, контролируя загрузку внешних ресурсов и ограничивая возможность выполнения опасного кода на стороне клиента. Важным аспектом является защита API, которая включает такие механизмы, как Rate Limiting и DDoS Protection, для предотвращения перегрузки серверов и блокировки атак, направленных на исчерпание ресурсов системы [10]. По оценке автора настоящей статьи, внедрение таких технологий и методов позволяет значительно повысить уровень безопасности веб-приложений, эффективно противодействуя самым актуальным угрозам, с которыми сталкиваются организации и частные лица в 2025 году. В итоге комплексный подход к защите веб-приложений, включающий комбинацию различных методов защиты и построение многоуровневой системы безопасности, является необходимостью для обеспечения надежности и защиты информации в условиях современных киберугроз. Автором предлагается следующая система методов и инструментов для построения комплексной системы защиты современных веб-приложений, которая сочетает в себе лучшие практики и новейшие технологии в области кибербезопасности (рис. 2). Данная система представляет собой многоуровневую архитектуру, включающую несколько ключевых слов и технологий, обеспечивающих защиту от большинства актуальных угроз веб-приложений.

Разработка предложенной системы безопасности веб-приложений требует использования нескольких этапов:

1. Оценка рисков (на начальном этапе важно провести анализ существующих угроз и уязвимостей в веб-приложении. Это позволит определить, какие слои защиты необходимо интегрировать в первую очередь);
2. Интеграция технологий и инструментов (внедрение каждого из предложенных слоев безопасности должно быть последовательным. Важно начать с базовых технологий, таких как HTTPS и OAuth 2.0, а затем добавлять более сложные решения, такие как WAF и API Gateway);
3. Тестирование и оптимизация (после интеграции всех компонентов системы необходимо провести тестирование на уязвимости и производительность, чтобы убедиться в надежности защиты);
4. Мониторинг и обновление (важнейший этап — это постоянное отслеживание актуальности угроз и обновление системы защиты, с учетом новых угроз и изменений в области кибербезопасности).

Предложенная система защиты является универсальной и может быть адаптирована под различные типы веб-приложений в зависимости от их специфики. Например, для финансовых приложений можно усилить защиту с помощью более строгих методов аутентификации и авторизации, таких как биометрия. Для медиа-платформ можно сконцентрироваться на защите контента и предотвращении утечек данных. Архитектура системы имеет модульную природу, что позволяет добавлять или удалять компоненты в зависимости от уровня угроз и требований безопасности. Возможность масштабирования системы также заключается в ее гибкости: по мере роста веб-приложения можно увеличивать количество защитных слоев или добавлять новые технологии, такие как блокчейн для дополнительной защиты данных.

Согласно результатам анализа, представленных в предшествующих материалах, предложенная система может обеспечить защиту от 90–95 % актуальных угроз веб-приложений. Этот процент был получен на основе анализа статистики о распространенности различных атак и уязвимостей, а также эффективности существующих защитных мер. Например, внедрение WAF, HTTPS и OAuth 2.0 позволяет существенно снизить риски, связанные с XSS, SQL-инъекциями и фишингом, которые составляют основную долю атак на веб-приложения. Использование системы мониторинга SIEM и IDS/IPS снижает вероятность успешных атак на уровне сети и приложений. С учетом всех перечисленных технологий и методов защиты, комплексная система, предложенная в настоящей статье, способна существенно повысить уровень безопасности современных веб-приложений, обеспечивая надежную защиту от большинства актуальных угроз.

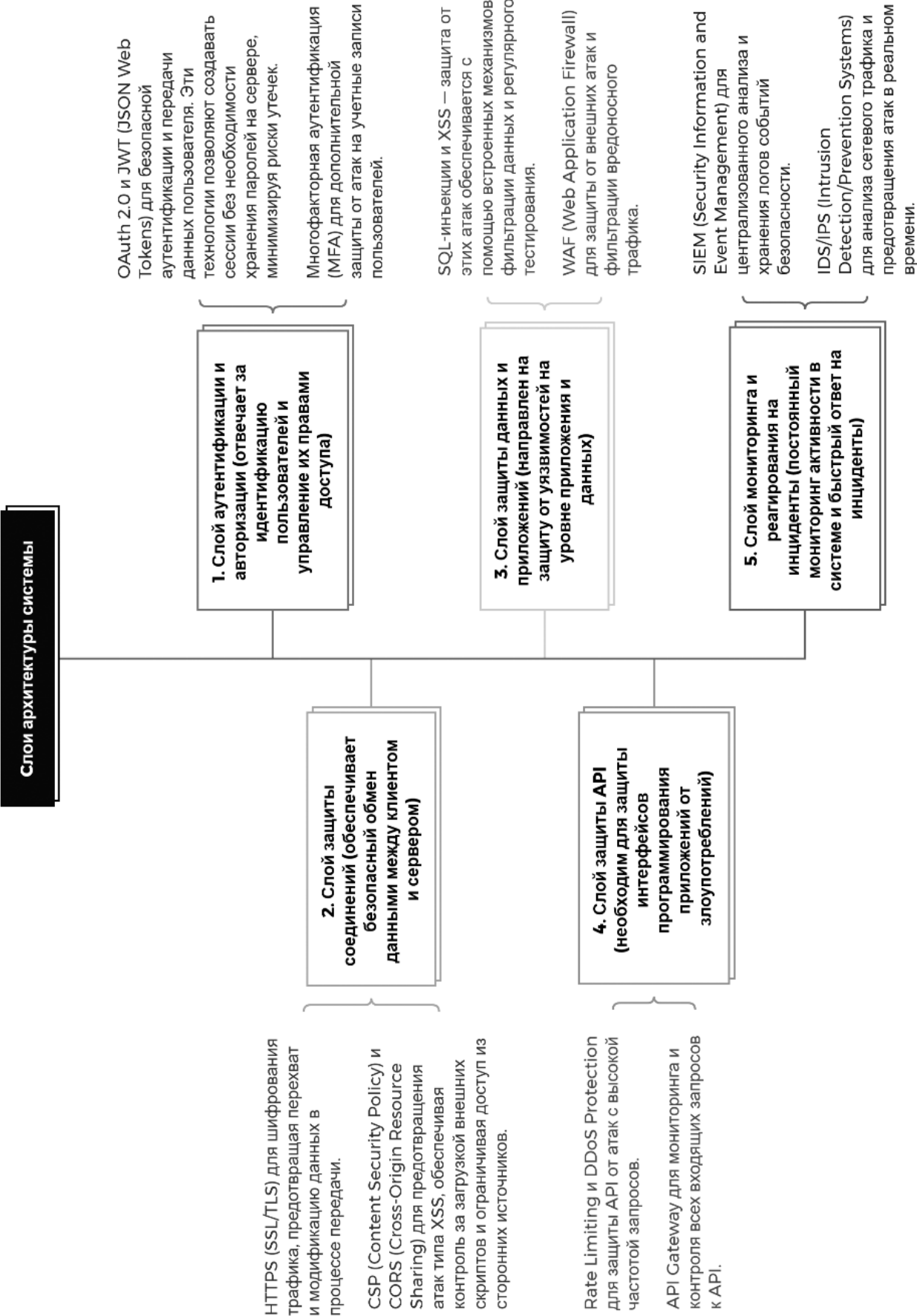


Рис. 2. Основные слои предлагаемой автором архитектуры системы обеспечения защиты веб-приложений

Заключение

В ходе проведенного исследования автором систематизированы актуальные угрозы безопасности веб-приложений, с учетом современных киберугроз и уязвимостей, с которыми сталкиваются компании и пользователи. Проведенный анализ позволил выделить ключевые риски, такие как SQL-инъекции, XSS-атаки, утечки данных, а также атаки на API и DDoS-атаки, которые составляют основу большинства угроз для веб-приложений. Автором разработана комплексная система защиты, включающая многоуровневую архитектуру, основанную на применении передовых технологий и методов безопасности. Важнейшими компонентами системы являются OAuth 2.0, JWT, HTTPS, CSP, CORS, WAF, а также защита API через Rate Limiting и DDoS Protection. Все эти методы составляют единый комплекс, обеспечивающий надежную защиту на всех уровнях — от аутентификации и авторизации пользователей до защиты от атак на сервер и базу данных.

На основе проведенного анализа можно утверждать, что предложенная система может обеспечить защиту от 90–95 % актуальных угроз веб-приложений. Этот показатель является результатом системного подхода

к интеграции различных методов защиты и их сочетания для предотвращения как технических, так и организационных уязвимостей. Процентная оценка защиты основана на статистике о распространенности атак, а также на эффективности внедренных решений, таких как WAF и HTTPS, которые обеспечивают надежную защиту от наиболее распространенных атак.

Также важно подчеркнуть, что предложенная система имеет высокую степень универсальности и масштабируемости. Ее архитектура позволяет адаптировать компоненты и усиливать защиту в зависимости от специфики веб-приложений, что делает систему гибкой и удобной для применения в различных отраслях, от финансовых сервисов до медиаплатформ. Как итог, выводы работы подтверждают, что комплексный подход к защите веб-приложений, основанный на интеграции нескольких уровней безопасности и использовании передовых технологий, является наиболее эффективным для защиты от современных угроз. В результате применения предложенной системы можно значительно снизить риски и повысить уровень безопасности веб-приложений, что крайне важно в условиях постоянно растущей активности киберпреступников и новых угроз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безопасность веб-приложений. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.tadviser.ru/index.php>/Статья: Безопасность_веб-приложений (дата обращения 06.03.2025 г.).
2. Актуальные киберугрозы: III квартал 2024 года. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/aktualnye-kiberugrozy-iii-kvartal-2024-goda/#id1> (дата обращения 06.03.2025 г.).
3. М.Ю. Быков, А.В. Звягинцева Анализ актуальных угроз безопасности веб-приложений // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2019. №10. С. 65–67.
4. Обзор крупнейших киберинцидентов 2024 года. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://cloudnetworks.ru/analitika/obzor-krupnejshih-kiberinsidentov-2024-goda/> (дата обращения 06.03.2025 г.).
5. Актуальные киберугрозы: I квартал 2023 года. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-2023-q1/> (дата обращения 06.03.2025 г.).
6. Лапина М.А., Багаутдинова А.Р., Загнетов Н. Исследование уязвимостей безопасности веб-приложений // Auditorium. 2024. №1 (41). С. 58–62.
7. М.В. Шатурный Анализ актуальных угроз и разработка подходов к защите веб приложений // ИВД. 2024. №7 (115). С. 9–18.
8. Зейкан М.В., Вершинин Е.В., Фёдоров В.О. Проблема защиты данных при проектировании веб-приложения // Нацбезопасность. 2022. №1 (3). С. 4–7.
9. Лесько С.А. Модели и методы защиты веб-ресурсов: систематический обзор // Cloud of science. 2020. №3.
10. Жилина А.А. Актуальные веб-уязвимости сервисов финансово-банковского сектора и способы защиты веб-приложения // Научные записки молодых исследователей. 2021. №1. С. 53–70.

© Малявин Максим Юрьевич (max-malyavin@bk.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МОДЕЛЬ ДИАЛОГА С ЧАТ-БОТОМ В МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СРЕДЕ

DIALOGUE MODEL WITH CHAT BOT
IN A MULTIACTIVE ENVIRONMENT

S. Morugin

Summary. The article discusses the principles of conducting a client's dialogue with a bot based on the methodology of the multi-agent approach. Each agent is a mini-expert system capable of conducting a dialogue in its own part of the subject area.

The purpose of the study is to determine the general model of a dialogue with a multi-agent bot and the principles of agent interaction during a dialogue in the conditions of changing the topic of the dialogue and the unrecognizability of some of the client's responses.

The article considers a recurrent scenario-situation model of an agent and formulates requirements for agents to conduct a dialogue.

Dialogue management from the controller's side is reduced to the choice of an agent that is best able to continue the dialogue based on its assessment of the client's responses or requests.

The Markov model of the dialogue and the activation of observer agents allow the topic of the dialogue to be changed without losing context and taking into account the user's goals specified in previous responses.

Keywords: Multi-agent approach, software agents, situational scenario approach, dialogue bot, Markov models.

Моругин Станислав Львович

Доктор техн. наук, доцент,
Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева
smorugin@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрены принципы ведения диалога клиента с ботом, основанным на методологии мультиагентного подхода. Каждый агент является мини-экспертной системой, способной вести диалог в своей части предметной области.

Цель исследования — определить общую модель диалога с мультиагентным ботом и принципы взаимодействия агентов при ведении диалога в условиях смены темы диалога и нераспознаваемости части ответов клиента. Рассмотрена рекуррентная сценарно-ситуационная модель агента и сформулированы требования к агентам для ведения диалога.

Управление диалогом со стороны контроллера сводится к выбору агента, который наилучшим образом, исходя из оценки своего состояния по отношению к ответам или запросам клиента, способен продолжать диалог.

Марковская модель диалога и активизация агентов-наблюдателей позволяет менять тему диалога, не теряя контекста и учитывая цели пользователя, указанные в ранее данных ответах.

Ключевые слова: мультиагентный подход, программные агенты, ситуационно-сценарный подход, диалоговый бот, Марковские модели.

Введение

Для канала предложения услуг, продаж и маркетинга через сайты и мессенджеры постоянно увеличивается. Чат-боты являются инструментом для такого канала. Продвижение клиентов в режиме диалога с чат-ботом имеет ряд существенных преимуществ, поскольку бот может оперативно перестраивать сценарий диалога, используя данные о клиенте, полученные от внешних источников и в процессе диалога. Персонализация клиентов вместо ранее используемой сегментации повышает эффективность продаж за счет попадания в потребности клиента и большей убедительности аргументов, что его проблема будет решена.

Обычный бот отвечает по заданному сценарию и теряется при смене темы или нестандартных вопросах, что требует обращения к оператору.

Боты с элементами искусственного интеллекта (ИИ боты) понимают слова и контекст. Одним из самых развитых искусственных интеллектов является ChatGPT способный решать разные задачи, в том числе написание кода, создание текстов, перевода текстов, получения точных ответов и использование контекста диалога для

ответов [6, с. 458]. Ограничениями даже для таких сложных решений являются: фактическая точность ответов, склонность к переобучению [1, с. 5] и отсутствие возможности целевого разговора [2, с. 9], под которым понимается способность ИИ общаться на определённую тему и контролировать контекст диалога с собеседником.

В статье рассмотрим принципы ведения диалога ботом, основанным на мультиагентном подходе [3, с. 6] и на подходе экспертной системы [8, с. 1].

Такой бот представляет собой набор вопросно-ответных систем (агентов). Агенты отвечают на вопросы клиента, используя каждый свою базу знаний или часть общей базы, учитывают контекст диалога. База знаний для каждого агента уникальна и специализирована, но в силу ограниченности предметной области агента достаточно проста, её формированием занимается инженер. В качестве модели знаний используют дерево решений, продукционные модели и фреймы [4, с. 7].

Бот — часть общей системы, набор средств для средств ведения диалога и предоставления информации пользователю. Кроме бота в системе есть база данных по объектам предметной области (например, по фи-

нансовым инструментам), база знаний в виде решающих правил ведения диалога, словарь в виде набора доменов, средства обновления информации, накопления статистики и др.

Цель исследования — определить общую модель диалога с мультиагентным ботом и принципы взаимодействия агентов при ведении диалога в условиях смены темы диалога и нераспознаваемости части ответов клиента.

Модель диалога с ботом

Рассмотрим диалог, который ведется с ботом в письменном виде на естественном языке.

Клиент (КЛ) пишет в адрес бота (БТ) высказывание (набор фраз) и далее отвечает на вопросы и выражает свои пожелания. Обозначим:

$W_1, W_2 \dots W_n$ — наборы высказываний (ответов, предложений, справок, вопросов) КЛ;

$V_1, V_2 \dots V_n$ — наборы высказываний (вопросов, фраз, слов, данных) БТ.

Обозначим $R = \{RV, RW\}$ — результат диалога, который включает (подтверждает) подмножество ранее сделанных высказываний и формируется ботом в конце диалога.

Диалог (D) — это последовательность высказываний КЛ и БТ

$$D = \{V_1, W_1, V_2, W_2 \dots V_n, W_n \dots R\}. \quad (1)$$

Немного более общая форма диалога может включать несколько высказываний с одной из сторон подряд

$$D = \{V_1, W_1, V_2, V_3, W_2 \dots V_{n-m} \dots V_n, W_n \dots R\},$$

но её рассматривать не будем в силу того, что она приводится к первой форме диалога.

Цель диалога для БТ — получить результат диалога $R = \{RV, RW\}$ с наиболее высоким рейтингом (баллами, оценкой).

Цель диалога для КЛ — получить информацию для решения своих проблем, определиться со способом и порядком их решения. Иными словами, оценка состояния модели КЛ, выполненная со стороны системы (бота) и в её интересах, должна повыситься. Бот должен так вести диалог, чтобы КЛ закончил диалог удовлетворенным, исходя из оценки системы.

Пример. Формально последние высказывания могут звучать так

«КЛ — я согласен с условиями кредита

БТ — договорились, высылаю Вам документы для оформления

КЛ — да, жду»

В $R = \{RV, RW\}$ включаются все ранее сделанные высказывания и формулировки, которые относятся к результату диалога.

Клиент может провести с ботом несколько диалогов. Модель пользователя M до начала диалога $n+1$

$$M_{in} = \{M_0, FR_1, \dots, F_n R_n\}$$

где M_0 — усредненная начальная модель пользователя, построенная на основе типовых решений и общей статистики диалогов,

FR_1, \dots, FR_n — отфильтрованные результаты предыдущих диалогов,

F — обозначение фильтра состояния пользователя (например, если клиент полгода не звонил, и его данные теряют актуальность, например, в части суммы инвестирования, степени заинтересованности и др.)

Модель клиента после окончания диалога с номером $n+1$

$$M_{out} = \{M_0, FR_1, \dots, F_n R_n, R_{n+1}\}$$

Ситуационно-сценарный подход ведения диалога

Ситуация характеризуется набором параметров состояния активных агентов и общедоступных параметров системы [3, с. 96; 4, с. 167]. На основе обработки параметров ситуации (состояния системы) бот выбирает очередной шаг сценария диалога.

Обозначим:

k — номер шага (например, шаг включает вопрос и ответ),

s_k — состояние системы (совокупность состояний всех активных объектов) на шаге k ,

r_k — распознанный ответ клиента,

q — теоретико-множественный функционал формирования вопроса к КЛ,

f — теоретико-множественный функционал перехода от одного состояния к другому,

h — теоретико-множественный функционал распознавания ответа КЛ по его исходному высказыванию W ,

$A()$ — функция активации объектов по состоянию s_{k+1} ,

δ_k — вектор признака активных объектов на шаге k , содержит 0 (объект не активен) или 1 (объект активен), также этот вектор определяет порядок объектов в очереди на обработку данных от КЛ.

Рекуррентная сценарно-ситуационная модель агента выглядит так

$$\begin{aligned} V_{k+1} &= q(s_k, \delta_k), \\ r_{k+1} &= h(W_{k+1}), \\ s_{k+1} &= f(s_k, \delta_k, r_{k+1}), \\ \delta_{k+1} &= A(s_{k+1}, \delta_k). \end{aligned} \quad (2)$$

Модель (2) обладает марковским свойством [11, с. 1530] и позволяет моделировать псевдослучайно изменяющиеся системы [9, с. 678]. В Марковской модели предполагается, что будущие состояния диалога $s_{k+1}, \delta_{k+1} \dots$ зависят только от текущего состояния s_k, δ_k , а не от событий, которые произошли до него, что используется при управлении такими системами [10, с. 20].

Реализовать универсальный бот в виде одного агента, который отвечал бы на все возможные вопросы КЛ и компетентно предоставлял необходимую информацию в разных предметных областях весьма сложно. Это возможно на основе больших языковых моделей, которые, однако они будут проигрывать специализированным средствам, настроенным на конкретные предлагаемые продукты.

Рассмотрим мультиагентный подход [6, с. 460], когда диалог ведется за счет множества агентов, специализированных в отдельных областях (например, кредиты, инвестиции в акции, облигации, фонды и др.). Каждый специализированный агент может выдавать КЛ точную, актуальную и убедительную информацию в своей области. Мультиагентная среда эквивалентна привлечению к диалогу с клиентом различных специалистов помимо менеджера по общим вопросам.

Пусть в системе существует множество агентов, которые достаточно развиты с точки зрения автономности и достижения своих целей. Активные агенты стоят в очереди на право задать вопрос и обработать ответ КЛ.

Первый из очереди активных агентов формирует вопрос V_{k+1} к КЛ. КЛ дает ответ W_k . Порядок вызова агентов для обработки ответа и список активных агентов определяется вектором δ_k .

Состояние s_{k+1} на шаге $k+1$ определяется состоянием активных агентов s_k на предыдущем шаге k и ответом

КЛ W_{k+1} . В зависимости от совокупного состояния s_k активных агентов, контроллер агентов принимает решение об активизации новых агентов для шага $k+1$ и об изменении порядка агентов в очереди.

Требования к агентам для ведения диалога

Под агентом в работе будем понимать программный (в перспективе еще и аппаратный) комплекс, который характеризуется рядом свойств [2, с.396].

Таблица 1.

Требования к агентам и их реализация в диалоговом боте

Требование к агенту [2, с. 396]	Возможная реализация агента в диалоговом боте
Четко определенная миссия в системе	Роль или миссия каждого агента системы диалога определена
Множеством сформированных целей	Цели агентов заданы, каждый агент решает свои задачи. Критерии достижения целей здесь нестрогие в силу взаимодействия с КЛ. Кроме формального результата, что требует сбора статистики, нужна удовлетворенность КЛ, оценка отношения КЛ
Наличие математической или эвристической модели функционирования	Модель диалога достаточно строгая математически и алгоритмически. Разные задачи требуют разного математического аппарата
Детерминированный алгоритм работы	Алгоритмы диалога работают на основе локальных целевых функций, но могут содержать элементы стохастики для разнообразия диалога
Информационное обеспечение реализации агентного алгоритма работы	Все исходные данные формализованы, могут храниться в базе данных, XML — файлах и др. Формализация в виде набора параметров, доменов и др.
Организационное обеспечение (например, поддержка процесса разрешения конфликтов между агентами)	В процессе текстового общения почти не возникает проблем несовместимости данных. Агенты выстраиваются в очередь на обработку ответов пользователя, что определяет приоритеты обработки
Высокая степень автономности — способностью контролировать свое состояние и действовать без вмешательства оператора	Бот полностью автономен, вмешательство оператора не требуется. Агенты автономны, каждый из них реализует диалог в определенной области

Возможность взаимодействия с другими агентами и обслуживаемой системой	Агенты могут взаимодействовать через обработку ответов, меняя свое состояние. Предусмотрен механизм обмена параметрами агентов родственных классов (Конкретный кредит и Запрос на кредит, например). Разнородные агенты не должны напрямую взаимодействовать, только через контроллер и общедоступные параметры (системные переменные)
Чувствительность, т.е. способностью адекватно воспринимать окружающую среду и реагировать на ее изменения	Среда определяется ответами пользователя, параметрами ответов КЛ и оценкой его состояния. Агенты могут менять общедоступные параметры среды, читать и использовать их
Возможность вмешиваться в работу бота (активное состояние агента)	Решение о продолжении диалога принимается контроллером агентов в составе БТ по состоянию активных агентов. Это делается на каждом шаге и явно входит в модель
Наличие универсальной теоретической основы, которая не меняется в течение жизненного цикла агента и не зависит от предметной области использования агентов	Основа ориентирована на диалог с КЛ, но от предметной области диалога почти не зависит

Таким образом, предлагаемые части бота можно считать агентами в определении [2, с. 396]. Вместе с тем есть отличия в постановке задач для диалогового бота по сравнению с методологиями и сценариями проектирования автоматизированных систем.

Процесс управления диалогом

Представим себе, что все ответы КЛ однозначные, интерпретируемые и даны в терминах модели диалога (агентов и объектов). Однозначности ответов можно добиться, если КЛ выбирает ответы переключателем на форме. Тогда алгоритм диалога будет организован так:

- ведущий агент БТ задает вопрос. КЛ дает один из базовых ответов,
- ведущий агент что-то предлагает и задает следующий вопрос, сформулированный на основе свойств агентов. КЛ дает один из базовых ответов...,
- КЛ или БТ предлагает подвести итоги,
- БТ формирует Результат.

Если КЛ выходит за рамки базовых ответов агента, что имеет место при ответах или вопросах КЛ в свободной форме, то ответ КЛ может обрабатываться очередью агентов по следующим правилам ведения диалога.

- 1) Если КЛ дает один из базовых (заранее известных) ответов в пределах модели диалога ведущего агента, то ответ обрабатывает ведущий агент и он продолжает диалог. Если ведущий агент решил, что диалог с ним исчерпан, то контроллер передает управление другим агентам.

Каждый активный агент, наблюдая за ответом КЛ, параллельно с ведущим обрабатывает ответ при необходимости меняет свое состояние сам, выступая в роли наблюдателя. Он может выставить признак результата обработки («я не нужен», «я удовлетворен», «не понял ответ» и др.). Контроллер агентов считывает эти компоненты состояния и принимает решение о назначении агента ведущим, продолжении активации агента, его деактивации, удалении из диалога или активации новых агентов.

- 2) Все вопросы к КЛ генерируются методами ведущего агента на основе его текущего состояния и могут касаться только параметров входящих в него объектов.
- 3) Ответы на вопросы меняют состояние ведущего агента и, возможно, других агентов. Если ведущий агент не распознал ответ или не может на него ответить, он выставляет соответствующий параметр своего состояния, доступный контроллеру агентов и другим агентам. В таком случае контроллер должен выбрать другого ведущего агента.

Если результаты обработки ответа очередью агентов неудовлетворительны, уточняющий вопрос может быть задан агентом, ориентированным на решение самых общих вопросов.

- 4) На основе оценки состояния агентов контроллер принимает решение о переходе к другому агенту или другой стадии диалога, меняет очередь агентов, активирует новых агентов.

Таким образом, общая структура диалога — это последовательность передачи управления от одного активного агента к другому. Контроллер БТ не вникает в суть вопросов агента, но он следит за его состоянием. У каждого агента n ($n \in 1, \dots, N$) для контроллера и других агентов доступны параметры состояния, в частности K_n — критерий качества ожидаемого ответа агента n .

На основе этих параметров контроллер выстраивает очередь активных агентов, на каждом шаге диалога решая задачу выбора ведущего агента на основе критериев K_n

$$\{K_1, K_2, \dots, K_n\} \rightarrow \max_{n \in 1 \dots N}$$

Выставляемая агентом величина K_n зависит от степени распознавания предыдущего ответа КЛ, наличия

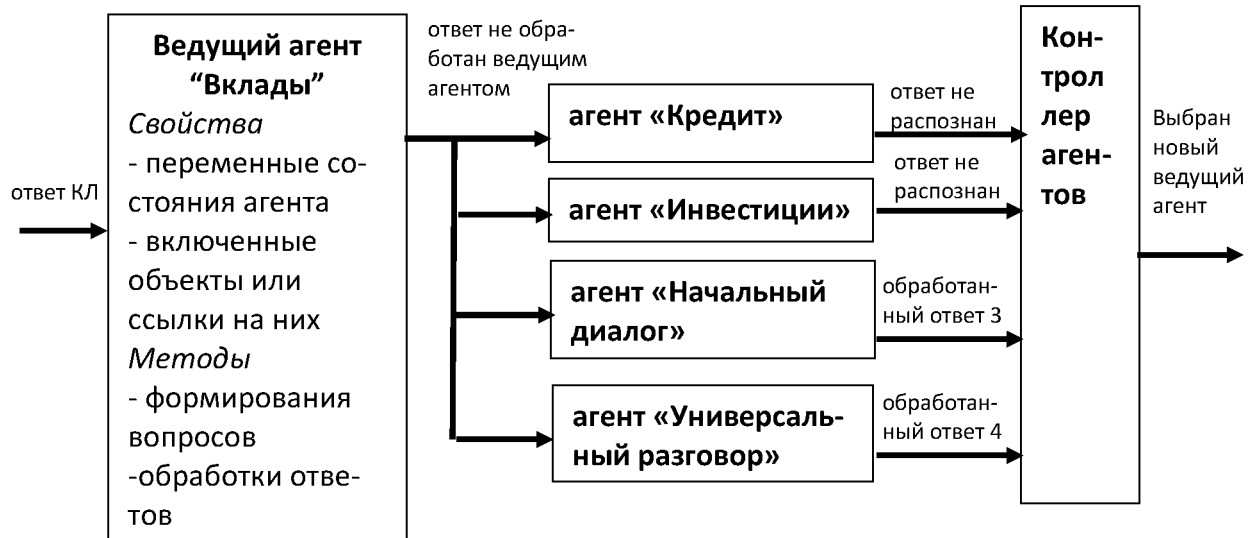


Рис. 1. Структура агента и пример обработки ответа очередью агентов

у агента информации для ответа, накопленной статистики удовлетворения другими КЛ ответами агента на запрос КЛ.

Пример взаимодействия агентов при обработке ответа приведен на рисунке 1.

Взаимоотношение агентов можно описать такими словами:

- есть ведущий диалог агент (первый в очереди). Он получает ответ КЛ и обрабатывает его. Может заявить (выставить параметр K), что «не очень хочет вести диалог, не понял вопроса и т.п.». Далее ответ обрабатывается по очереди другими агентами. Другой агент может «поднять руку» и претендовать на ведение диалога (выставить параметр K , что готов ответить);
- контроллер, исходя из состояния и претензий агентов, степени удовлетворения их имеющимися ответами КЛ может передать управление другому агенту, который и станет ведущим диалог.

Заключение

Предложена структура чат-бота в виде мультиагентной системы, включающей в себя множество специализированных агентов в форме вопросно-ответных экспертных систем. Каждый агент способен вести диалог в своей части предметной области, что упрощает его структуру и повышает качество представления информации клиенту.

Рекуррентная сценарно-ситуационная модель агента является Марковской системой. Сформулированы требования к агентам ведения диалога для их успешного взаимодействия.

Управление диалогом со стороны контроллера сводится к выбору агента, который наилучшим образом, исходя из оценки своего состояния по отношению к ответам или запросам клиента, способен продолжать диалог.

Марковская модель диалога и активизация, кроме ведущего агента, агентов-наблюдателей позволяет менять тему диалога, не теряя контекста и учитывая цели пользователя, указанные в ранее данных ответах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джарратано Джозеф, Райли Гари Экспертные системы: принципы разработки и программирование. / Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. — 1152 с. с ил.
2. Мисевич П.В. Агентный подход к созданию и сопровождению автоматизированных систем: Методология, концепции, модели, алгоритмы, примеры (монография) Издательский Дом: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. — 396 С.
3. Мисевич П.В. Сценарно-ситуационный подход к вопросам проектирования автоматизированных систем // Информационные технологии: труды НГТУ/Нижегород. гос.техн. ун-т. — Н.Новгород, 2005. Т.54. Кн. «Информатика». С.92–97.
4. Мисевич П.В. Сценарно-ситуационный подход к проектированию средств интеллектуальной поддержки процесса функционирования автоматизированных систем // Системы управления и информационные технологии. 2007. N2.1(28). С. 166–171.
5. Gao Leo; Schulman; Hilton, Jacob (2022). Scaling Laws for Reward Model Overoptimization. arXiv:2210.10760
6. Khranilov V.P., Andreev V.V.; Misevich P.V.; E.N. Pankratova. Identification Operators of Dynamic Control Models in the State Space for Engineering Applications Published in: XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP) 01 Sep 2019 (IEEE) — Vol. 2019, pp 455–460

7. Khranilov V.P., Misevich P.V., Pankratova E.N. The Use of Hybrid Knowledge Bases in Designing Engineering Systems Published in: 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 2020, pp. 479–482.
8. Knox W. Bradley; Stone, Peter. Augmenting Reinforcement Learning with Human Feedback (PDF). University of Texas at Austin. Архивировано (PDF) 8 декабря 2022. Дата обращения: 24 июня 2025.
9. Kochenderfer Mykel J.; Wheeler, Tim A.; Wray, Kyle H. (2022). Algorithms for decision making. Cambridge, Massachusetts; London, England: MIT Press. p. 678. ISBN 9780262047012.
10. Marcus Hutter (2009), Feature Reinforcement Learning: Part I. Unstructured MDPs, Journal of Artificial General Intelligence, 1: 3–24
11. Michael H. Lim, Tyler J. Becker, Mykel J. Kochenderfer, Claire J. Tomlin, and Zachary N. Sunberg (2023). «Optimality Guarantees for Particle Belief Approximation of POMDPs». Journal of Artificial Intelligence Research. 77: 1591–1636.

© Моругин Станислав Львович (smorugin@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РАЗРАБОТКА НЕЙРОСЕТИ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ КАЧЕСТВА ДИХЛОРЕТАНА В СРЕДЕ MATLAB И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА В MATLAB SIMULINK

DEVELOPMENT OF A NEURAL NETWORK FOR MAINTAINING THE QUALITY OF DICHLOROETHANE IN THE MATLAB ENVIRONMENT AND SIMULATION OF A VIRTUAL ANALYZER IN MATLAB SIMULINK

**E. Muravyova
G. Maskov**

Summary. The article presents the development of a neural network (NC) for quality control of dichloroethane in the MATLAB environment, as well as the simulation of a virtual analyzer in MATLAB Simulink. The architecture chosen is a Feed-forward backpropagation network, trained using the Levenberg—Marquardt algorithm. The NC includes a hidden layer with ten sigmoid neurons and an output layer with two linear neurons. The input parameters are the consumption of hydrogen chloride, ethylene, and oxygen, and the output parameters are the concentrations of dichloroethane and CO₂.

The following metrics were used to evaluate the effectiveness of training: mean square error (MSE), error distribution histogram and linear regression. The simulation results in Simulink confirmed the adequacy of the NS operation, which allows it to be integrated into the process control system.

Keywords: neural networks, MATLAB, quality control, error back propagation, modeling, virtual analyzer, regression analysis.

Муравьева Елена Александровна

д.т.н., профессор, Уфимский государственный
нефтяной технический университет
muraveva_ea@mail.ru

Масков Газинур Гайсарович

Уфимский государственный
нефтяной технический университет
maskov.gazinur.gaz@yandex.ru

Аннотация. В статье представлена разработка нейронной сети (НС) для контроля качества дихлорэтана в среде MATLAB, а также моделирование виртуального анализатора в MATLAB Simulink. В качестве архитектуры выбрана сеть прямого распространения с обратным распространением ошибки (Feed-forward backprop), обученная по алгоритму Левенберга — Марквардта. НС включает скрытый слой с десятью сигмовидными нейронами и выходной слой с двумя линейными нейронами. Входными параметрами являются расходы хлористого водорода, этилена и кислорода, а выходными — концентрации дихлорэтана и CO₂.

Для оценки эффективности обучения использованы метрики: среднеквадратичная ошибка (MSE), гистограмма распределения ошибок и линейная регрессия. Результаты моделирования в Simulink подтвердили адекватность работы НС, что позволяет интегрировать её в систему управления технологическим процессом.

Ключевые слова: нейронные сети, MATLAB, контроль качества, обратное распространение ошибки, моделирование, виртуальный анализатор, регрессионный анализ.

Введение

Контроль качества дихлорэтана в химическом производстве требует оперативного мониторинга концентраций. В работе предложено решение на основе нейронной сети, разработанной в MATLAB. Использована архитектура Feed-forward backprop с алгоритмом обучения Левенберга-Марквардта. Модель анализирует расходы хлористого водорода, этилена и кислорода для прогнозирования концентраций дихлорэтана и CO₂.

Разработка нейросети для поддержания качества дихлорэтана в среде MATLAB и моделирование виртуального анализатора в MATLAB Simulink

Системы управления на основе искусственных нейронных сетей (НС) — один из ярких примеров управле-

ния, когда принципы функционирования и управления эффективно использованы для создания нового поколения систем управления технологическими процессами и объектами.

Виртуальные анализаторы на основе НС эффективны в случаях, когда создание адекватной аналитической модели исполнительной системы и синтез дихлорэтана затруднен. Использование виртуального анализатора для определения концентрации CO₂ и дихлорэтана в процессе окислительного хлорирования этилена имеет большую значимость, поскольку наряду с основной реакцией получения дихлорэтана возможно протекание побочных реакций глубокого окисления этилена с образованием оксидов углерода.

Для разработки виртуального анализатора используем нейронную сеть. Для построения и обучения НС вос-

пользуемся встроенным инструментом NNTool среды MATLAB [1].

Чтобы запустить NNTool, необходимо выполнить одноименную команду в командном окне MATLAB: `>>nntool`

После этого появится главное окно «Окно управления сетями и данными» (Network/DataManager). Загрузка базы данных для обучения осуществляется через импортирование из рабочей области MATLAB (Import from MATLAB workspace).

Во вкладке Network окна создания нейронной сети можно выбрать архитектуру нейронной сети (рисунок 1), диапазон входных значений (Input data), функцию тренировки сети (Training function), адаптивную функцию обучения (Adaption learning function), функцию ошибки (Performance function), количество слоев нейронной сети (Number of Layers) и для каждого слоя указано m количество нейронов (Number of neurons) и активационную функцию (Transfer Function).

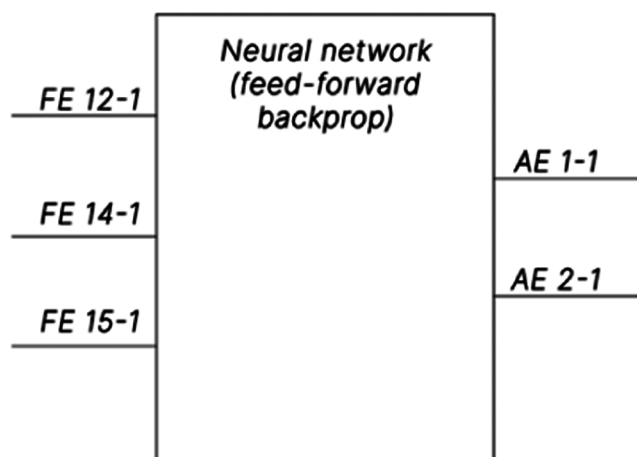


Рис. 1. Концептуальная модель нейронной сети для определения концентраций дихлорэтана и CO_2

Архитектура нейронной сети — это структура и организация нейронов, слоев и связей в нейросети [4,3]. Она определяет, как данные протекают через сеть, какие операции выполняются на каждом уровне и как нейроны взаимодействуют друг с другом для выполнения конкретной задачи, такой как классификация, регрессия или обработка изображений. Архитектура нейронной сети может включать в себя различные типы слоев, функций активации, методы оптимизации и другие параметры, которые определяют ее поведение и способность к обучению на определенном наборе данных.

Существует несколько различных архитектур слоев нейронов в нейронных сетях, которые могут быть использованы для различных задач машинного обучения.

Некоторые из наиболее распространенных видов архитектур слоев нейронов включают в себя:

1. Полносвязанные слои (Dense layers): в полносвязных слоях каждый нейрон связан с каждым нейроном предыдущего и последующего слоев. Это классическая архитектура нейронных сетей.
2. Сверточные слои (Convolutional layers): сверточные нейронные сети обычно используются для анализа изображений. Сверточные слои применяют фильтры к входным данным для извлечения признаков.
3. Рекуррентные слои (Recurrent layers): рекуррентные нейронные сети обрабатывают последовательные данные, такие как текст или временные ряды. Рекуррентные слои имеют память и могут учитывать контекст из предыдущих шагов.
4. Пулинг слои (Pooling layers): пулинг слои используются в сверточных нейронных сетях для уменьшения размерности данных и извлечения наиболее важных признаков.
5. Слой нормализации (Normalization layers): слои нормализации могут помочь в стабилизации обучения нейронных сетей путем нормализации входных данных. Это лишь несколько примеров архитектур слоев нейронов, которые могут быть использованы в нейронных сетях для различных целей и задач машинного обучения.
6. Архитектура нейронной сети — Feed-forward backprop (прямого распространения сигнала) представляет собой один из типов нейронных сетей, который используется для обучения и предсказания.

Эта архитектура состоит из входных, скрытых и выходных слоев нейронов [2]. В ней нет циклических связей, то есть информация движется только в одном направлении — от входных нейронов к выходным.

В процессе обучения сети используется метод обратного распространения ошибки (backpropagation), который позволяет корректировать веса связей между нейронами для минимизации ошибки в выходном слое.

Для решения поставленной задачи выбрана сеть Feed-forward backprop с десятью сигмовидными нейронами скрытого слоя и двумя линейными нейронами выходного слоя. Алгоритм обучения — Левенберга — Маркардта.

Рассмотрим подробнее сеть с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки (Feed-forward backprop)[1]. Для обучения описанной нейронной сети был использован алгоритм обратного распространения ошибки (backpropagation). Этот метод обучения многослойной нейронной сети называется обобщенным дельта правилом. Этот алгоритм определя-

ет два «потока» в сети. Входные сигналы двигаются в прямом направлении, в результате чего мы получаем выходной сигнал, из которого мы получаем значение ошибки. Величина ошибки движется в обратном направлении, в результате происходит корректировка весовых коэффициентов связей сети.

На (рисунке 2) представлена схема архитектуры нейронной сети, где расходы хлористого водорода, этилена и кислорода (FE 12-1, FE 14-1, FE 15-1) — входные параметры, а концентрации дихлорэтана и CO₂ (AE 1-1 и AE 2-1) — выходные параметры.

Во время обучения нейронной сети можно наблюдать, как изменяется ошибка обучения.

График среднеквадратичной ошибки (MSE, Mean Squared Error) в MATLAB [2] показывает изменение сред-

неквадратичной ошибки нейросети во время процесса обучения. Этот график представляет собой зависимость MSE от числа итераций (эпох обучения). Высокий MSE означает, что нейросеть делает много ошибок в предсказаниях, низкий MSE — что нейросеть делает меньше ошибок и обучается более эффективно (рисунок 3).

С помощью гистограммы можно визуализировать ошибки, разницу между целевыми и прогнозируемыми значениями после обучения нейронной сети с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки (рисунок 3).

График гистограммы среднеквадратичной ошибки нейронной сети в MATLAB [1] обычно показывает распределение ошибок на различных участках данных. Каждый столбец гистограммы представляет собой ча-

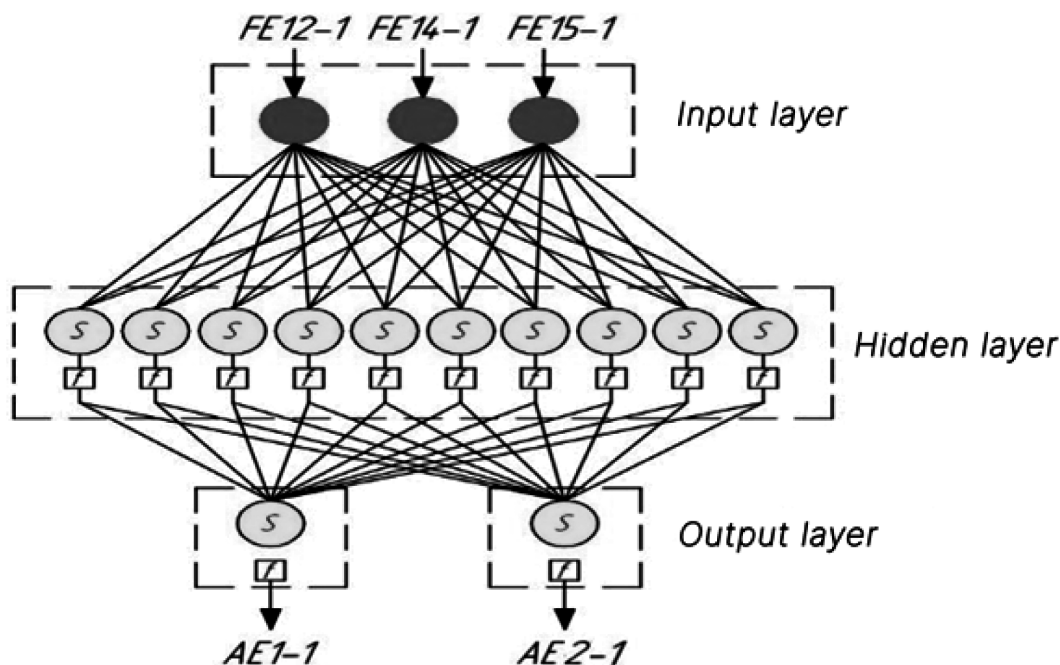


Рис. 2. Структура построения нейронной сети с 10 нейронами

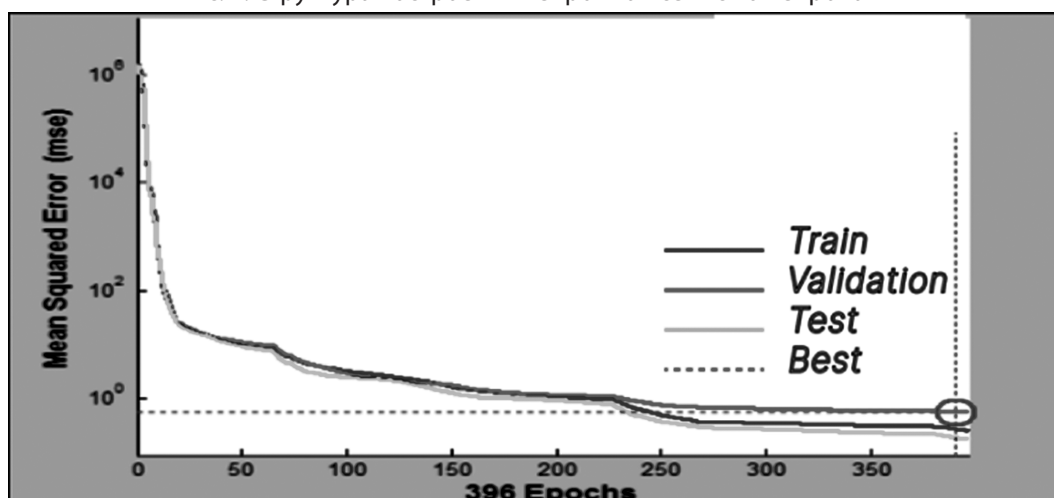


Рис. 3. Средняя квадратичная ошибка

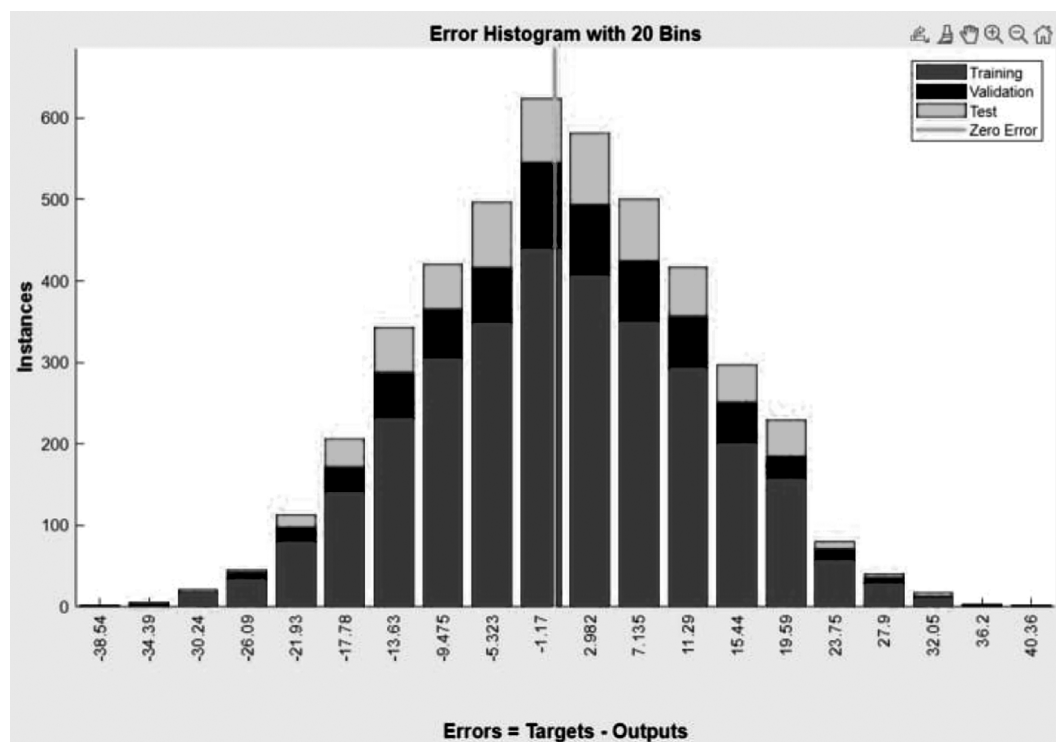


Рис. 4. Гистограмма среднеквадратичных ошибок

стоту ошибок, попадающих в определенный диапазон значений. Чем выше столбец, тем больше ошибок в этом диапазоне значений (рисунок 4).

Ячейки — это количество вертикальных полос, которые находятся на графике. Общий диапазон ошибок здесь разделен на 20 ячеек меньшего размера.

Ось X представляет количество выборок из набора данных, которые находятся в определенной ячейке. Например, в середине графика находится ячейка, соответствующая ошибке $-1,17$, и высота этой ячейки для обучающего набора данных находится ниже, но близко к 400, а для проверки и тестового набора данных — между 500 и 600. Это означает, что во многих выборках, из разных наборов, данных ошибка лежит в следующем диапазоне.

Нулевая линия ошибки, соответствующая нулевому значению ошибки на оси ошибок (т.е. оси X). В этом случае нулевая точка ошибки попадает под ячейку с центром $-1,17$.

Еще одним инструментом оценки результата обучения нейронной сети может быть функция регрессии результатов [5-7]. График регрессии отображает сетевые прогнозы (выходные данные) в отношении ответов (целевых) для наборов обучения, проверки и тестов (рисунок 5).

Так как точки лежат на линии прогноза в линейной регрессии в Neural Network Toolbox, то можно сделать

вывод о том, что модель адекватно описывает зависимость между входными и выходными параметрами. Это означает, что прогнозы модели совпадают с реальными значениями. Таким образом, можно считать модель очень точной и надежной.

Моделирование нейронной сети осуществляется с помощью среды моделирования Simulink, входящей в состав MATLAB [7].

Для того, чтобы построить модель в Simulink, достаточно импортировать натренированную модель в соответствующем пункте меню (рисунок 6).

Для того, чтобы задать входные и выходные значения был использован функциональный блок Constant. Объединение двух входных значений произведено с помощью блока Mux. Для отображения выходных значений использован блок Display. Разъединение одного сигнала в два произведено с помощью блока Demux (рисунок 7).

Моделирование нейронной сети показало адекватный результат концентраций дихлорэтана и CO_2 , что говорит о возможности дальнейшего подключения нейросетевого блока к нечеткой системе управления для регулирования клапанов подачи расходов хлористого водорода, кислорода и этилена.

Заключение

Таким образом, создана нейросетевая модель для контроля качества дихлорэтана. Модель успешно пред-

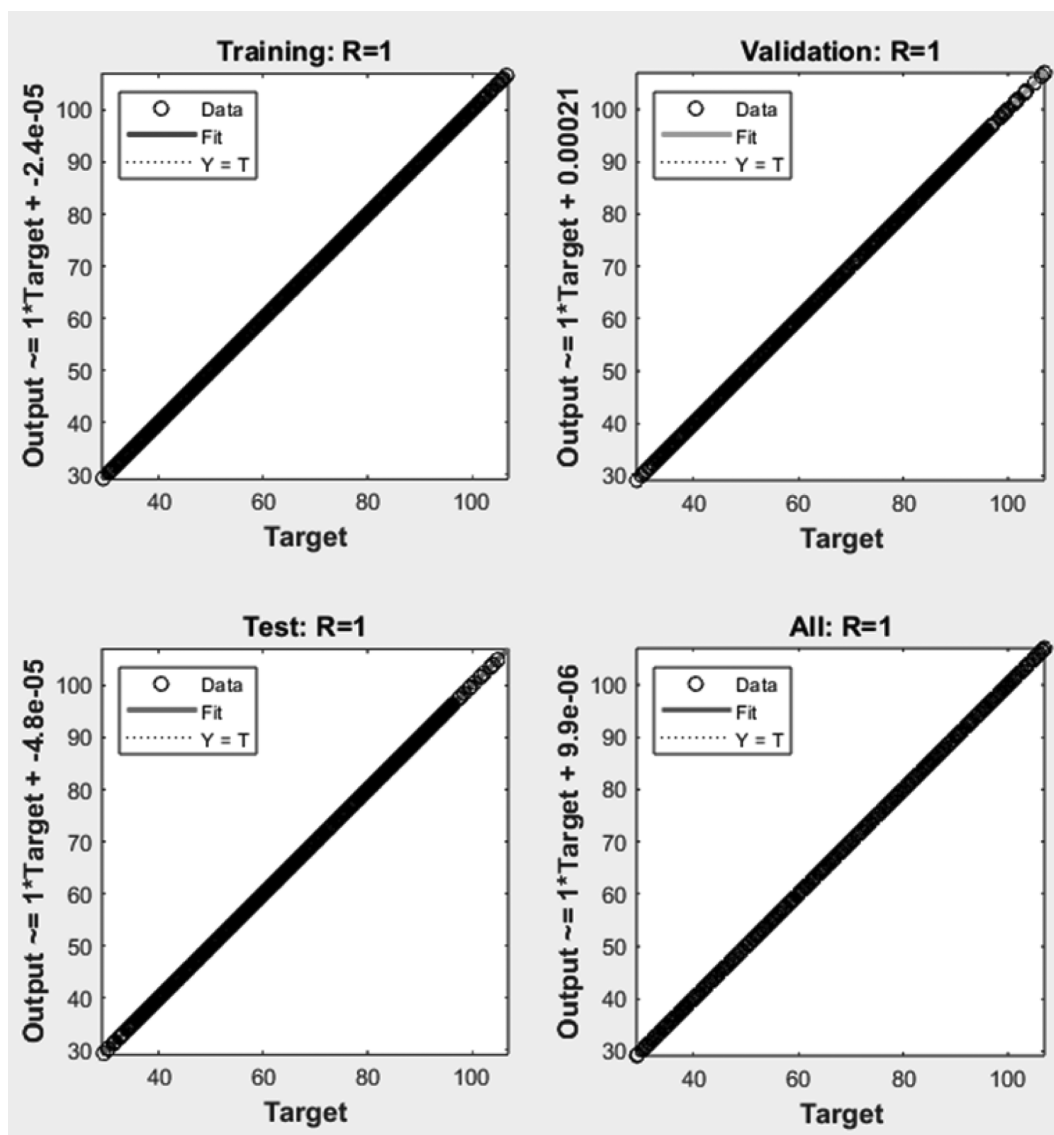


Рис. 5. Линейная регрессия НС



Рис. 6. Экспорт НС в Simulink

сказывает концентрации веществ на основе данных о расходах. Результаты показали, что такой подход можно использовать для автоматизации химического производства.

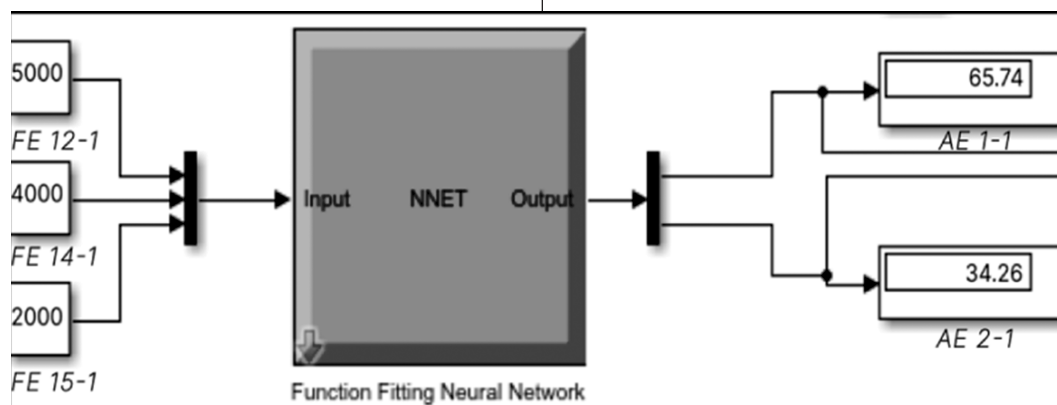


Рис. 7. Структурная схема созданной нейронной сети в среде Simulink

ЛИТЕРАТУРА

1. Муравьева Е.А. Интегрированные системы проектирования и управления [Текст]: учеб. пособие / Муравьева Е.А. — Уфа: Изд-во УГНТУ, 2011. — 354 с.
2. Такиуллина Д.Т. Разработка автоматизированной системы управления процессом окислительного хлорирования этилена в цехе №29 акционерного общества «Башкирская содовая компания» / Журнал «Наука и инновационные технологии», Кыргызстан. DOI:10.33942/sit042333, 2023. — 4 с.
3. Слетнев, М.С. Усовершенствованное управление (АРС) нефтехимическим производством на основе многоуровневой нейросетевой системы поддержки принятия решений / М.С. Слетнев, А.П. Веревкин // Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания. — 2012. — № 13. — С. 81–84. — EDNRPTNTV.
4. Методы робастного, нейро-нечёткого и адаптивного управления / под общ.ред. К.А. Пупкова. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. — 245 с.
5. MATLABbasedbooks (Neural/Fuzzy) — Аннотированный список книг по нечёткой логике и нейронным сетям, ориентированный на использование MATLAB [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.mathworks.com/support/books/index.jsp?category=9> (дата обращения: 04.02.2022).
6. Штовба, С.Д. Проектирование нечетких классификаторов в системе MATLAB / С.Д. Штовба, О.Д. Панкевич // Труды Всероссийской научной конференции «Проектирование научных и инженерных приложений в системе MATLAB». — М., 2004. — 1318–1335 с.
7. Штовба, С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. — М.: горячая линия — Телеком, 2007. — 288 с.

© Муравьева Елена Александровна (muraveva_ea@mail.ru); Масков Газинур Гайсарович (maskov.gazinur.gaz@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ФОКУСИРУЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

INFORMATION SYSTEM FOR QUALITY ANALYSIS OF FOCUSING OPTICAL SYSTEMS

S. Pavlov

Summary. This paper presents the development of an information system for the quality analysis of focusing optical assemblies. The work addresses the current need to automate quality control of optical systems in both mass-production and laboratory environments. Key production and laboratory use cases for the information system have been systematically identified. A review and justification of quality-control methods were carried out, leading to the selection of optimal techniques that ensure both versatility and minimal hardware requirements. The hardware and software components of the system were defined, and the overall system architecture was designed. A software module was implemented in MATLAB, and the system was experimentally tested and validated on real optical samples. Finally, recommendations for further refinement and prospects for industrial deployment are outlined.

Keywords: point spread function (PSF), energy concentration function, information system, automated system, image processing, optical system, MATLAB.

Павлов Сергей Николаевич

Национальный исследовательский университет
«Московский институт электронной техники»,
г. Зеленоград
sergp4v10v@yandex.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается разработка информационной системы для анализа качества фокусирующих оптических систем. Работа направлена на решение актуальной задачи автоматизации контроля качества оптических систем в условиях серийного и лабораторного производства. Проведен обзор и обоснование методов контроля качества, выбраны оптимальные методы, обеспечивающие универсальность и минимизацию аппаратных затрат. Определен состав аппаратных и программных модулей системы, разработана архитектура информационной системы. Реализован программный модуль на базе MATLAB, проведены экспериментальные проверки и валидация системы на реальных оптических образцах. В заключении сформулированы рекомендации по её доработке и перспективам внедрения.

Ключевые слова: функция рассеяния точки, функция концентрации энергии, информационная система, автоматизированная система, обработка изображений, оптическая система, MATLAB.

Введение

Современные оптические системы играют важную роль в спутниковой съемке, дистанционном зондировании Земли. В условиях серийного и лабораторного производства контроль качества таких систем требует оперативности, минимизации затрат и универсальности методов анализа.

Цель заключается в разработке информационной системы для оперативного контроля качества оптических систем. Данная система предназначена для автоматизации процесса контроля качества оптических элементов, таких как линзы, объективы и асферические зеркала, в условиях серийного производства. Основная цель создания системы — обеспечить оперативный и автоматизированный анализ качества оптических систем с минимальными аппаратными затратами. Система автоматизирует процесс анализа изображения «пятна рассеяния» оптической системы, что позволяет минимизировать вмешательство оператора. Важной особенностью системы является универсальность, поддержка любых фокусирующих оптических компонентов при вводе соответствующих параметров.

Анализ

Анализ литературы подтвердил практическую востребованность методов ФРТ и ФКЭ. В работе [1] описана установка «КИЗО-ФРТ», которая использует минимальное оборудование и программный модуль для автоматической обработки изображений, предоставляя оператору готовые графики и численные метрики. В работе [2] описан пакет OPAL-PC, который также использует минимальную оптическую часть и единую графическую оболочку для анализа различных параметров оптических систем. В работе [3] описана информационная система, которая практически совпадает по архитектуре с техническим заданием, используя минимальный набор оборудования и программный модуль для автоматического построения ФРТ и выдачи ключевых числовых метрик. Таким образом, анализ литературы подтвердил обоснованность выбора прямых количественных методов ФРТ и ФКЭ.

Проектирование архитектуры информационной системы

Система включает в себя источник когерентного излучения (лазер) и коллиматор для формирования пло-

ского волнового фронта, исследуемый оптический объект, а также блок обработки изображения, состоящий из монохромной фотокамеры (с матрицей KAI-02150 [4]) и вычислительной станции с установленным специализированным программным обеспечением. Программные компоненты разделены на две подсистемы: первая отвечает за управление камерой и сбор изображений, а вторая, реализованная в виде MATLAB-скрипта, занимается обработкой изображений, расчетом метрических характеристик и визуализацией результатов.

Реализация программного модуля обработки изображения

Ниже на рисунке 1 приведена блок-схема работы алгоритма:

Алгоритм состоит из следующих этапов:

Выбор кадра, чтение из файла; приведение интенсивности к диапазону 0–100 % для исключения влияния абсолютных уровней яркости [5] [6]; подавление фона двухрежимным подходом — либо по тёмному кадру, либо пороговым значением [7] [8] [9]; вычисление центра пятна либо как максимума интенсивности, либо по центру масс (моментам); усреднение интенсивности по радиальным зонам для получения эффективного профиля ФРТ [1]; накопление энергии внутри концентрических колец вокруг центра [1]; вывод графиков зависимостей и численных метрик.

Входные данные: черно-белое изображение пятна рассеяния (матрица интенсивностей) и параметры эксперимента: длина волны λ , фокусное расстояние f , диаметр апертуры D , размер пикселя p .

Итогом работы алгоритма является сформированный набор выходных данных: визуализации, графики, зависимости и численные метрики.

Экспериментальная проверка

Эксперимент 1: объектив камеры спутниковой фотосъемки

На рисунке 2 показано полученное фото светящейся точки в фокусе исследуемой оптической системы.

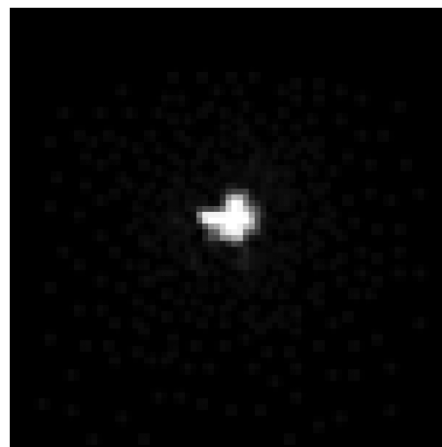


Рис. 2. Полученное фото светящейся точки в фокусе исследуемой оптической системы

Для каждого эксперимента задаются базовые оптические характеристики системы. В первом эксперименте эти параметры имеют следующие значения, приведенные в таблице 1.

Таблица 1.

Параметры оптической системы для эксперимента

Параметр	Обозначение	Значение
Длина волны	λ	632 нм
Фокусное расстояние	f	1100 мм
Диаметр апертуры	D	130 мм
Размер пикселя	p	5,5 мкм

Функция рассеяния точки (ФРТ) и её метрики:

Экспериментальная ФРТ (радиальный профиль интенсивности пятна) строится усреднением яркости пикселей в концентрических кольцах вокруг центра. Сравнение полученной кривой с идеальным профилем Эйри (теоретической ФРТ) представлено на рисунке 3.

Численные оценки приведены в таблице 2.

Преувеличение ШПП в эксперименте ($\approx 1\%$) указывает на минимальное расфокусирование или слабые аберрации. Превышение экспериментального СРП по сравнению с идеальным свидетельствует о расширении

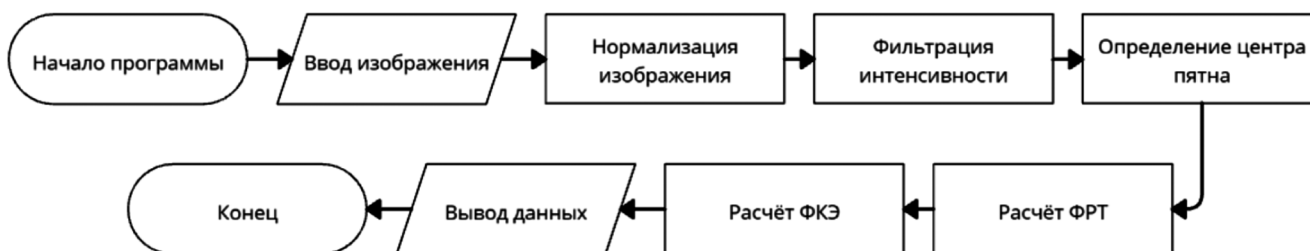


Рис. 1. Блок-схема работы алгоритма

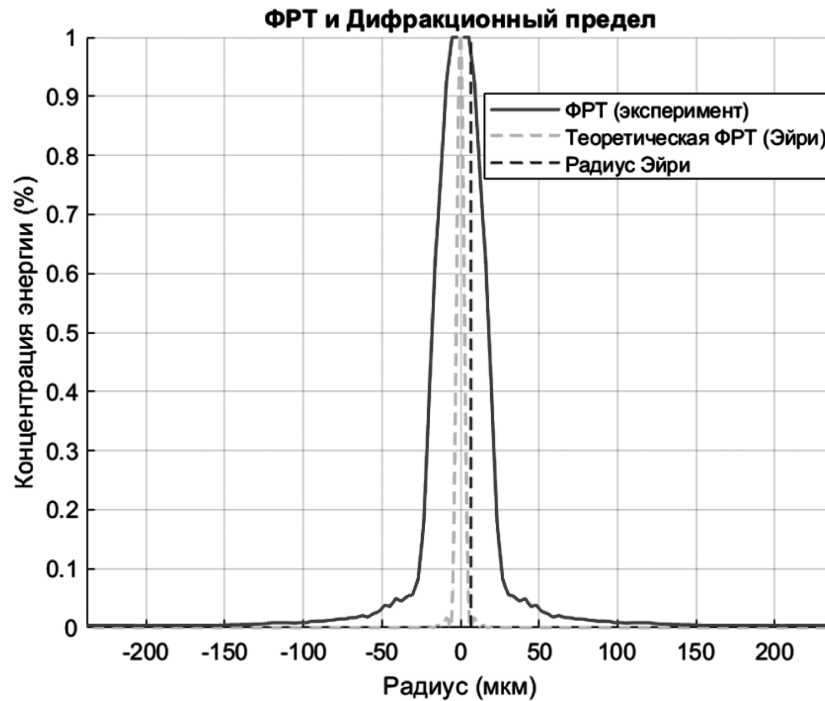


Рис. 3. Зависимости экспериментальная и теоретическая ФРТ

Таблица 2.

Численные оценки

Параметр	Ширина на Полувысоте Пика (ШПП)	Среднеквадратичный Радиус Пятна (СРП)	Коэффициент пик-к-боковому лепестку (КПЛ)
Эксперимент	36,14 мкм	22,11 мкм	1,31
Теория	35,75 мкм	13,21 мкм	4,20

пятна из-за aberrаций или микроскопических дефектов поверхности элементов, что снижает контраст и ухудшает детализацию. КПЛ показывает, насколько центральный пик доминирует над первым боковым лепестком. Низкое значение КПЛ в эксперименте указывает на выраженные боковые лепестки (более сильные, чем в идеале), что свидетельствует о нерезкости краёв главного пятна и потенциальном снижении контрастности.

Функция концентрации энергии (ФКЭ) и её метрики:

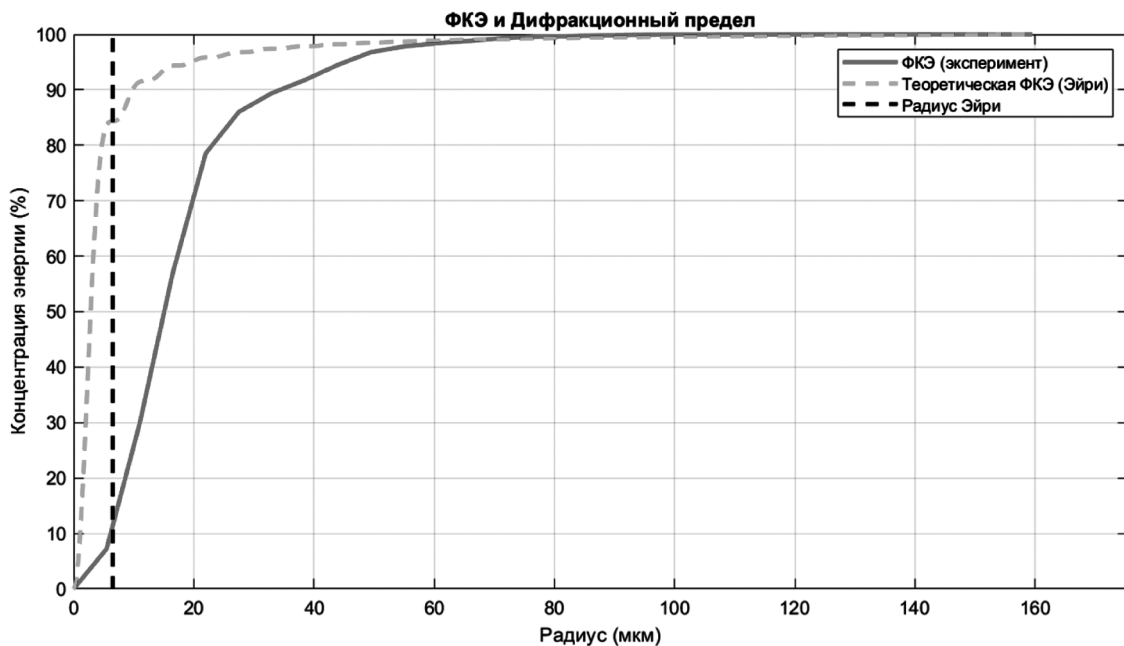


Рис. 4. Экспериментальная и теоретическая ФКЭ

Далее на рисунке 4 представлена функция концентрации энергии (ФКЭ), на котором показаны экспериментальная и теоретическая кривые накопленной энергии $EE(r)$ в зависимости от радиуса.

Численные оценки приведены в таблице 3:
Таблица 3.

Численные оценки			
Параметр	Максимальный градиент dEE/dr	Точки перегиба ($d^2EE/dr^2 = 0$)	Нормированный коэффициент крутизны
Эксперимент	4,519 %/мкм при $r = 11,00$ мкм	от 11,00 до 126,50 мкм	0,182
Теория	24,760 %/мкм при $r = 2,24$ мкм	2,24 до 159,02 мкм	

Максимальный градиент профиля ФКЭ показывает скорость нарастания накопленной энергии по мере удаления от центра. Экспериментальный максимум на порядок ниже идеального, что указывает на гораздо более пологое нарастание энергии. Практически это означает, что край пятна «размыт», и большая часть энергии аккумулируется медленнее, чем в чисто дифракционном случае. В эксперименте зона смены режима накопления энергии сдвинута наружу и расширена, что указывает на появление и усиление боковых колец и артефактов, формируемых аберрациями. Расширенная область перегибов свидетельствует о нерезкой границе пятна и неоднородном распределении энергии. Точки перегиба отражают сложную структуру профиля (боковые кольца и вентильные эффекты). Нормированный коэффициент крутизны 0,182 означает, что скорость накопления энергии в реальной системе менее 20 % от теоретической, что подчёркивает влияние оптических дефектов.

Локальная крутизна на уровнях EE_{50} , EE_{80} , EE_{90} :
Полученные значения представлены в таблице 4.

Таблица 4.
Параметры оптической системы для эксперимента

Уровень EE	Эксперимент, %/мкм	Теория, %/мкм
50 %	4,454	23,411
80 %	2,325	7,453
90 %	0,508	2,021

В каждом «интервале» роста накопленной энергии система отстает от дифракционного предела, подтверждая наличие оптических дефектов или смещения фокуса. Градиенты на уровнях $EE_{50/80/90}$ показывают локальное изменение крутизны, позволяя выявлять зоны с наибольшими потерями фокусировки.

Эксперимент 2: асферическое зеркало (сегмент эллипсоида)

На рисунке 5 показано изображение светящегося пятна в фокусе асферического зеркала.



Рис. 5. Изображение светящегося пятна в фокусе асферического зеркала

Во втором эксперименте параметры приведены в таблице 5:

Таблица 5.
Параметры оптической системы для эксперимента

Параметр	Обозначение	Значение
Длина волны	λ	632 нм
Фокусное расстояние	f	600 мм
Диаметр апертуры	D	160 мм
Размер пикселя	p	5,5 мкм

Данный сегмент асферического зеркала эллипсоидной формы будет применён для фокусирования света, а не как элемент оптической системы для получения изображений.

Функция рассеяния точки (ФРТ) и её метрики (см. рис. 6).

Численные оценки приведены в таблице 6:
Таблица 6.

Численные оценки			
Параметр	Ширина на Полувысоте Пика (ШПП)	Среднеквадратичный Радиус Пятна (СРП)	Коэффициент пик-к-боковому лепестку (КПЛ)
Эксперимент	16,49 мкм	66,85 мкм	2,96
Теория	14,30 мкм	13,28 мкм	4,21

Увеличенное значение ШПП говорит о небольшом расширении главного пика из-за астигматизма или микронеровностей поверхности зеркала. Превосходство СРП экспериментальной величины указывает на «разма-

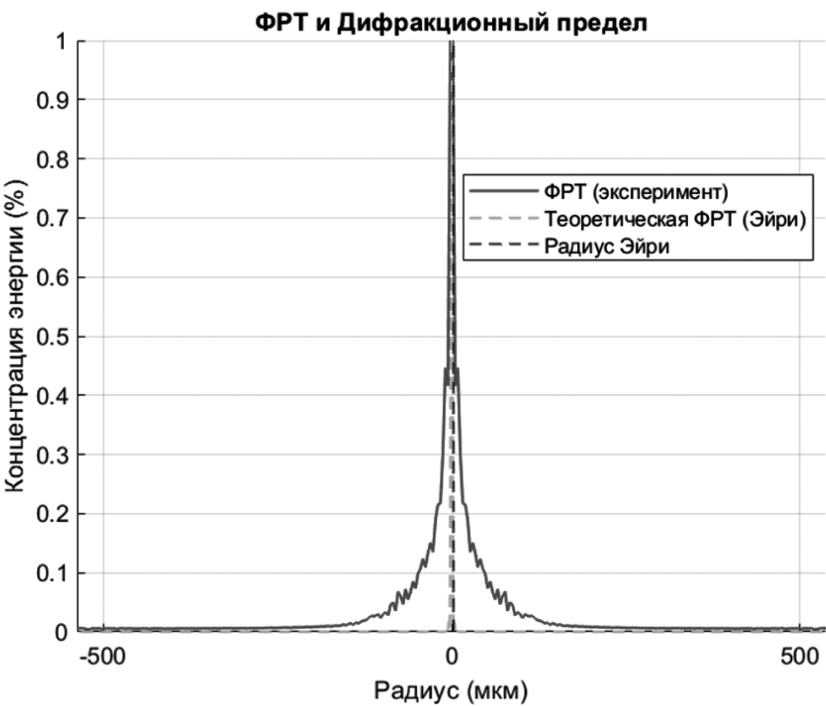


Рис. 6. Зависимости экспериментальная и теоретическая ФРТ

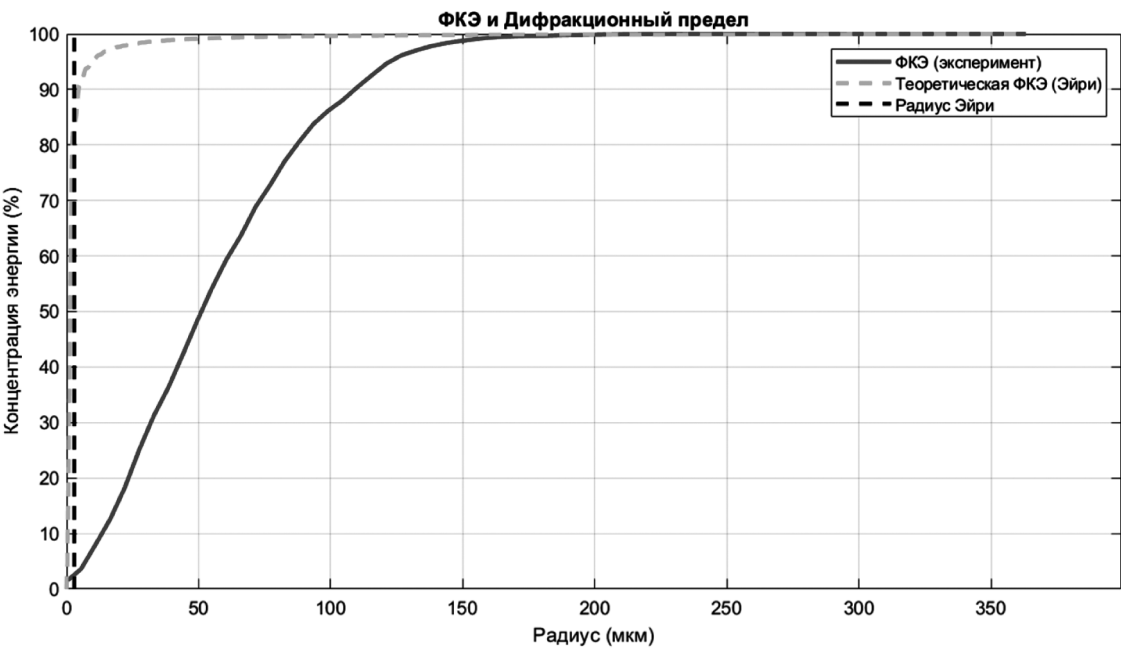


Рис. 7. Экспериментальная и теоретическая ФКЭ

зывание» пятна, обусловленное значительными аберрациями асферической поверхности. Пониженное значение КПЛ свидетельствует о заметных боковых лепестках, что снижает способность зеркала фокусировать свет и указывает на необходимость шлифовки для коррекции формы зеркала.

Функция концентрации энергии (ФКЭ) и её метрики (см. рис. 7).

Численные оценки приведены в таблице 7.

Таблица 7.

Численные оценки			
Параметр	Максимальный градиент dEE/dr	Точки перегиба ($d^2EE/dr^2 = 0$)	Нормированный коэффициент крутизны
Эксперимент	1,180 %/мкм при $r = 27,50$ мкм	от 22,00 мкм до 361,91 мкм	0,022
Теория	52,478 %/мкм при $r = 1,09$ мкм	от 0,73 мкм до 109,00 мкм	

Практически в 45 раз меньший экспериментальный градиент указывает на пологое накопление энергии в центральной области. Это характерно для систем с выраженными аберрациями или смещённым фокусом — энергия «растекается» дальше от центра, и пик накопления смещается наружу. Экспериментальная зона перегибов существенно расширена и смещена наружу. Это свидетельствует о множественных боковых кольцах и сложной структуре аберраций асферического зеркала, приводящих к неоднородному накоплению энергии. Реальная ФКЭ растёт на 2,2 % от идеальной скорости.

Локальная крутизна на уровнях EE50, EE80, EE90:

Полученные значения представлены в таблице 8.

Таблица 8.

Параметры оптической системы для эксперимента

Уровень EE	Эксперимент, %/мкм	Теория, %/мкм
50 %	1,062	48,341
80 %	0,631	15,374
90 %	0,403	3,198

Во всех трёх точках экспериментальные крутизны существенно ниже идеальных, что указывает на равномерное, но замедленное распределение энергии по радиусу.

Заключение

В результате разработки была создана информационная система, полностью отвечающая исходной цели — обеспечение оперативного и автоматизированного анализа качества фокусирующих оптических систем в условиях серийного производства при минимальных затратах на аппаратное обеспечение. Предложенное решение охватывает весь цикл: от формирования коллимированного луча и съёмки «пятна рассеяния» до вычисления количественных метрик и наглядной визуализации результатов.

Проведённые эксперименты на объективе для спутниковой фотосъёмки и на сегменте асферического зеркала подтвердили, что разработанная система способна выявлять аберрации, влияющие на энергетическую концентрацию и форму пятна рассеяния. Полученные численные данные позволяют не только сравнивать между собой различные образцы, но и отслеживать динамику качества на производственной линии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирилловский, В.К., Точилина, Т.В. Оптические измерения. Часть 2–6. — СПб.: Университет ИТМО, 2016–2017.
2. Электронный учебно-методический комплекс по оптическим измерениям. — БНТУ, 2014.
3. Сцепуро, Н.Г., и др. Определение функции рассеяния точки компьютерно-синтезированной линзы. — 2020.
4. Оптические системы [Электронный ресурс] // Астрономер. — URL: http://www.old.astronomer.ru/data/library/books/sikoruk/glava1/1_7.htm
5. How do I normalize the pixel value of an image to 0–1? [Электронный ресурс] // Stack Overflow. — URL: <https://stackoverflow.com/questions/70783357/how-do-i-normalize-the-pixel-value-of-an-image-to-01>
6. Data normalization [Электронный ресурс] // The Node. — URL: <https://thenode.biologists.com/data-normalization/research/>
7. Dark Frame Calibration [Электронный ресурс] // Diffraction Limited. — URL: https://cdn.diffractionlimited.com/help/maximdl/Dark_Frame_Calibration.htm
8. Capturing and Using Dark Frames [Электронный ресурс] // SharpCap. — URL: https://docs.sharpcap.co.uk/4.0/29_CapturingandUsingDarkFrames.htm
9. Why is there no image noise in my webcam dark frame photographs? [Электронный ресурс] // Stack Exchange. — URL: <https://photo.stackexchange.com/questions/56153/why-is-there-no-image-noise-in-my-webcam-dark-frame>

© Павлов Сергей Николаевич (sergp4v10v@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ЛИКВИДНОСТЬ ПРЕДПРИЯТИЯ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ: ЭВОЛЮЦИЯ ПОНЯТИЙ И СОВРЕМЕННЫЕ РИСКИ

CORPORATE LIQUIDITY AS A MANAGEMENT OBJECT: EVOLUTION OF CONCEPTS AND CONTEMPORARY RISKS

A. Rubtsov

Summary. The paper addresses theoretical and practical aspects of managing corporate liquidity under high market volatility and digital business transformation. The concept of liquidity is traced from the narrow accounting view of «instant asset convertibility» to a comprehensive characteristic that includes cash-flow forecasting and strategic solvency. The need for a multi-level liquidity diagnosis—combining ratio analysis, cash-budgeting, scenario modelling and stress testing—is substantiated. Using data from listed companies, the study shows that global financial crises and rising market uncertainty drive firms to hoard cash reserves, optimise working capital and diversify short-term funding sources. The impact of Environmental, Social and Governance (ESG) factors on liquidity positions is examined. An adaptive management framework is proposed that embeds treasury operations into the enterprise risk-management system and uses digital treasury platforms to monitor balances and predict gaps in real time. Practical recommendations include establishing a precautionary cash buffer, configuring trigger indicators of cash shortfalls, and automating treasury processes to enhance financial flexibility.

Keywords: corporate liquidity; solvency; liquidity ratios; cash-flow analysis; financial crises; ESG risks; digitalisation; uncertainty.

Рубцов Артем Михайлович

системный аналитик ГК «Иннотех»;

аспирант, НИЯУ МИФИ

rubtsovartyom2010@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена теоретическим и прикладным аспектам управления ликвидностью коммерческого предприятия в условиях высокой волатильности рынков и цифровой трансформации бизнеса. Прослежена эволюция понятия ликвидности — от бухгалтерского понимания «мгновенной реализуемости активов» до комплексной характеристики, включающей прогнозирование денежных потоков (cash flow — денежный поток) и стратегическую платёжеспособность фирмы. Обоснована необходимость многоуровневой диагностики ликвидности, соединяющей коэффициентный анализ, оперативное бюджетирование движения денежных средств, сценарное моделирование и стресс-тестирование. На примере статистики публичных компаний показано, что глобальные финансовые кризисы и рост рыночной неопределённости стимулируют накопление денежных резервов, оптимизацию оборотного капитала и диверсификацию краткосрочных источников финансирования. Дополнительно рассмотрено влияние экологических, социальных и факторов корпоративного управления (Environmental, Social, Governance — ESG) на ликвидную позицию предприятий. Предложена адаптивная модель управления, интегрирующая казначейские операции в систему корпоративного управления рисками и использующая цифровые казначейские платформы (Treasury Management System — TMS) для мониторинга остатков и прогнозирования дефицитов в режиме реального времени. Раскрыты механизмы согласования графиков платежей с контрагентами, применение факторинга и динамического дисконтирования для ускорения притока средств и оптимизации условий кредитования. Практическая ценность исследования заключается в разработке рекомендаций по формированию страхового денежного буфера, настройке триггерных индикаторов кассовых разрывов и автоматизации казначейских процессов, что повышает финансовую гибкость и устойчивость организации к кризису ликвидности.

Ключевые слова: ликвидность предприятия, платёжеспособность, коэффициенты ликвидности, анализ денежных потоков, финансовые кризисы, ESG-риски, цифровизация, неопределённость.

Введение

Ликвидность предприятия традиционно рассматривается как важнейший показатель его финансового состояния наряду с платёжеспособностью. Способность компании своевременно выполнять свои обязательства определяет финансовую устойчивость и доверие со стороны кредиторов и инвесторов [1]. Исторически категория ликвидности привлекала внимание экономистов и практиков финансового менеджмента, эволюционируя от узкого понимания в бухгал-

терском балансе до широкого концепта, включающего временные и рыночные аспекты [2]. В современных условиях турбулентности деловой среды управление ликвидностью превращается в динамичный процесс, требующий учета множества факторов риска. Волатильность рынков, периодические финансовые кризисы и новые вызовы — такие как повсеместная цифровизация бизнеса и возросшее значение ESG-факторов (Environmental, Social, Governance — ESG) — усложняют поддержание оптимального уровня ликвидности. Все это обуславливает необходимость пересмотра классических подходов

к оценке ликвидности и разработки комплексных стратегий ее управления.

Цель данной работы — обобщить эволюцию взглядов на ликвидность предприятия как объект управления, проанализировать современные методы оценки ликвидности, а также выявить актуальные риски и вызовы, влияющие на ликвидность компаний. На основе этого предложены рекомендации по эффективному управлению ликвидностью в условиях высокой неопределенности внешней среды. Исследование опирается на труды отечественных и зарубежных авторов в области финансового менеджмента [1–5, 10], а также на современную практику корпоративного казначейства.

Материалы и методы

Работа носит теоретико-обзорный характер. База исследования — 11 ключевых русских и англоязычных публикаций и примеры корпоративной отчетности, приведённые в самой статье. Применены: контент-анализ научных источников, сравнительный анализ коэффициентов ликвидности и современных моделей cash-flow-прогнозирования, а также обобщение практик корпоративного казначейства.

Литературный обзор

Понятие ликвидности эволюционировало от узкого бухгалтерского показателя до многомерной категории, включающей временной аспект денежных потоков и рыночные факторы. Современные авторы выделяют три уровня: ликвидность активов, баланса и предприятия в целом. Коэффициентный анализ остаётся базовым, но его статичность требует дополнения прогнозированием cash-flow и стресс-тестами. Актуальные работы подчёркивают влияние цифровизации и ESG-повестки на потребность в гибком управлении ликвидностью.

Эволюция понятия ликвидности предприятия

Понятие «ликвидность» имеет длительную историю и постепенно расширяло свое содержание по мере развития финансовой науки. В конце XIX века термин, эквивалентный современной ликвидности, употреблялся немецкими экономистами применительно к балансу предприятия — под ним понималась способность активов быстро реализоваться за наличные средства для покрытия текущих обязательств [6]. В последующем, в классической финансовой теории ликвидность часто отождествлялась с наличием достаточного запаса оборотных (ликвидных) активов, которые могут быть обращены в деньги без существенной потери стоимости [3].

Со временем исследователи выделили несколько связанных аспектов ликвидности: ликвидность отдель-

ных активов, ликвидность баланса и ликвидность предприятия в целом [2, 5]. Ликвидность актива отражает способность конкретного вида имущества быть превращенным в денежные средства за определенный период, причем чем короче срок реализации, тем выше ликвидность данного актива [5]. Ликвидность баланса характеризует согласованность сроков превращения активов в деньги со сроками погашения обязательств предприятия [2]. Наконец, под ликвидностью предприятия обычно понимают наличие у компании достаточных средств (в различных ликвидных формах) для своевременного выполнения всех взятых на себя финансовых обязательств [3, 6].

В финансовой литературе нет единообразия в трактовках ликвидности и ее соотношения с платежеспособностью организации. Платежеспособность зачастую определяют как способность компании рассчитываться только по краткосрочным (текущим) обязательствам в срок [2]. Ликвидность же рассматривается более широко — как потенциал предприятия покрыть всю совокупность своих долгов (краткосрочных и долгосрочных) за счет превращения активов в денежную форму [3, 7]. Так, по мнению ряда авторов, предприятие считается платежеспособным, если его оборотные активы превышают краткосрочные обязательства, тогда как условием общей ликвидности (финансовой устойчивости) является превышение совокупных активов над суммарными обязательствами [3, 7]. Другими словами, недостаточная ликвидность баланса неизбежно ведет к утрате платежеспособности, однако предприятие может оставаться платежеспособным некоторое время, истощая ликвидные резервы. В современных работах предлагаются обобщенные формулировки: например, ликвидность предприятия трактуется как способность организации обеспечивать своевременное исполнение всех своих обязательств во всей обозримой перспективе функционирования [6]. В таком определении акцент сделан на факторе времени и непрерывности платежей, что связывает ликвидность с долгосрочной финансовой устойчивостью бизнеса.

Подходы к оценке ликвидности предприятия

Теория и практика выработали ряд подходов и показателей для количественной оценки ликвидности фирмы. Классический инструмент — коэффициентный анализ ликвидности баланса [1, 5]. Он базируется на группировке активов по степени их оборачиваемости в деньги и обязательств — по срокам погашения, с последующим расчетом относительных показателей. К ключевым коэффициентам ликвидности относятся: текущий коэффициент (коэффициент покрытия), быстрый коэффициент и коэффициент абсолютной ликвидности [1, 5]. Эти показатели отражают запас ликвидных средств на каждую единицу краткосрочных обязательств и по-

зволяют судить о платежных возможностях предприятия в ближайшей перспективе. Ниже приведены основные коэффициенты ликвидности и рекомендуемые ориентиры их величин (Таблица 1).

Таблица 1.

Основные коэффициенты ликвидности предприятия

Показатель (формула)	Экономический смысл	Рекомендуемое значение*
Коэффициент текущей ликвидности = $\frac{\text{Оборотные активы}}{\text{Краткосрочные обязательства}}$	Способность покрывать все текущие обязательства за счет оборотных средств	$\geq 2,0$
Коэффициент быстрой ликвидности = $\frac{\text{Оборотные активы} - \text{Запасы}}{\text{Краткосрочные обязательства}}$	Способность погасить текущие долги наиболее ликвидными активами (без учета менее ликвидных запасов)	$\geq 1,0-1,5$
Коэффициент абсолютной ликвидности = $\frac{\text{Денежные средства} + \text{Эквиваленты}}{\text{Краткосрочные обязательства}}$	Доля самых высоколиквидных активов (касса, счета) в общей сумме краткосрочных долгов	$\geq 0,2-0,25$

*Примечание: рекомендуемые значения приведены в научно-практической литературе [1, 5] и могут варьировать по отраслям.

Коэффициентный анализ обеспечивает удобный экспресс-мониторинг ликвидности, однако он имеет известные ограничения. Расчетные показатели дают статичную, кратковременную оценку, основанную на бухгалтерских данных, и не отражают динамику денежных потоков [5, 10]. Например, высокое текущее соотношение не гарантирует, что компания не столкнется с кассовыми разрывами, если значительная часть оборотных средств малоликвидна или требует длительного времени для реализации. Поэтому в дополнение к коэффициентам в арсенале финансового менеджмента широко применяется анализ ликвидности на основе денежных потоков [5, 10]. Он включает в себя составление прогноза движения денежных средств (cash flow forecasting) на будущие периоды, выявление возможных разрывов между поступлениями и выплатами, оценку минимального необходимого остатка денежных средств. Особое внимание уделяется показателю операционного денежного потока, который характеризует способность текущей деятельности генерировать достаточный объем наличности для покрытия насущных расходов и обязательств.

В современных условиях неопределенности особую роль играет сценарный анализ и стресс-тестирование ликвидности. Этот метод, изначально разработанный для банковского сектора [4], все активнее используется и нефинансовыми компаниями. Сценарный подход

предполагает оценку финансового состояния предприятия при различных гипотетических ситуациях — от оптимистичных до кризисных. Стресс-тесты моделируют экстремальные, но реалистичные шоки (внезапное падение выручки, задержка платежей от крупнейших дебиторов, рост процентных ставок, девальвация и т.п.) и позволяют оценить, выдержит ли ликвидность компании такие удары. Например, производственная фирма может спрогнозировать отток денежных средств при резком повышении цен на сырье или при временном закрытии доступа к кредитованию, чтобы определить необходимый резерв ликвидности на случай подобного сценария. Многие крупные компании после кризисов 2008 и 2020 гг. внедрили регулярное стресс-тестирование ликвидности в рамках системы риск-менеджмента [10]. Такой проактивный подход повышает готовность финансовых служб к непредвиденным ситуациям и способствует разработке планов действий (contingency planning) на случай кризиса ликвидности.

Современные вызовы ликвидности предприятия

В XXI веке управление ликвидностью осложняется целым рядом новых рисков и условий внешней среды. Во-первых, участились финансовые кризисы глобального и регионального масштаба, которые приводят к внезапному высыханию ликвидности на рынках и нарушению привычных денежных потоков. Ярким примером стал мировой кризис 2008 г., в ходе которого многие предприятия испытали острую нехватку ликвидных средств из-за падения спроса и затруднений с привлечением кредитов. Аналогично, пандемия COVID-19 в 2020 г. вызвала беспрецедентные сбои в операционной деятельности, потребовав от компаний экстренных мер по поддержанию платежеспособности. Уроком этих кризисов стало понимание необходимости создавать более значимые резервы ликвидности и планировать источники финансирования на случай форс-мажорных обстоятельств. На рис. 1 показана условная динамика доли денежных средств в активах компаний, демонстрирующая тенденцию к росту ликвидных резервов после кризисных периодов, отражающую стремление компаний создавать более значимую «подушку безопасности» на случай новых потрясений. Действительно, по данным исследований, средний коэффициент наличности (cash ratio) у публичных компаний США возрос более чем вдвое за последние несколько десятилетий — с около 10% в 1990-х до 25 % к 2020 г. [11]. Тем самым фирмы стремятся повысить свою устойчивость к будущим шокам ликвидности.

График построен по данным публичных компаний США и иллюстрирует рост средних показателей ликвидности баланса (отношение денежных средств и их эквивалентов к совокупным активам) на протяжении последних десятилетий. Серая штриховка отражает периоды



Рис. 1. Увеличение среднерыночной доли денежных средств в активах компаний после финансовых кризисов

экономических рецессий. Наблюдается явная тенденция к накоплению предприятиями большего объема денежных средств особенно после кризисов 2008 и 2020 гг., что соответствует стратегии усиления финансовой гибкости на случай новых спадов.

Во-вторых, возросла волатильность финансовых рынков и деловой среды. Колебания валютных курсов, цен на сырье, процентных ставок напрямую влияют на входящие и исходящие денежные потоки компаний. Усиление неопределенности затрудняет прогнозирование ликвидности: например, резкие скачки курса валют могут привести к нехватке оборотных средств у предприятий-импортёров, а рост ставок — удорожить обслуживание долговых обязательств. Кроме того, высокая конкуренция и ускорение бизнес-циклов требуют от компаний более гибкого управления ликвидностью, чтобы своевременно реагировать на изменения спроса и другие внешние факторы.

В-третьих, на повестку дня вышли ESG-факторы (экологические, социальные и управленческие риски), которые ранее редко соотносились с финансовой ликвидностью. Сегодня инвесторы и кредиторы всё больше внимания обращают на устойчивость бизнеса в контексте ESG. Несоответствие современным экологическим и социальным требованиям может обернуться для компании репутационными потерями, штрафами и ограничением доступа к финансированию, что косвенно создает риски для ликвидности. Например, ужесточение экологических стандартов может потребовать внезапных затрат на модернизацию производства, а социальные конфликты — привести к выплатам компенсаций и простоям. С другой стороны, приверженность ESG-принципам способна улучшить положение компании: исследования показывают, что предприятия с высокими ESG-рейтингами в целом сталкиваются с меньшими рисками, включая риск ликвидности, благодаря более доверительным отношениям с банками и инвесторами. Регуляторы финансового рынка также интегрируют ESG-риски в системы надзора — в частности, в Европе выпущены руководящие принципы, обязывающие бан-

ки учитывать ESG-риск при оценке риска ликвидности заемщиков [9]. Таким образом, аспект устойчивого развития становится неотъемлемой частью управления рисками ликвидности на современном этапе.

Наконец, цифровизация экономики вносит двойственный эффект в управление ликвидностью предприятий. С одной стороны, новые технологии предоставляют инструменты для более эффективного и оперативного контроля над денежными потоками. Появились продвинутые системы казначейства и автоматизированные платформы управления денежными средствами, которые в режиме реального времени агрегируют информацию о счетах компании, прогнозируют притоки и оттоки, оптимизируют график платежей [8]. Использование больших данных и алгоритмов машинного обучения позволяет финансовым менеджерам предугадывать кассовые разрывы и заранее принимать меры по привлечению ликвидности либо замедлению выплат. Цифровые решения (например, облачные казначейские платформы, мобильные приложения для управления счетами) повышают прозрачность и скорость финансовых операций, снижая операционные риски. С другой стороны, цифровизация рождает и новые риски: кибератаки и сбои информационных систем могут парализовать платежи; повсеместный переход в онлайн усиливает конкуренцию (напр., с финтех-компаниями), что может дестабилизировать традиционные источники доходов. Быстрая смена технологий требует дополнительных инвестиций и адаптации бизнес-процессов, отвлекая финансовые ресурсы. Таким образом, цифровая трансформация диктует необходимость адаптивного управления ликвидностью с опорой на инновации, но и с учетом потенциальных технологических угроз.

Рекомендации по управлению ликвидностью в условиях неопределённости

Для обеспечения устойчивого уровня ликвидности предприятиям необходим комплексный подход, сочетающий превентивные меры и гибкие инструменты финансирования. Во-первых, рекомендуется разработать и регулярно актуализировать политику управления ликвидностью, устанавливающую целевые ориентиры по ключевым показателям (коэффициентам ликвидности, минимальному остатку денежных средств и пр.) [1]. Такая политика должна быть встроена в общую систему финансового планирования компании и одобрена высшим руководством.

Во-вторых, важнейшим элементом является формирование достаточных резервов ликвидности с учетом специфики бизнеса. Компаниям следует поддерживать оптимальный объём высоколиквидных активов (денежные средства, краткосрочные финансовые вложения), балансируя между доходностью и риском. Избыточная

ликвидность может снижать рентабельность (за счёт упущенных возможностей инвестирования), тогда как недостаточная — повышает вероятность финансовых затруднений. Теоретически обоснованным является принцип превентивного накопления ликвидности в периоды подъёма для использования запаса в период кризиса (проявление буферной стратегии). В практике данная стратегия реализуется через создание резервных фондов, страховых счетов, приобретение высоколиквидных ценных бумаг, которые могут быть быстро проданы при потребности в наличности.

В-третьих, следует диверсифицировать источники покрытия возможного дефицита ликвидности. Эффективное управление привлечённой ликвидностью включает поддержание открытых кредитных линий в нескольких банках, использование инструментов денежного рынка (краткосрочные кредиты, овердрафты, коммерческие бумаги), договорённости о факторинге дебиторской задолженности. Наличие плана действий при кризисе ликвидности (Contingency Funding Plan) помогает быстро задействовать резервные источники финансирования: например, активировать заранее согласованную кредитную линию, провести sale-and-leaseback недвижимости либо привлечь дополнительный капитал от инвесторов. Такие планы разрабатываются на основе результатов стресс-тестирования и определяют конкретные шаги и ответственных лиц при наступлении того или иного неблагоприятного сценария [10].

В-четвёртых, рекомендуется активно внедрять цифровые инструменты для мониторинга и оптимизации ликвидности. Современные корпоративные информационные системы позволяют интегрировать казначейские функции (управление счетами, платежами, инвестициями свободных средств) в едином интерфейсе, доступном в режиме онлайн [8]. Например, системы Treasury Management System (TMS) дают сводный обзор на все банковские счета группы компаний, автоматизируют перераспределение средств между подразделениями (системы cash pooling), что минимизирует холостые остатки. Инструменты аналитики и искусственного интеллекта способны прогнозировать краткосрочные кассовые разрывы с учётом сезонности, поведения клиентов и прочих факторов [8]. В результате финансовый директор получает возможность более точно планировать ликвидность и принимать обоснованные решения — например, о временном заимствовании или, наоборот, досрочном погашении долга при избыточной ликвидности.

В-пятых, интеграция ESG-рисков в систему управления ликвидностью станет неотъемлемой частью лучших практик. Это означает, что при планировании денежных потоков и капитальных вложений необходимо учитывать потенциальные расходы, связанные с экологическими

и социальными обязательствами (штрафы, инвестиции в устойчивые технологии), а также репутационные эффекты. Компаниям, ориентированным на устойчивое развитие, проще привлечь финансирование на выгодных условиях — например, посредством зелёных облигаций или кредитов, привязанных к ESG-показателям. Таким образом, следование ESG-принципам можно рассматривать как частичную страховку от внезапных потерь ликвидности и как инструмент укрепления доверия инвесторов [9].

Наконец, ключевым фактором успеха является гибкость и оперативность финансовых служб предприятия. В условиях неопределённости планы ликвидности должны регулярно пересматриваться и корректироваться на основе новых данных о внешней среде. Рекомендуется проводить внутренний финансовый стресс-тест не реже раза в год, а при значимых изменениях (кризисных сигналах) — внеочередной анализ. Также важно выстроить эффективную коммуникацию между отделами компании: подразделения продаж, закупок, производства должны заранее информировать финансовый блок о событиях, способных повлиять на денежные потоки (крупные сделки, задержки, изменения условий контрактов). Только при таком проактивном взаимодействии руководство сможет заблаговременно принять меры для предотвращения ликвидностного дефицита.

Результаты

Систематизированы ключевые этапы эволюции понятия «ликвидность предприятия» и показана их управленческая значимость. Выявлены современные факторы — рыночная волатильность, цифровизация финансовых процессов, ESG-повестка — усиливающие требования к мониторингу ликвидности. Дано обоснование необходимости дополнения традиционного коэффициентного анализа прогнозированием денежных потоков и стресс-тестированием. Сформулированы практические рекомендации: поддерживать резервный денежный буфер, диверсифицировать краткосрочные источники финансирования, использовать цифровые инструменты казначейства для ежедневного контроля остатков.

Заключение

Ликвидность предприятия — сложная и многогранная экономическая категория, претерпевшая значительную эволюцию в понимании и подходах к управлению. От первоначального упора на статические показатели баланса концепция ликвидности расширилась до динамического анализа денежных потоков и учета временного горизонта выполнения обязательств. Современная парадигма рассматривает ликвидность как неотъемлемую часть общей финансовой устойчивости бизнеса, требующую постоянного внимания и управления.

В условиях возрастающей волатильности и неопределённости внешней среды управление ликвидностью выходит на передний план финансовой стратегии предприятий. Классические коэффициенты ликвидности по-прежнему полезны для диагностики, однако их недостаточно для принятия решений — необходима система мониторинга и планирования ликвидности, основанная на прогнозировании и стресс-тестировании. Современные вызовы — от глобальных кризисов до повестки ESG и цифровых трансформаций — требуют от финансовых директоров новых компетенций и инструментов. Компании, игнорирующие эти факторы, рискуют столкнуться с внезапными разрывами ликвидности и кризисом платежеспособности.

Для обеспечения достаточной ликвидности в долгосрочной перспективе фирмам рекомендуется следовать сбалансированному подходу, сочетающему накопление разумных резервов, диверсификацию источников финансирования и оперативное управление денежными потоками с использованием современных технологий. Интеграция управления ликвидностью в общую систему риск-менеджмента предприятия позволит заблаговременно идентифицировать угрозы и реагировать на них, поддерживая устойчивость бизнеса. Таким образом, ликвидность как объект управления сегодня — это не просто расчет нескольких коэффициентов, а комплексная работа по обеспечению финансовой гибкости и надежности компании перед лицом текущих и будущих рисков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалёв В.В. Финансовый анализ: методы и процедуры. — М.: Финансы и статистика, 2006. — 560 с.
2. Шеремет А.Д., Сайфулин Р.С. Платежеспособность и ликвидность как элементы анализа финансового состояния // Экономический анализ: теория и практика. — 2013. — № 11. — С. 64–68.
3. Маркарьян Э.А., Герасименко Г.П., Маркарьян С.Э. Финансовый анализ: учебное пособие. — 10-е изд., перераб. — М.: КноРус, 2023. — 191 с.
4. Лаврушин О.И. Банковское дело: учебник / под ред. О.И. Лаврушина. — 13-е изд., перераб. — М.: КноРус, 2023. — 630 с.
5. Ефимова О.В. Финансовый анализ: инструментальный обоснования экономических решений: учебник. — 4-е изд., испр. и доп. — М.: КноРус, 2023. — 320 с.
6. Бердникова Т.Б. Анализ и диагностика финансово-хозяйственной деятельности предприятия: учебное пособие. — М.: ИНФРА-М, 2019. — 215 с.
7. Бобылева А.С., Иванова Л.И. Финансы организаций: учебник. — М.: Юрайт, 2010. — 432 с.
8. Silsbury J. Liquidity management — the rise of the virtual account // FinTech Futures. — 2023. URL: <https://www.fintechfutures.com/digital-banking/liquidity-management-the-rise-of-the-virtual-account/> (дата обращения: 15.05.2025).
9. European Banking Authority (EBA). Guidelines on the management of ESG risks for credit institutions and investment firms (EBA/GL/2025/01). — 2025.
10. Brealey R., Myers S., Allen F., Edmans A. Principles of Corporate Finance. — 14th ed. — New York: McGraw-Hill, 2022. — 986 p.
11. Ki Y., Adhikari R. Corporate Cash Holdings and Exposure to Macroeconomic Conditions // International Journal of Financial Studies. — 2022. — Vol. 10, No. 4. — P. 105.

© Рубцов Артем Михайлович (rubtsovartyom2010@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Сакаш Ирина Юрьевна

кандидат технических наук, Красноярский
государственный аграрный университет
stella93@yandex.ru

A STUDY OF RELIABILITY INDICATORS OF LOCAL COMPUTER NETWORKS BY MEANS OF A MATHEMATICAL MODEL

I. Sakash

Summary. The need for high-quality work of information transmission networks requires the creation of mathematical models for calculating the reliability parameters of their functioning. The operation of mass service using the Markov process, which has an integer number of states, is implemented for this. The work of a local computer network, which includes various switches, is presented as a closed mass service system with waiting. The mathematical model for the analysis of the reliability of technical equipment, which contains formulas that evaluate the integrated indicators of the stable operation of the observed device, was formed. An example of a three-level network, which has two nucleus switches, two distribution switches and three access switches, is demonstrated. Modification of the components of a local computer network, which have the opportunity to appear hardware failures, is used. [4, 10] The reduction in the calculation time in the model occurs due to calculations on simpler analytical expressions and due to the lack of the need to calculate the probability of finding a mass service system in all possible conditions. The results obtained with this model are presented. They help improve the reliability of the hardware structure of local computer networks during their design, as well as when improving existing technical systems.

Keywords: local network reliability, probability, reliability model, Markov model, Kolmogorov-Chapman equation system.

Аннотация. Необходимость в высококачественной работе сетей передачи информации требует создания математических моделей вычисления параметров надежности их функционирования. Для чего реализована операция массового обслуживания при содействии Марковского алгоритма, который располагает дискретной последовательностью состояний. Деятельность локальной компьютерной сети, которая включает различные коммутаторы, продемонстрирована как замкнутая система массового обслуживания с ожиданием. Была сформирована математическая модель анализа надежности технического оборудования, которая содержит формулы, оценивающие комплексные показатели устойчивой работы наблюдаемого устройства. Продемонстрирован пример трехуровневой сети, которая обладает двумя коммутаторами ядра, двумя коммутаторами распределения и тремя коммутаторами доступа. Использована модификация составляющих локальную компьютерную сеть, у которых есть возможность появиться аппаратным сбоям. [4, 10] Сокращение времени на вычисления в модели происходит за счет проведения расчетов по более простым аналитическим выражениям и за счет отсутствия необходимости вычислять вероятности нахождения системы массового обслуживания во всех возможных состояниях. Деятельность локальной компьютерной сети, которая включает различные коммутаторы, продемонстрирована как замкнутая система массового обслуживания с ожиданием.

Ключевые слова: надежность локальных сетей, вероятность, модель надежности, Марковская модель, система уравнений Колмогорова-Чепмена.

Введение

Сети передачи данных используются практически во всех отраслях человеческой деятельности. Многие организации имеют собственные локальные сети для пересылки и хранения своих данных. Неполадки в работе сети могут привести к различным негативным последствиям. Следовательно, точный анализ характеристик надежности новых сетей необходим для создания инструментов их проектирования и поэтому это относится к важным проблемам в сфере деятельности информационных технологий. В статье разбирается расчетная математическая модель нахождения параметров надежности функционирования локальных компьютерных сетей, чтобы найти вероят-

ность их качественной работы и интервал времени, когда сеть неисправна в течение года, в зависимости от архитектуры аппаратной части [1–4]. Модель способна рассчитывать показатели надежности сетей передачи данных с всевозможным количеством различных уровней коммутаторов [2–5]. Вычисления вероятности функционирования каждого уровня архитектуры аппаратной части в отдельности для оценки показателей надежности сети в целом осуществляются на первом шаге алгоритма. Очевидно, что математическая модель может быть использована для проведения исследований в целях оптимизации архитектуры локальных компьютерных сетей как на этапе их проектирования, так и для уже функционирующих сетей.

Цель и задачи исследования

Исполнить процедуру массового обслуживания посредством Марковского процесса с целочисленным рядом состояний для определения значений надежности работы. Предложить к использованию работу локальной сети, содержащей различные коммутаторы, как замкнутую систему массового обслуживания с ожиданием. Для чего задать математическую модель диагностики надежности технического оборудования. Показать формулы для мониторинга комплексных показателей надежности работы наблюдаемого устройства. Продемонстрировать аналогичный пример. Воспользоваться теми модификациями, составляющих локальной сети, в которых есть возможность появиться аппаратным сбоям [4, 10].

Методология

1. Модель Маркова восстанавливаемого объекта

Возьмем восстанавливаемый объект, у которого есть активности отказов ν и восстановления μ .

Модель Маркова надежности объекта изображена на рис. 1.

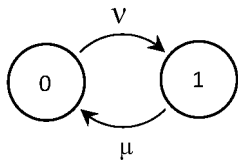


Рис. 1. Модель Маркова восстанавливаемого объекта

Математическая модель (равенства Колмогорова–Чепмена):

$$P_0(0) = 1; P_1(0) = 0; P_0(t) + P_1(t) = 1;$$

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\nu \cdot P_0(t) + \mu \cdot P_1(t);$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = \nu \cdot P_0(t) + \mu \cdot P_1(t); \rho = \frac{\nu}{\mu}.$$

Модели массового обслуживания зависят от класса случайных процессов, очерчивающих процесс обслуживания.

Модель Маркова предоставления услуг — это изложение операции массового обслуживания методом Марковской процедуры с дробным числом состояний.

Если $\rho = \frac{\nu}{\mu} \leq 1$, то имеем стационарный режим, а работа системы массового обслуживания изображается набором линейных равенств.

Равенства для стационарного режима:

$$P_0 \cdot \nu = P_1 \cdot \mu;$$

$$P_1 = \frac{\nu}{\mu} \cdot P_0 = \rho \cdot P_0;$$

$$P_0 + P_1 = 1; \rho = \frac{\nu}{\mu}.$$

Результат решения системы линейных уравнений для предложенного режима:

$$P_0 + P_1 = 1;$$

$$P_0 + \rho \cdot P_0 = 1; P_0 \cdot (1 + \rho) = 1;$$

$$P_0 = \frac{1}{1 + \rho}; P_1 = \rho \cdot P_0 = \frac{\rho}{1 + \rho}.$$

2. Модель Маркова для двух самостоятельных восстанавливаемых компонентов

Пусть два регулируемых компонента располагают равнозначными активностями сбоев и восстановлений.

Формулой распределения Пуассона можно записать время между двумя ближайшими повреждениями с параметром ν , а экспоненциальным правилом распределения с параметром μ запишем время между двумя соседними исправлениями.

Указанные объекты могут приходить в неисправное состояние и возобновлять работу без всяких условий независимо друг от друга.

На рисунке 2 изображена модель надежности Маркова.

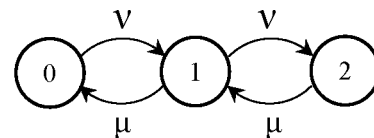


Рис. 2. Модель Маркова для двух независимых восстанавливаемых объектов

Набор равенств Колмогорова–Чепмена):

$$P_0(0) = 1; P_1(0) = 0; P_2(0) = 0;$$

$$P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) = 1;$$

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\nu \cdot P_0(t) + \mu \cdot P_1(t);$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = \nu \cdot P_0(t) - (\nu + \mu) \cdot P_1(t) + \mu \cdot P_2(t);$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = -\nu \cdot P_1(t) - \mu \cdot P_2(t); \rho = \frac{\nu}{\mu}.$$

Математическая расчетная модель для постоянного режима:

$$P_0 \cdot v = P_1 \cdot \mu;$$

$$P_1 \cdot (v + \mu) = v \cdot P_0 + \mu \cdot P_2;$$

$$P_1 \cdot v = P_2 \cdot \mu;$$

$$P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) = 1; \rho = \frac{v}{\mu}.$$

Решение системы равенств для постоянного режима:

$$P_0 \cdot v = P_1 \cdot \mu;$$

$$P_1 = \frac{v}{\mu} \cdot P_0 = \rho \cdot P_0;$$

$$P_1 \cdot (v + \mu) = v \cdot P_0 + \mu \cdot P_2;$$

$$P_1 \cdot v + P_1 \cdot \mu = v \cdot P_0 + \mu \cdot P_2;$$

$$\rho \cdot P_0 \cdot v + \rho \cdot P_0 \cdot \mu = v \cdot P_0 + \mu \cdot P_2;$$

$$\mu \cdot P_2 = -v \cdot P_0 + \rho \cdot P_0 \cdot v + \mu \cdot \rho \cdot P_0;$$

$$P_2 = -\frac{v}{\mu} \cdot P_0 + \rho^2 \cdot P_0 + \rho \cdot P_0; P_2 = \rho^2 \cdot P_0;$$

$$P_0 + \rho \cdot P_0 + \rho^2 \cdot P_0 = 1;$$

$$P_0 \cdot (1 + \rho + \rho^2) = 1; P_0 = \frac{1}{1 + \rho + \rho^2};$$

$$P_1 = \rho \cdot P_0 = \frac{\rho}{1 + \rho + \rho^2}; P_1 = \rho^2 \cdot P_0 = \frac{\rho^2}{1 + \rho + \rho^2}.$$

3. Описание модели Маркова для некоторого числа свободных настраиваемых объектов

Алгоритм работы набора свободных настраиваемых объектов, то есть коммутаторов сети, — это поочередное изменение состояний в указанный период времени Δt .

Математические методы концепции массового обслуживания можно применить для представления этого процесса.

Например, возьмем m настраиваемых объектов с одинаковыми активностями сбоя v и налаживания μ .

Формулой распределения Пуассона с параметром v можно записать время между двумя ближайшими повреждениями, а экспоненциальным правилом распределения с параметром μ запишем время между двумя соседними налаживаниями.

Перечисленные объекты могут стать нерабочими и возобновлять работу без всяких условий независимо друг от друга.

Модель надежности Маркова изображена на рисунке 3.

Система равенств Колмогорова-Чепмена:

$$P_0(0) = 1;$$

$$P_1(0) = 0;$$

$$\dots\dots\dots;$$

$$P_m(0) = 0;$$

$$\sum_{i=0}^n P_i(0) = 1; \quad (1)$$

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -v \cdot P_0(t) + \mu \cdot P_1(t);$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = v \cdot P_0(t) - (v + \mu) \cdot P_1(t) + \mu \cdot P_2(t); \rho = \frac{v}{\mu}.$$

$$\dots\dots\dots;$$

$$\frac{dP_m(t)}{dt} = v \cdot P_{m-1}(t) - \mu \cdot P_m(t).$$

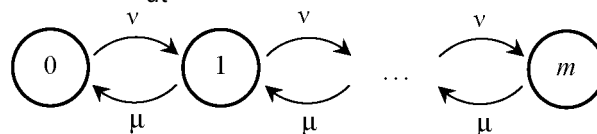


Рис. 3. Марковская модель набора свободных настраиваемых объектов

Фиксированный режим есть при $\rho = \frac{v}{\mu} \leq 1$, а система

линейных равенств показывает функционирование структуры массового обслуживания.

Итог подсчитывания переменных системы линейных равенств для i -го типа объектов получим, если записать ее в формате:

$$\begin{cases} -v_i \cdot P_0^i = \mu_i \cdot P_1^i \\ (v_i + \mu_i) \cdot P_k^i = v_i \cdot P_{k-1}^i + \mu_i \cdot P_{k+1}^i, \\ v_i \cdot P_{m_i-1}^i = \mu_i \cdot P_{m_i}^i \end{cases} \quad (2)$$

где P_k^i вероятность того, что структура находится в a_k^i -ом состоянии.

Определяем новые обозначения:

$$z_k = v_i \cdot P_k^i - \mu_i \cdot P_{k+1}^i. \quad (3)$$

В новых обозначениях система (2) выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} z_0 = 0 \\ z_{k-1} - z_k = 0; 0 < k < m_i \\ z_{m_i-1} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Оценка удовлетворения системы уравнений (2) виду (4):

$$z_0 = v_i \cdot P_0^i - \mu_i \cdot P_1^i = 0;$$

$$\begin{aligned} z_{k-1} - z_k &= v_i \cdot P_{k-1}^i - \mu_i \cdot P_k^i - v_i \cdot P_k^i + \mu_i \cdot P_{k+1}^i = \\ &= v_i \cdot P_{k-1}^i + \mu_i \cdot P_{k+2}^i - (v_i + \mu_i) \cdot P_k^i = 0 \\ z_{m_i-1} &= v_i \cdot P_{m_i-1}^i - \mu_i \cdot P_{m_i}^i = 0. \end{aligned}$$

Следовательно:

$$v_i \cdot P_k^i = \mu_i \cdot P_{k+1}^i.$$

Откуда:

$$P_{k+1}^i = \frac{v_i}{\mu_i} \cdot P_k^i.$$

Так как:

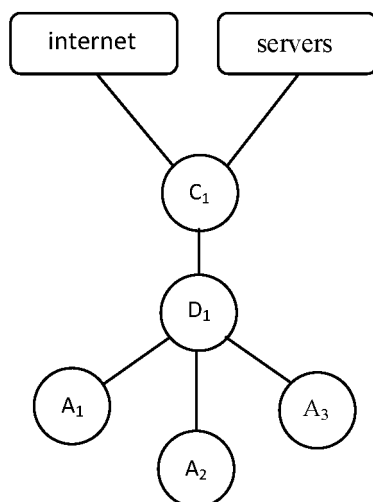
$$P_1^i = \frac{v_i}{\mu_i} \cdot P_0^i,$$

$$P_k = \rho_i^k \cdot P_0^i,$$

где $\rho = \frac{v}{\mu}$, $\rho_i = \frac{v_i}{\mu_i}$.

Если вычислить P_0^i из условия нормировки, то приобретем решение системы равенств (2) в окончательном случае:

$$P_k^i = \frac{\rho_i^k}{\sum_{k=0}^{m_i} \rho_i^k}. \quad (5)$$



4. Оценка критериев надежности локальных компьютерных сетей

m_1 коммутаторов ядра, m_2 коммутаторов распределения и m_3 коммутаторов уровня доступа включены в сеть.

Соединение с сетью Интернет и локальной сетью реализуется посредством коммутаторов ядра, которые соединены с коммутаторами распределения.

Все коммутаторы доступа соединены со всеми коммутаторами распределения, но не объединены друг с другом.

Если любой коммутатор доступа поврежден, или прерван контакт с одним из коммутаторов доступа с серверами или сетью Интернет, вся сеть целиком считается недействующей.

Активность появления неисправностей v_1 и активностью налаживания μ_1 принадлежит коммутаторам ядра.

Активность отказов v_2 и v_3 и активность восстановления μ_2 и μ_3 относятся к коммутаторам распределения и коммутаторам доступа.

Три самостоятельных набора объектов имеет в своем составе трехступенчатая сеть: набор коммутаторов ядра, набор коммутаторов распределения и набор коммутаторов уровня доступа.

Локальная сеть будет результативной при ограничении один, что хотя бы один коммутатор ядра исправен.

Сложение вероятностей от нулевой позиции до предпоследней в Марковской модели надежности набора из m_1 объектов найдем это.

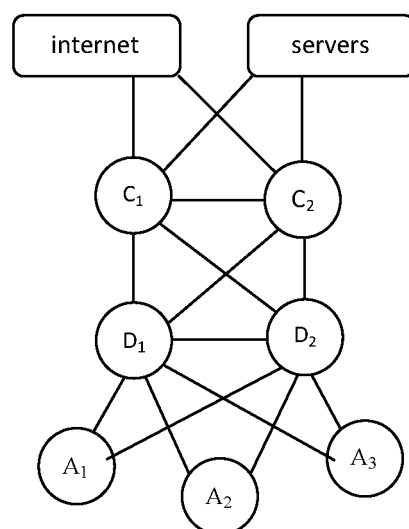


Рис. 4. Локальная сеть, включающая три уровня, один (слева) и два (справа) коммутатора ядра, один (слева) и два (справа) коммутатора распределения и по три коммутатора уровня доступа

$$P^1 = 1 - \frac{\rho_1^{m_1}}{\sum_{k=0}^{m_1} \rho_1^k},$$

где P^1 — вероятность того, что первое ограничение выполнено для трёхступенчатой локальной сети с одним ядром и одной подгруппой распределения;

m_1 — число коммутаторов ядра;

$$\rho_1 = \frac{v_1}{\mu_1};$$

$\frac{\rho_1^{m_1}}{\sum_{k=0}^{m_1} \rho_1^k}$ — вероятность конечного состояния в модели

надежности Маркова представленной группы объектов.

Если ограничение два, что, хотя бы один коммутатор распределения исправен, выполнено, то локальная сеть будет работоспособной.

Сумма вероятностей от нулевого положения до предпоследнего положения в Марковской модели надежности набора из m_2 объектов позволит найти приемлемость этой работоспособности.

$$P^2 = 1 - \frac{\rho_2^{m_2}}{\sum_{k=0}^{m_2} \rho_2^k},$$

где P^2 — вероятность осуществления второго ограничения работоспособности трёхступенчатой локальной сети с ядром и одной подгруппой распределения;

m_2 — количество коммутаторов распределения;

$$\rho_2 = \frac{v_2}{\mu_2};$$

$\frac{\rho_2^{m_2}}{\sum_{k=0}^{m_2} \rho_2^k}$ — вероятность последнего состояния в моде-

ли надежности Маркова описанной группы объектов.

Вероятность нулевого положения в Марковской модели надежности набора из m_3 объектов покажет допустимость этой работоспособности.

$$P^3 = \frac{1}{\sum_{k=0}^{m_3} \rho_3^k},$$

где P^3 — вероятность реализации ограничения три работоспособности трёхступенчатой локальной сети с одним ядром и одной подгруппой распределения;

m_3 — число коммутаторов доступа;

$$\rho_3 = \frac{v_3}{\mu_3}.$$

Формула в окончательном виде для нахождения вероятности функционирования трёхступенчатой сети.

$$P_{\text{net}} = P^1 \cdot P^2 \cdot P^3 = \left(1 - \frac{\rho_1^{m_1}}{\sum_{k=0}^{m_1} \rho_1^k}\right) \cdot \left(1 - \frac{\rho_2^{m_2}}{\sum_{k=0}^{m_2} \rho_2^k}\right) \cdot \frac{1}{\sum_{k=0}^{m_3} \rho_3^k}. \quad (6)$$

Пример. Представим трёхступенчатую сеть, которая обладает одним коммутатором ядра, одним коммутатором распределения и тремя коммутаторами доступа (рис. 4 слева) ($m_1 = 1, m_2 = 1, m_3 = 3$).

Дополним данную сеть вторым коммутатором ядра и вторым коммутатором распределения, так как наша цель усовершенствовать выносливость сети (рис. 4 справа) ($m_1 = 2, m_2 = 2, m_3 = 3$).

Активность сбоев коммутатора ядра — $v_1 = \frac{1}{8760} \text{ ч}^{-1}$ (в среднем коммутатор ядра бывает неисправным один раз в год), а активность отладок — $\mu_1 = \frac{1}{24} \text{ ч}^{-1}$ (отладка коммутатора ядра происходит в течение одних суток в среднем).

Активность сбоев коммутатора распределения — $v_2 = \frac{1}{8760} \text{ ч}^{-1}$, а активность работоспособности — $\mu_2 = \frac{1}{8760} \text{ ч}^{-1}$.

Активность выходов из строя коммутатора доступа — $v_3 = \frac{1}{8760} \text{ ч}^{-1}$, а активность его ремонта — $\mu_3 = 1 \text{ ч}^{-1}$ (коррекция коммутатора занимает в среднем один час).

Уместно проанализировать показатели надежности сети до и после ее обновления (коэффициент исправности сети равен вероятности безотказной работы).

При заданных активностях выходов из строя и восстановлений:

$$\rho_1 = \frac{v_1}{\mu_1} = \frac{1}{365}; \quad \rho_2 = \frac{v_2}{\mu_2} = \frac{1}{1460}; \quad \rho_3 = \frac{v_3}{\mu_3} = \frac{1}{8760}.$$

Вероятность высокоустойчивой работы сети до модернизации определяется по выражению (6) при $m_1 = 1, m_2 = 1, m_3 = 3$.

$$P_{\text{net}} = p^1 \cdot p^2 \cdot p^3 =$$

$$= \left(1 - \frac{p_1^2}{1 + p_1 + p_1^2}\right) \cdot \left(1 - \frac{p_2^2}{1 + p_2 + p_2^2}\right) \cdot \frac{1}{1 + p_3} =$$

$$= 0,996471.$$

После усовершенствования (при $m_1 = 2, m_2 = 2, m_3 = 3$):

$$P_{\text{net}} = p^1 \cdot p^2 \cdot p^3 =$$

$$= \left(1 - \frac{p_1^2}{1 + p_1 + p_1^2}\right) \cdot \left(1 - \frac{p_2^2}{1 + p_2 + p_2^2}\right) \cdot \frac{1}{1 + p_3} =$$

$$= 0,999878.$$

Повышение усредненного числа часов неисправности сети в год найдем по формуле:

$$8760 \cdot (1 - k_{\text{ntt}}).$$

Менее 31 часа неработоспособности сети в год получаем до усовершенствования, а после — около 1 часа в год.

Заключение

Вероятность работоспособности локальных компьютерных сетей не для всей системы в целом, а сначала для отдельных уровней архитектуры аппаратной части можно оценить с помощью представленной в статье математической модели.

Это обстоятельство дает ряд преимуществ при дальнейшем использовании математической модели в алгоритмах оптимизации в качестве либо целевой функции, либо ограничения.

Сокращение времени на вычисления происходит за счет, во-первых, проведения расчетов по более простым аналитическим выражениям, а во-вторых, за счет отсутствия необходимости вычислять вероятности нахождения системы массового обслуживания во всех возможных состояниях.

Результаты, полученные с помощью представленной модели, способствуют в большей степени воздействовать на надежность структуры аппаратной части локальных сетей во время их проектирования и при усовершенствовании уже имеющихся технических систем.

ЛИТЕРАТУРА

- Доброхвалов М. О. и др. Анализ подходов к моделированию систем массового обслуживания // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. № 5. С. 56–64.
- Вадейко, В.С. Манько А.В. Марковская модель надежности // Белорусский национальный технический университет, Факультет информационных технологий и робототехники. Минск: БНТУ. 2022. С. 222–225.
- Оразов М.Ш., Аннамурадов М.Т., Вепев Ш.В. Исследование Марковских моделей обслуживания // Молодой ученый. 2022. № 49 (444). С. 26–28.
- Копейка Е.А., Вербин А.В. Методический подход оценивания вероятности безотказной работы сложных технических систем с учетом характеристик системы контроля на основе байесовской сети доверия // Труды МАИ. 2023. № 128. DOI: 10.34759/trd-2023-128-22.
- Сивопляс М.А. Марковская модель безопасности технического обслуживания сложной техники // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 49–53.
- Бобков С.П., Астраханцева И.А., Волков В.С. Имитационное моделирование системы массового обслуживания с целью анализа ее работы // Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение. 2021. №3 (67). С. 58–62.
- Ретюнских С.Н. Способ оценки структурной надёжности вычислительных компьютерных сетей. // Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение. 2022. №2. С. 86–91.
- Беккалиева К.С. Исследование проблем надежности в сетях // Молодой ученый. 2023. № 49 (496). С. 22–24.
- Кремер, Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика / Н.Ш. Кремер, Москва: Издательство Юрайт, 2023. 538 с.
- Расулов М.М. Оценка надежности программного обеспечения // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. N 6 (62). С. 112–116.
- А.В., Хизриев У.И. Исследование программного продукта по критериям надёжности // Современные научные исследования и инновации. 2022. № 11 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2022/11/98945> (дата обращения: 10.04.2024).
- Qiu N. et al. Infinite-failure Software Reliability Models Based on Non-homogeneous Markov Processes // Research Square. November 2023. Pp. 1–32. DOI:10.21203/rs.3.rs-3507541/v1
- Sama U., Kumar A. A software reliability model incorporating fault removal efficiency and it's release policy // Computational Statistics. November 2023. DOI:10.1007/s00180-023-01430-9
- Eze N., Ejikeme A., Guha K. RFID library management software dependability through reliable fault-detection and fault correction procedures // Microsystem Technologies. February 2024. DOI:10.1007/s00542-023-05607-6
- Wang J., Zhang C. An Open-Source Software Reliability Model Considering Learning Factors and Stochastically Introduced Faults // Applied Sciences. January 2024. DOI:10.3390/app14020708

© Сакаш Ирина Юрьевна (stella93@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РЕАЛИЗАЦИЯ СЦЕНАРНОГО АНАЛИЗА В СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

IMPLEMENTATION OF SCENARIO ANALYSIS IN DECISION SUPPORT SYSTEMS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES

A. Sitnikov

Summary. The article examines the application of scenario analysis in decision support systems using artificial intelligence technologies. It describes the system architecture, including machine learning, analytics, and user interface modules. The importance of flexibility and adaptability of models for operating under high uncertainty is emphasized. Practical examples of the approach's use across different industries are provided, along with promising development directions such as multi-agent systems and reinforcement learning.

Keywords: scenario analysis, risk management, decision support systems, artificial intelligence, machine learning, risk forecasting, intelligent control systems.

Ситников Артем Дмитриевич

Аспирант,

Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина

sitnikovad@lipetskcity.ru

Аннотация. В статье рассматривается применение сценарного анализа в системах поддержки принятия решений с использованием технологий искусственного интеллекта. Описана архитектура системы поддержки принятия решений, которая включает модули машинного обучения, аналитики и пользовательского интерфейса. Актуальность обусловлена гибкостью и адаптивностью искусственного интеллекта для работы в условиях неопределенности. Приведены примеры практического использования описанной архитектуры в различных отраслях, а также перспективные направления развития, такие как мультиагентные системы и обучение с подкреплением.

Ключевые слова: сценарный анализ, управление рисками, системы поддержки принятия решений, искусственный интеллект, машинное обучение, прогнозирование рисков, интеллектуальные системы управления.

Введение

В современных условиях принятие управленческих решений в организациях осуществляется в обстановке постоянной неопределенности, вызванной как высокими темпами технологических изменений, так и нестабильностью макроэкономических и геополитических факторов. Традиционные методологии, основанные на детерминированных моделях прогнозирования и статических предположениях, нередко оказываются недостаточно гибкими при столкновении с быстро меняющейся рыночной конъюнктурой. В этой связи необходимым становится применение сценарного анализа, позволяющего учитывать различные варианты развития событий и рассматривать широкий спектр возможных исходов.

Система поддержки принятия решений (СППР) для управления рисками со сценарным анализом строится как многоуровневая архитектура. Выделяются уровни хранения данных, аналитики и интерфейса пользователя. На уровне данных собирается информация из внутренних источников (например, операционные и финансовые данные организации) и внешних (рынок, регуляторные показатели и др.), а также хранится база

сценариев и знаний по рискам. На уровне аналитики расположены модули обработки данных, моделирования и машинного обучения, выполняющие расчет рисков по различным сценариям. Данные поступают из хранилищ на аналитический уровень, где обрабатываются моделями и ИИ-алгоритмами, после чего результаты (прогнозы, метрики риска, рекомендации) отображаются на интерфейсе. Такая модульная архитектура позволяет независимо масштабировать хранилище данных, аналитический движок или интерфейс по мере роста потребностей организации [1].

В условиях динамичных рынков и многофакторных процессов повышается потребность в инструментах, способных не просто генерировать единичный прогноз, а формировать спектр сценариев с учетом влияния многочисленных внешних и внутренних переменных.

В настоящей работе проведено комплексное рассмотрение сценарного анализа как составной части интеллектуальной СППР, где механизмы прогнозирования и генерации сценариев интегрированы с алгоритмами ИИ и ориентированы на автоматизированную обработку больших данных. Предлагаемая концепция интеграции подразумевает построение архитектуры, в которой мо-

дули машинного обучения взаимодействуют с блоками аналитики и формируют различные варианты развития ситуации на основе детальной оценки рисков, трендов и переходных процессов.

Архитектура интеллектуальной системы поддержки принятия решений

Важнейшим компонентом интеллектуальной СППР, ориентированной на сценарный анализ, является блок машинного обучения. Функции блока машинного обучения включают в себя:

- 1) прогнозирование ключевых переменных (например, объема спроса, цен, валютных курсов) с использованием нейронных сетей, методов градиентного бустинга и других алгоритмов, способных обрабатывать большие массивы исторических данных;
- 2) выделение латентных факторов (скрытых паттернов), влияющих на исследуемый процесс;
- 3) оперативное обновление моделей с учетом вновь поступающей информации, что особенно важно в высокочастотных бизнес-средах.

Для обеспечения гибкости системы и мультифакторного учета возможных риск-событий целесообразно интегрировать параллельные механизмы генерации сценариев, каждый из которых может опираться на различные предположения и источники данных. Так, один модуль формирует «оптимистичный» сценарий на основе допущения о росте спроса, стабильной геополитической обстановке и снижении издержек на ресурсы, а другой «пессимистичный» сценарий, учитывая возможность снижения ликвидности, обострение конкуренции и рост цен на сырье. Совокупность сформированных сценариев проходит процедуру фильтрации и оценки вероятностей, которая может выполняться с использованием нечетких логических правил или марковских цепей [2].

В качестве примера можно рассмотреть ситуацию, в которой производственная компания стремится повысить эффективность управления цепочками поставок. Основная проблема связана с неопределенностью спроса и многочисленными факторами, влияющими на объемы продаж: сезонность, изменения цен на сырье, деятельность конкурентов, макроэкономические колебания и новости рынка. Перед руководством стоит задача оптимизировать уровни запасов, снизить затраты на логистику и более точно прогнозировать спрос. Для достижения этих целей компания внедряет систему поддержки принятия решений, использующую технологии искусственного интеллекта и ориентированную на сценарный анализ.

Первым этапом становится сбор и предварительная обработка данных. Система получает историческую

информацию о продажах, ценах на сырье и готовую продукцию, сведения о состоянии макроэкономики, отчеты аналитических агентств, а также данные о сезонных и погодных факторах. Параллельно производится фильтрация и чистка, удаляются пропуски и неточности, а числовые показатели нормализуются. Если в систему добавляются модули обработки естественного языка, то еще одним источником информации становятся новости, отчеты и упоминания в соцсетях, из которых можно извлекать сигналы о возможных изменениях спроса.

Затем формируется архитектура, в которой ключевыми элементами служат модуль сбора данных, модуль машинного обучения, модуль сценарного анализа и удобный интерфейс для пользователей. В модуле машинного обучения используются современные алгоритмы для прогнозирования, например нейронные сети типа LSTM или методы градиентного бустинга, позволяющие находить нелинейные зависимости и анализировать большие массивы исторической статистики. Полученные предсказания применяются в модуле сценарного анализа, где моделируются различные варианты развития ситуации, включая оптимистичный, базовый и пессимистичный [3]. Каждый сценарий описывает, с какими темпами может изменяться спрос и какие факторы окажут решающее влияние: рост цен на сырье, снижение покупательной способности, логистические сбои или конкуренция.

После этого система рассчитывает, как тот или иной сценарий отразится на потребностях в сырье, уровне производственных мощностей, размере складских запасов и объемах необходимых логистических операций. Анализируются возможные «узкие места», будь то недостаточная пропускная способность складов или риск избыточных запасов. На основе результатов формируются рекомендации для разных ветвей развития событий: в какой момент следует закупить дополнительные партии сырья, когда целесообразно масштабировать производство, как распределять ресурсы между регионами, чтобы снизить операционные издержки и не допустить дефицита товаров. Интерфейс системы визуализирует прогнозы, демонстрирует динамику ключевых показателей и позволяет менеджерам оперативно вносить корректировки, если фактические показатели начинают отклоняться от плановых [4, 5].

Основными преимуществами такого подхода становятся повышение точности прогнозирования спроса и сокращение затрат за счет более взвешенного управления запасами и логистикой. Сценарный анализ дает компании гибкость: она может заранее подготовить «план Б» и не упустить возможности роста при благоприятных обстоятельствах. Если в реальном времени появляются новости о колебаниях цен на сырье или неблагоприятные макроэкономические отчеты, система быстро

пересматривает прогнозы и обновляет сценарии. Менеджмент таким образом получает актуальные рекомендации и может предотвратить негативные последствия, за счет чего сохраняется и даже усиливается конкурентное преимущество. Подобная система не только делает принятие решений более научно обоснованным, но и ускоряет весь процесс, позволяя своевременно реагировать на внешние сигналы и снижать риски, связанные с неопределенностью рынка.

Главной проблемой остается интерпретируемость результатов, поскольку методы глубокого обучения часто рассматриваются как «черный ящик» [6]. Для повышения степени доверия к рекомендациям со стороны менеджмента системы поддержки принятия решений все чаще включают Explainable AI (XAI) механизмы, позволяющие пролить свет на логику, лежащую в основе прогноза и выбора сценария. Это повышает прозрачность процесса и дает возможность проводить валидацию моделей в случае, если исходные данные под-

вержены шуму. Схема архитектуры системы поддержки принятия решений с применением искусственного интеллекта представлена на рисунке 1.

В рамках описанной архитектуры можно выделить несколько основных модулей:

- аналитический модуль (ядро системы, реализующее сценарный анализ). Он обрабатывает входные данные и сценарии, выполняет расчет показателей риска (например, финансовых потерь, вероятностей наступления событий) для каждого сценария. Часто содержит библиотеку моделей (финансовых, статистических), механизм «what-if» анализа и модуль оценки последствий сценариев;
- модуль машинного обучения (ML) отвечает за построение предиктивных моделей риска на основе исторических данных. ML-алгоритмы могут прогнозировать вероятности наступления рисков событий, тренды показателей риска или классифицировать сценарии по уровню угрозы. Напри-

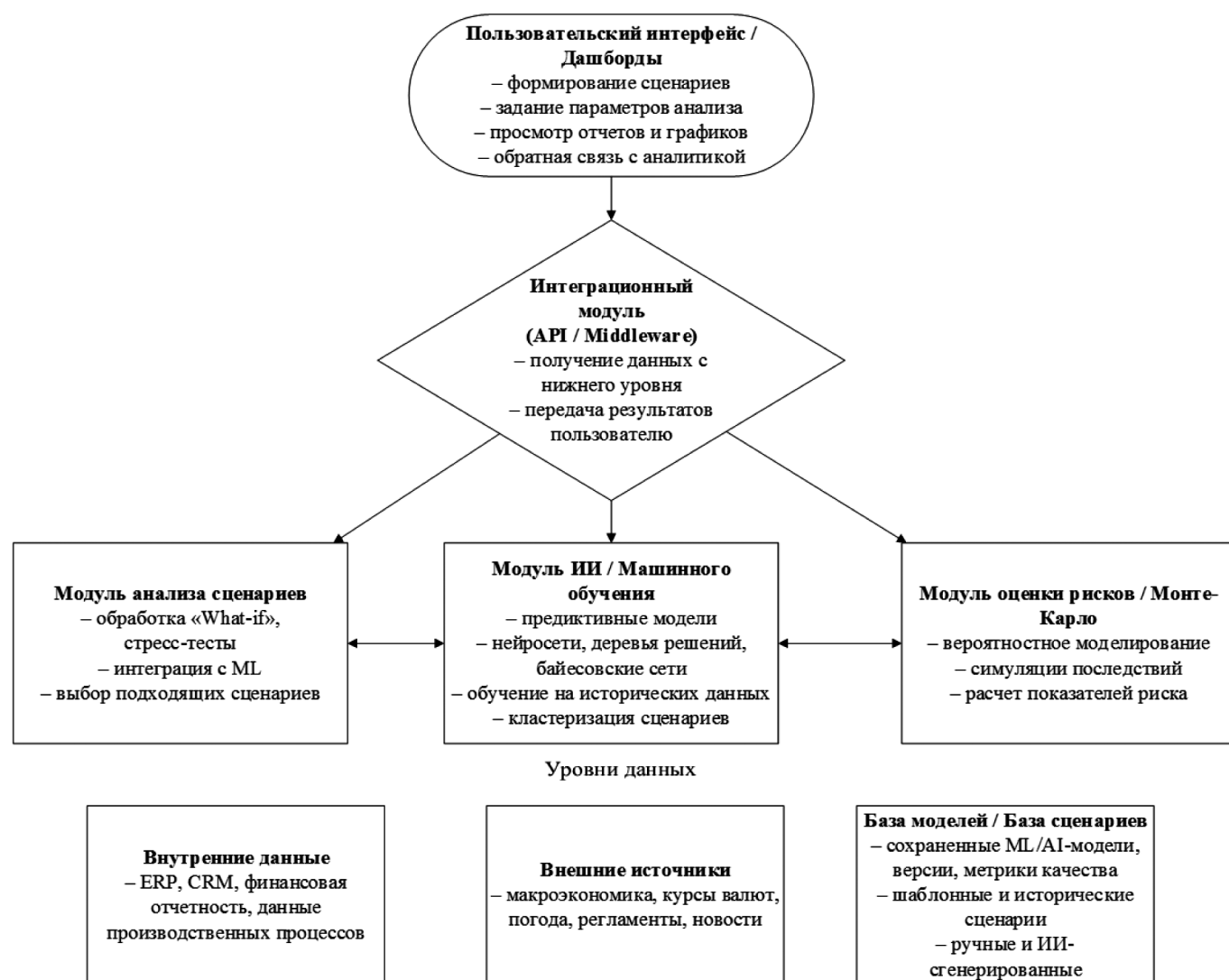


Рис. 1. Архитектура системы поддержки принятия решений с применением искусственного интеллекта

мер, обученные модели (деревья решений, нейронные сети и др.) оценивают влияние сочетания факторов риска на исходы. Модуль машинного обучения (ML) интегрируется с аналитическим, он может как поставлять прогнозы для сценарного расчета, так и обучаться на результатах моделирования сценариев [7, 8].

- база данных сценариев является хранилищем, где сохраняются описания возможных сценариев развития событий и связанные с ними параметры. Каждый сценарий содержит набор допущений (значения факторов риска, внешние условия). В базе накапливаются как predetermined сценарии (например, «наихудший случай», «базовый случай», стресс-тесты), так и созданные пользователями или сгенерированные ИИ. Накопленная библиотека сценариев позволяет быстро выбирать или комбинировать сценарии для анализа, а также сравнивать результаты по разным сценариям.

— интерфейс пользователя включает панели управления и визуализации для взаимодействия с системой. Через интерфейс риск-менеджеры формулируют сценарии (задают параметры или выбирают из базы), запускают анализ и просматривают результаты. Интерфейс обычно реализует интерактивные дашборды, графики и отчеты, показывающие, например, распределение потенциальных убытков по сценариям, уровни вероятности рисков и рекомендации по реагированию. Важна обратная связь: пользователь может корректировать сценарий и сразу видеть, как меняются результаты. Интуитивный UI повышает эффективность использования системы, позволяя быстро исследовать множество сценариев и находить «узкие места» в стратегии. Ключевые модули системы представлены на рисунке 2.

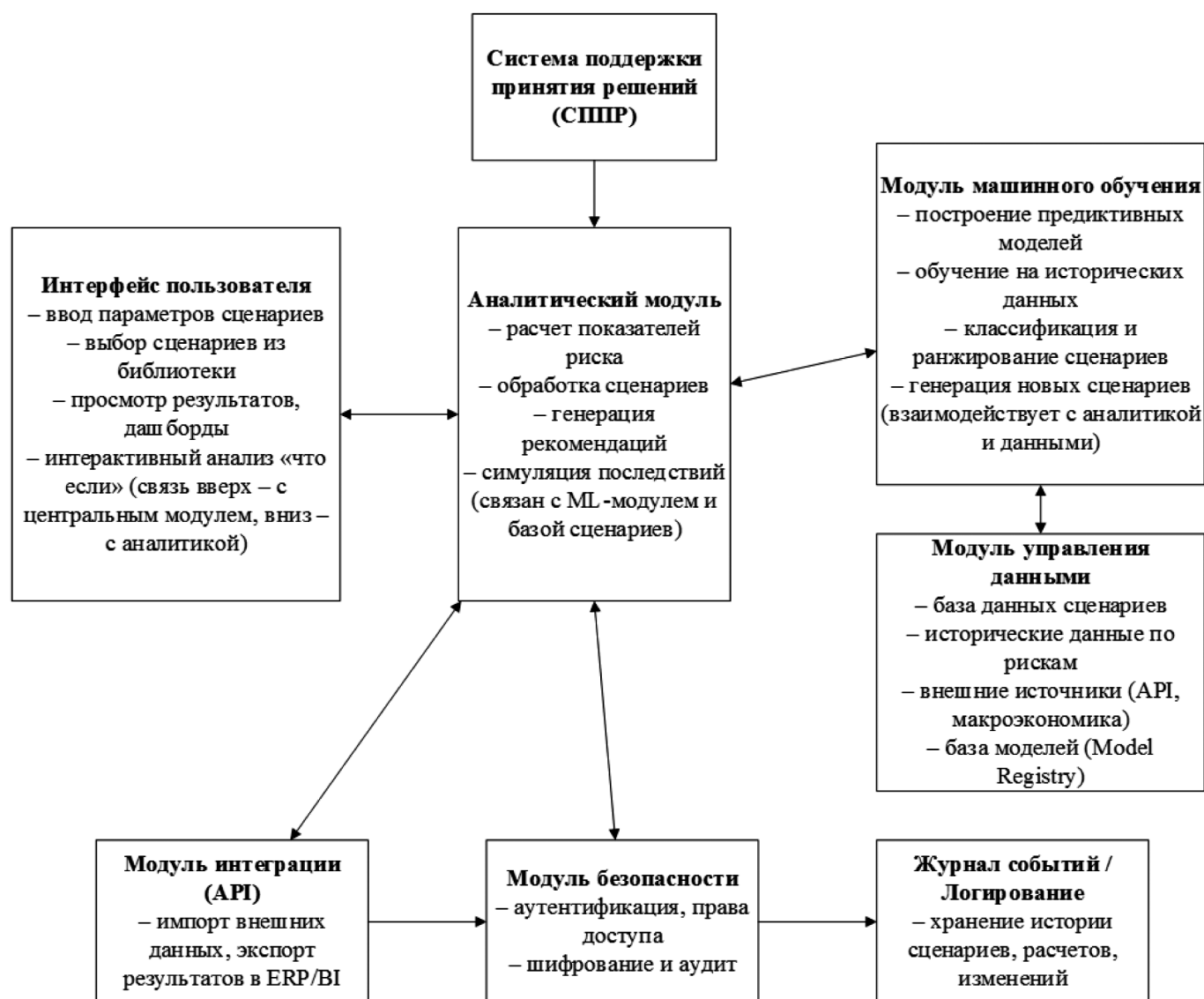


Рис. 2. Ключевые модули системы поддержки принятия решений с применением искусственного интеллекта

Кроме этих ключевых компонентов, в системе могут присутствовать дополнительные модули. Например, модуль интеграции данных для автоматической загрузки актуальной информации (финансовой, рыночной, производственной) из внешних и внутренних источников в хранилище. Также может быть модуль управления оповещениями, который отслеживает результаты анализа и сигнализирует ответственным лицам о достижении критических порогов риска (например, вероятности дефолта выше заданного уровня). Все модули взаимодействуют через четко определенные интерфейсы и API, обеспечивая целостный поток данных от источников до принятия решений.

Реализация сценарного анализа с применением искусственного интеллекта

Методы сценарного анализа в контексте управления рисками предполагают формирование множества правдоподобных сценариев будущего и оценку их влияния на организацию. Классический подход включает выявление ключевых факторов риска и допущений, конструирование альтернативных сценариев (например, оптимистичный, пессимистичный, наиболее вероятный), а затем моделирование последствий каждого из них [9].

С внедрением ИИ этот процесс значительно расширяется, что позволяет современным системам генерировать тысячи сценариев автоматически и просчитывать их практически в реальном времени. Ниже перечислены основные подходы и технологии, используемые в таком СППР:

- вероятностные графовые модели, например, байесовские сети, широко применяются для анализа риска. Они позволяют смоделировать причинно-следственные связи между событиями и факторами риска. Узлы сети представляют отдельные риски или показатели, а ребра — зависимости между ними. На основе заданных или обученных вероятностей байесовская сеть может вычислять вероятность наступления важного события (например, сбоя в поставках) с учетом различных сочетаний факторов (что фактически соответствует анализу сценариев «если X и Y, то риск Z»). Преимущество данного подхода позволяет учитывать неполноту данных (неопределенность) и обновлять оценки риска по мере поступления новой информации. В сценарном анализе Bayesian сети помогают оценивать, как изменится совокупный риск, если определенный фактор примет экстремальное значение;
- метод Монте-Карло (инструмент количественного анализа рисков). Он основан на многократном случайном моделировании развития событий при заданных распределениях неопределенности. В системе это реализовано как модуль симу-

ляции, который генерирует тысячи реализаций сценария с разными сочетаниями случайных факторов и вычисляет итоги для каждого случая. Результатом является распределение возможных исходов и вероятность тех или иных убытков [10]. Например, для сценария «кризис на рынке сбыта» Монте-Карло позволит рассчитать распределение возможных финансовых потерь (ожидаемое значение, худший допустимый случай с 95%-доверительной вероятностью и т.д.).

Таким образом, вместо детерминированного прогноза система выдает стохастическую оценку риска, что дает более полную картину неопределенности и помогает готовить планы на случай разных ситуаций. Монте-Карло анализ в управлении рисками применяется повсеместно — от оценки проектов (сроки, затраты) до финансового портфельного анализа.

Модели машинного обучения используются для выявления сложных нелинейных зависимостей и прогнозирования рисков на основе исторических данных. В зависимости от задачи применяются различные алгоритмы: классические методы (решающие деревья, случайный лес, градиентный бустинг) для оценки важности факторов и предсказания вероятностей; временные модели (например, рекуррентные нейронные сети LSTM) для прогнозирования динамики рискованных показателей во времени. Алгоритм анализа рисков представлен на рисунке 3.

Нейронные сети глубокого обучения для обнаружения скрытых паттернов в больших данных (например, для обнаружения аномалий, указывающих на назревающий кризис). Обученные модели могут встраиваться в сценарный анализ — например, нейросеть предсказывает вероятность наступления страхового случая при заданных макроэкономических условиях сценария. Также ML помогает автоматически кластеризовать сценарии по сходству, ранжировать их по степени опасности и даже рекомендовать новые сценарии на основе накопленных данных.

Комбинация методов позволяет строить гибридные модели рисков. Например, вероятностно-нейронные модели могут оценивать распределение потерь с учетом как статистических данных, так и экспертных знаний. Байесовские методы удобно применять для обновления оценок рисков по мере появления новой информации (апостериорный пересчет вероятностей), а нейросети — для повышения точности оценок на больших массивах данных [11, 12].

Отдельно стоит отметить, что генерация сценариев сама по себе может выполняться с помощью ИИ. Современные СППР могут включать модуль генерации



Рис. 3. Алгоритм анализа рисков для системы поддержки принятия решений с применением искусственного интеллекта

сценариев, который с помощью методов обработки естественного языка или обученных на данных моделей предлагает пользователю новые сценарии развития событий. Например, генеративные модели ИИ способны автоматически формировать описания сценариев («истории») на основе анализа больших объемов текстовых данных о прошлых инцидентах и трендах. Что позволит снизить зависимость от ручной работы экспертов при создании сценариев и расширяет охват анализа.

Ниже приведена упрощенная схема архитектуры СППР для риск-менеджмента с поддержкой сценарного анализа (см. рис. 4), которая отражает основные компоненты и потоки данных между ними. Результаты через интеграционный слой передаются на пользовательский

интерфейс в виде интерактивных дашбордов и отчетов. На рисунке показано, как различные компоненты увязаны друг с другом. Потоки данных идут от источников и базы сценариев в аналитический блок, где происходят вычисления. Машинное обучение интегрировано двусторонне: с одной стороны, модели обучаются на исторических данных о рисках, с другой — выдают прогнозные оценки, которые используются при расчетах сценариев.

В случаях, требующих статистической оценки неопределенности, аналитический модуль инициирует симуляцию Монте-Карло, результаты которой возвращаются обратно в модуль анализа для агрегирования.

Пользователь через интерфейс может задавать параметры сценария (например, степень падения выручки,



Рис. 4. Архитектура СПМП для риск-менеджмента с поддержкой сценарного анализа

сценарий макроэкономического шока). После расчета результаты (например, рассчитанные вероятности превышения убытков определенного уровня, рекомендуемые меры реагирования и пр.) сохраняются и визуализируются на дашборде. Таким образом, реализован замкнутый цикл: данные → моделирование сценариев

→ оценка рисков → представление результатов → принятие решений. При изменении входных условий или появлении новых данных цикл повторяется, позволяя адаптивно управлять рисками в режиме близком к реальному времени [13, 14].

Примеры практического применения

Сценарный анализ с применением ИИ находит применение в различных отраслях и задачах управления рисками. Вот несколько показательных примеров, как такая система работает на практике:

- в банковской сфере СППР со сценарным анализом применяется для прогнозирования финансовых рисков (рыночных, кредитных, операционных). К примеру, инвестиционный банк внедрил платформу AI-driven Scenario Analysis для мониторинга рыночных рисков. Система интегрировалась с существующими базами данных по сделкам и позициям, используя глубокое обучение для генерации сценариев на основе исторических цен и волатильности. Благодаря распределенной архитектуре платформа могла параллельно просчитывать сотни сценариев стресс-тестов, оценивая, как изменение рыночных условий (курсов валют, процентных ставок, котировок) повлияет на портфель банка. В результате банк получил возможность оценивать риски почти в реальном времени (расчет сценариев сократился с часов до минут) и повысил точность оценки рыночной экспозиции до ~95 %. Это позволило более оперативно реагировать на резкие изменения и, как было зафиксировано, снизить потенциальные потери, сэкономив до \$500 млн за счет оптимизации резервов и хеджирования.
- в нефинансовых компаниях сценарный анализ с ИИ помогает прогнозировать сбои и оптимизировать процессы. Например, нефтегазовая корпорация Shell применила такую систему для глобального управления цепочкой поставок. Были объединены ML-модели спроса (прогнозирование потребностей в нефтепродуктах) с симуляцией Монте-Карло для цен на нефть, а также построены цифровые двойники логистики и производства. Система автоматически генерировала сценарии под различные комбинации: всплеск спроса, падение цен, сбой на НПЗ и просчитывала оптимальную стратегию (перераспределение запасов, перенаправление маршрутов поставки). Добавление потоков IoT-данных (датчики на заводах, телеметрия транспорта) позволило учитывать факторы в реальном времени. Этот комплексный подход привел к существенным улучшениям: по отчетам, удалось на 12 % снизить издержки на запасы и на 15 % повысить использование мощностей НПЗ, что дало экономию около \$2 млрд в год. Кроме того, компания стала гораздо устойчивее к сбоям и время реакции на внештатные ситуации сократилось, а влияние рыночных колебаний на операционную деятельность уменьшилось.
- другие примеры включают страховые компании, применяющие сценарный анализ с ИИ для оценки

влияния климатических изменений на портфель полисов, производственные предприятия для управления технологическими рисками, проекты в сфере ИТ для прогнозирования отказов систем и киберугроз и пр. Во всех случаях система действует проактивно: предсказывает потенциальные угрозы (например, рост частоты страховых случаев при определенном сценарии погоды) и предлагает оптимизированные стратегии реагирования (изменение условий страхования, резервирование мощностей и т.д.), тем самым повышая устойчивость организации к рискам.

Техническая реализация системы и перспективы развития

Реализация системы поддержки принятия решений с ИИ требует использования современных технологий программирования, хранения данных и машинного обучения. Основная логика аналитического модуля и модулей ИИ зачастую реализуется на языках Python или R, которые богаты библиотеками для статистики и машинного обучения. Python является де-факто стандартом для построения моделей ML (библиотеки scikit-learn, TensorFlow, PyTorch и др.) и обладает широким набором инструментов для симуляций (например, NumPy/SciPy для Монте-Карло). R традиционно силен в статистическом моделировании и может применяться для прототипирования риск-моделей. Для корпоративной интеграции и разработки высоконадежного бэкэнда могут использоваться Java или C# (.NET), особенно если система должна бесшовно встраиваться в существующую ИТ-инфраструктуру предприятия. Например, модуль интеграции данных и бизнес-логики может быть реализован на Java с использованием Spring Framework, обеспечивая масштабируемость и безопасность.

Для машинного обучения применяются фреймворки (TensorFlow, PyTorch для нейросетей; scikit-learn, XGBoost для классических методов; statsmodels для эконометрического анализа; PyMC3 или TensorFlow Probability для байесовского вероятностного моделирования). Для построения байесовских сетей риска существуют специализированные инструменты (например, GeNIe/SMILE, BayesiaLab), а также библиотеки на Python (pgmpy, pyBN) — они могут быть интегрированы для расчета условных вероятностей в сценариях. Модуль Монте-Карло может использовать как собственную реализацию на базе numpy/random, так и готовые пакеты (например, Risk, SimPy, OpenMOLE) для более сложных моделировок. Визуализация результатов и дашборды на UI уровне могут быть построены с помощью веб-фреймворков (D3.js, React для динамических графиков; или Python-фреймворки типа Dash, Bokeh, if UI ориентирован на аналитиков).

В качестве хранилища данных сценарного анализа обычно используется реляционная СУБД (например, PostgreSQL, Oracle или Microsoft SQL Server) для хранения структурированных данных о сценариях, результатах расчетов, параметрах моделей и пр. Реляционные базы удобны для выполнения сложных SQL-запросов при подготовке данных и для обеспечения целостности (сценарии могут нормализованно храниться в нескольких таблицах — сценарии, связанные события, показатели и т.д.). Если требуется хранить большие объемы сырых данных (например, исторические ценовые ряды, логи датчиков) или неструктурированные данные, могут применяться NoSQL хранилища — документоориентированные (MongoDB) или Hadoop/Spark кластеры для больших данных. Для быстрого доступа к временным рядам рискованных индикаторов подойдет специализированная Time Series DB (типа InfluxDB). Также, хранилище моделей может быть оформлено отдельно — например, файловое хранилище или регистр моделей (Model Registry) для версионирования ML-моделей, использующихся в системе.

Пользовательский интерфейс, как правило, веб-ориентированный. Это может быть одностраничное веб-приложение (SPA) на Javascript-фреймворках (Angular, React) или набор веб-дашбордов (например, на базе Tableau, PowerBI или Python Dash для интерактивных графиков). Важно предусмотреть RESTful API для взаимодействия между фронтендом и серверной частью: интерфейсные модули запрашивают через API запуск анализа или получение данных о сценариях. Кроме того, API необходим для интеграции системы с внешними источниками и сервисами: например, прием данных от внешних риск-агентств, отправка результатов в ERP-систему компании или в отчетные хранилища. API должны быть защищены (аутентификация, шифрование) и оптимизированы по производительности, чтобы система могла встраиваться в масштабные корпоративные ландшафты. В некоторых случаях используется gRPC или GraphQL для эффективного обмена данными между сервисами системы.

Стоит отметить, что при разработке подобной системы особое внимание уделяется надежности и безопасности. Техническая платформа должна обеспечивать резервирование данных (бэкапы базы сценариев), отказоустойчивость вычислительных узлов (кластеризация серверов анализа риска), а также защиту конфиденциальной информации (шифрование данных, разграничение доступа для разных ролей пользователей и др.). Языки и фреймворки выбираются с учетом этих требований: например, критичные части, влияющие на безопасность, могут быть реализованы на проверенных enterprise-технологиях, тогда как экспериментальные модели — на Python с возможностью переноса в более строгую среду после тестирования.

В результате мы получили то, что комплексная интеграция алгоритмов искусственного интеллекта в сценарный анализ не только обогащает теоретико-методологическую базу СППР, но и практически повышает конкурентоспособность компаний, работающих в условиях сложной и турбулентной внешней среды. Актуальность разработки связана с тем, что формирование сценариев в режиме реального времени и их гибкая корректировка при смене входных данных позволяют преодолеть традиционное ограничение статических моделей. Таким образом, формируется интеллектуальная платформа, способная реагировать на непредвиденные события и генерировать адаптивные управленческие стратегии, учитывая при этом широкое многообразие факторов. Примеры практического применения представлены на рисунке 5.

В перспективе дальнейших исследований целесообразно рассмотреть вопросы интеграции рассмотренной методологии с мультиагентными системами, где каждая компонента (агент) может быть ответственна за определенные аспекты анализа данных или за формирование определенного сценария. Другим направлением развития представляется применение алгоритмов обучения с подкреплением (reinforcement learning) для динамической оптимизации принятых решений, особенно в ситуациях, когда последствия текущих управленческих шагов становятся очевидны лишь через длительный период. Кроме того, интересной областью экспериментов может стать совместное использование блокчейн-технологий для обеспечения надежности цепочки поставок данных, что особенно критично в условиях, требующих высокой степени доверия к исходной информации.

Заключение

Таким образом, реализация сценарного анализа в системах поддержки принятия решений с помощью технологий искусственного интеллекта представляет собой актуальное направление исследования, объединяющее классические подходы к прогнозированию с современными методами анализа данных и моделирования сложных систем [15]. Выделяемая в работе модель применения СППР с ИИ связана с предложением интегрированной архитектуры и методологии, позволяющей оперативно обновлять сценарии по мере поступления новой информации, а также формировать на этой основе практические рекомендации для управления в условиях многопараметрической неопределенности. Применение данной модели СППР может способствовать повышению эффективности управленческих решений в промышленности, логистике, финансовом секторе и других областях, где высок уровень риска и требуют учета многочисленных стохастических факторов.



Рис. 5. Применение СППР в различных отраслях с применением искусственного интеллекта

Внедрение системы сценарного анализа с технологиями ИИ существенно повышает качество управления рисками в организации. Во-первых, такая система позволяет предвидеть широкий спектр потенциальных угроз и их развитие, тогда как без нее менеджеры обычно ограничены несколькими сценариями. Алгоритмы машинного обучения и симуляции дают количественные обоснования рисков, уменьшают влияние субъективизма и «слепых зон». Во-вторых, улучшается обоснованность принимаемых решений: руководители получают прозрачные метрики риска (вероятности, ожидаемые убытки, стресс-границы и т.д.) для каждого сценария, а также рекомендации по оптимальным действиям [16, 17]. Это приводит к проактивным мерам — организация заранее разрабатывает планы на случай неблагоприятных сценариев, вместо реактивного устранения последствий. В-третьих, практика показывает заметное снижение возможных убытков и затрат от реализовавшихся рисков при использовании подобных систем. Так, в страховом секторе применение ИИ для оценки сценариев сократило непредвиденные потери почти на четверть.

Банки и корпорации отмечают экономический эффект в сотни миллионов долларов за счет предотвра-

щения кризисных ситуаций и оптимального распределения ресурсов. Кроме прямого снижения финансовых потерь, выгоды выражаются в повышении устойчивости бизнеса — снижается вероятность катастрофических отказов, улучшается соблюдение нормативных требований (благодаря автоматизированным стресс-тестам) и растет доверие инвесторов/акционеров к системе риск-менеджмента. Таким образом, интеграция сценарного анализа с инструментами искусственного интеллекта превращает управление рисками из точечной экспертизы в динамичный, непрерывный процесс. Организация получает конкурентное преимущество в виде способности быстро адаптироваться к любым изменениям внешней среды. Заблаговременное выявление и количественная оценка рисков сценариев позволяют избежать или смягчить удары судьбы, что напрямую уменьшает убытки и защищает ценность компании в долгосрочной перспективе. В совокупности, такая система делает управление рисками более научно обоснованным, оперативным и эффективным, создавая основу для устойчивого развития даже в условиях высокой неопределенности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аббасов М.Ш. О возможности повышения эффективности управленческих решений // Российский экономический вестник. — 2021. — Том 4, № 3. — С. 277–280.
2. Билуха И.Н. Обработка больших данных [Электронный ресурс] // Молодой ученый. — 2020. — № 8 (298). — С. 7–9. — URL: <https://moluch.ru/archive/298/678678/> (дата обращения: 05.03.2025).
3. Ильин А.С., Панченко Г.М., Ковалева М.В. Роль искусственного интеллекта в менеджменте [Электронный ресурс] // Academy. — 2018. — № 12 (39). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-iskusstvennogo-intellekta-v-menedzhmente> (дата обращения: 25.03.2025).
4. Информатика для экономистов: Учебник / Под общ. ред. В.М. Матюшка. — М.: ИНФРА-М, 2020. — 460 с.
5. Ким Д.Г. Инновационные подходы к управлению рисками в стартап-проектах // Актуальные исследования. 2023. № 47(177).
6. Козлов А.Н. Интеллектуальные информационные системы: Учебник / Мин-во с-х. РФ, ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА. — Пермь: Изд-во ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2013. — 278 с.
7. Косарев А.И. Системы поддержки принятия решений: Интеллектуальные и экспертные технологии. М.: Издательство Юрайт, 2020. — С. 45–48.
8. Лукичев П.М., Чекмарев О.П. Долгосрочные риски применения искусственного интеллекта в экономике // Вопросы инновационной экономики. 2023. Т. 13, № 4. С. 242–247.
9. Маслова В.М. Система рекрутинга с элементами искусственного интеллекта // Экономические системы. — 2018. — Т. 11. — № 1 (40). — С. 56–59.
10. Панилов П.А. Использование байесовских моделей и методов Монте-Карло в прогнозировании киберугроз и анализе рисков // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2021. № 4. С. 45–53.
11. Пантелеева Т.А., Арустамов Э.А., Максаев А.А. Возможности искусственного интеллекта в управлении кадровыми ресурсами в условиях свободного предпринимательства // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы». — 2019. — № 3. — URL: <https://resources.today/PDF/10ECOR319.pdf>. DOI:10.15862/10ECOR319 (дата обращения: 24.03.2025).
12. Перминов И.С., Егоров С.В. Методы сценарного анализа в управлении рисками организаций // Экономика и предпринимательство. 2019. № 11(112). С. 525–531.
13. Суслова Е.В. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений [Электронный ресурс] // Молодой ученый. — 2017. — № 3 (137). — С. 171–174. — URL: <https://moluch.ru/archive/137/38289/> (дата обращения: 09.03.2025).
14. Хлопотов М.В. Применение байесовской сети при построении моделей обучающихся для оценки уровня сформированности компетенций // Интернет-журнал «Наукоедение». — Выпуск 5 (24), сентябрь — октябрь 2014. — URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/20TVN514.pdf> (дата обращения: 10.03.2025).
15. Черешкин Д.С., Ройзензон Г.В., Бритков В.Б. Применение методов искусственного интеллекта для анализа риска в социально-экономических системах // Информационное общество. 2020. № 1.
16. Чернов С.В., Савельев В.Л. Искусственный интеллект в управлении рисками. Теория и практика. М.: Финансы и статистика, 2021. — 76 с.
17. Шнюков С.А. Особенности моделирования в процессе принятия управленческих решений [Электронный ресурс] // Молодой ученый. — 2022. — № 3 (398). — С. 218–220. — URL: <https://moluch.ru/archive/398/88132/> (дата обращения: 05.03.2025).

© Ситников Артем Дмитриевич (sitnikovad@ipetskcit.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ В КАЧЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВЫ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ХРАНИЛИЩ ДАННЫХ

ANALYTICAL ASSESSMENT OF DECENTRALIZED SYSTEMS AS AN ALTERNATIVE FOR DATA STORAGE ORGANIZATION

**S. Tarasenko
Yu. Koroleva**

Summary. This study conducts a comprehensive analysis of the prospects and limitations associated with the application of blockchain technology as an alternative approach to data storage compared to traditional methods. The technical features of blockchain are examined, its suitability for various types of data is analyzed, and potential areas of application are identified. The aim of this research is to provide an objective assessment of the advantages and disadvantages of blockchain technology as an alternative solution for data storage, taking into account contemporary requirements and challenges in information security and data management.

The study is conducted considering the current technical and theoretical aspects of blockchain technology, including its decentralized nature, consensus mechanisms, and cryptographic principles. An analysis of the possibilities for effectively applying decentralized data storage is provided.

The research text presents recommendations for the optimal selection of data storage methods depending on specific scenarios and usage goals, considering the limitations inherent in decentralized data storage. The obtained results can serve as a basis for making informed decisions in the field of data storage and management, as well as for developing strategies for implementing blockchain technology in modern information systems.

Keywords: decentralization, data storage, smart contracts, blockchain, information security.

Тарасенко Сергей Сергеевич

кандидат технических наук, Академия ФСО России

Dor71a96@mail.ru

Королева Юлия Евгеньевна

независимый исследователь, г. Орёл

Julkor3@yandex.ru

Аннотация. В данном исследовании проводится комплексный анализ перспектив и ограничений, связанных с применением технологии блокчейн в качестве альтернативного подхода к хранению данных по сравнению с традиционными методами. Рассмотрены технические особенности блокчейна, проведен анализ его пригодности для разнообразных типов данных и обозначены потенциальные области применения. Целью данного исследования является предоставление объективной оценки преимуществ и недостатков технологии блокчейн в качестве альтернативного решения для хранения данных с учетом современных требований и вызовов информационной безопасности и управления данными.

Исследование осуществлено с учетом актуальных технических и теоретических аспектов технологии блокчейн, включая ее децентрализованную природу, механизмы консенсуса и криптографические принципы. Проведен анализ возможностей эффективного применения децентрализованных хранилищ данных.

В тексте исследования представлены рекомендации по оптимальному выбору методов хранения данных в зависимости от конкретных сценариев и целей использования с учетом ограничений, присущих децентрализованым хранилищам данных. Полученные результаты могут служить основой для принятия решений в области хранения и управления данными, а также для разработки стратегий внедрения технологии блокчейн в современные информационные системы.

Ключевые слова: децентрализация, хранилище данных, смарт-контракт, блокчейн, защита информации.

Введение

В современной информационной эпохе, сконцентрированной на передаче, хранении и обработке данных, существует непрерывная потребность в эффективных и безопасных методах сохранения информации. Вопросы, связанные с обеспечением конфиденциальности, целостности и доступности данных, являются приоритетными для организаций и индивидуальных пользователей. Традиционные подходы к хранению данных, такие как облачные и локальные хранилища, несмотря на свою широкую распространенность, имеют ряд существенных ограничений и недостатков.

Облачные хранилища данных обладают такими характеристиками как масштабируемость и удобство доступа к данным из любой точки мира. Однако, они подвержены риску утечки конфиденциальной информации и зависимости от централизованных поставщиков услуг, что может привести к потере контроля над данными и уязвимостям в безопасности.

Локальные хранилища данных, с другой стороны, могут обеспечить более высокий уровень контроля и безопасности, но они ограничены в масштабируемости и доступности, особенно при необходимости удаленного доступа к данным.

С учетом данных ограничений в поиске более эффективных и безопасных методов хранения данных, технология блокчейн [1] выделяется как перспективная альтернатива. Блокчейн представляет собой децентрализованную и распределенную систему хранения данных, обеспечивающую высокий уровень безопасности и стойкость к несанкционированной модификации хранящихся данных.

Преимущества и недостатки технологии блокчейн

Преимущества:

- 1) *Повышенная защищенность от несанкционированного изменения данных, размещенных в блокчейне.* В блокчейне каждый блок данных связан с предыдущими блоками с использованием хеш-функций. Это создает цепочку блоков, где каждый блок содержит уникальный идентификатор, зависящий от содержимого предыдущего блока. Если даже небольшое изменение в данных произойдет в предыдущем блоке, это приведет к изменению хеш-кода, что автоматически приведет к изменению хеш-кодов всех последующих блоков в цепочке. Содержимое блока составляют транзакции пользователей, подписанные цифровыми подписями с использованием приватных ключей пользователей. Таким образом, цифровые подписи и хеширование делают нереализуемым на практике изменение данных в блокчейне без возможности обнаружения.
- 2) *Децентрализация.* В отличие от централизованных систем, где данные хранятся и управляются одним центральным органом, в блокчейне данные распределены между множеством узлов в сети. Эти узлы синхронизированы между собой, и каждый узел содержит полную копию всей цепочки блоков (базы данных). Это делает блокчейн устойчивым к атакам и изменениям, так как атакующему потребуется изменить данные на всех узлах сети одновременно, что в больших и независимых сетях практически невозможно.
- 3) *Дороговизна и нецелесообразность атак на подобные системы.* Стоимость и неоправданность атак на подобные системы проявляются в контексте блокчейна за счет использования консенсусных механизмов, которые регулируют изменения в базе данных между узлами сети. Разнообразные алгоритмы консенсуса, такие как *Proof of Work (PoW)* [2], *Proof of Stake (PoS)* [3] и другие, обеспечивают достижение единства среди узлов относительно приемлемых данных для добавления в блокчейн, исключая нежелательные изменения. Это устраняет возможные атаки или попытки внести изменения в данные путем обеспечения консенсуса [4] среди всех участников сети. Необходимость контроля большинства узлов в сети для успешной атаки [5] подтверждает, что стоимость

таких атак для масштабных блокчейн-сетей может быть высока и обнаружена остальными участниками сети, а также наблюдателями или разработчиками блокчейн-проекта. После выявления атаки «честная» часть сообщества пользователей и разработчики могут создать копию сети с состоянием, которое было в сети до атаки, тогда как копия с навязанными атакующими данными будет считаться недействительной. Поскольку ценность блокчейн-системы определяется ее децентрализованным характером и доверием пользователей, то скомпрометированная сеть и данные в ней перестают быть ценными для сообщества. Следовательно, даже в случае успешной атаки на блокчейн-систему она будет обнаружена и, с применением описанного выше механизма, возвращена к состоянию, предшествовавшему атаке, что делает проведение таких атак (с учетом их дороговизны) нецелесообразным.

- 4) *Резервирование данных.* Автоматическое резервирование данных в блокчейне обеспечивается за счет хранения информации на распределенном множестве узлов сети, что исключает необходимость в специальных процедурах и дополнительных ресурсах. Этот механизм гарантирует сохранность данных даже при выходе из сети отдельных участников, не приводя к их потере или недоступности.
- 5) *Отсутствие необходимости в backend-сервере.* Для определенных задач, веб-приложения и децентрализованные приложения (*dApp*) [6] могут обходиться без необходимости использования *backend*-сервера, так как блокчейн может выступать в роли такого сервера, обеспечивая возможность обработки данных и выполнения логики приложения через его смарт-контракты. Это также освобождает от необходимости траты ресурсов на содержание инфраструктуры сервера и обеспечение аутентифицированного доступа пользователей, что способствует упрощению разработки и экономии средств.
- 6) *Гарантия выполнения условий и операций, определенных в смарт-контрактах.* Обеспечение выполнения условий и операций, определенных в смарт-контрактах [7], обеспечивается автоматически и надежно благодаря принципам децентрализации и непротиворечивости в блокчейне. Смарт-контракты представляют собой программные коды, которые хранятся и исполняются в блокчейне, и обеспечивают автоматическое выполнение договоренностей между сторонами без необходимости доверия к третьей стороне. Этот механизм гарантирует надежность и прозрачность исполнения условий смарт-контракта, исключая возможность манипуляций или несоблюдения соглашений со стороны участников.

Недостатки:

- 1) Низкая производительность блокчейна является значимым ограничением, присущим данной технологии, и обусловлена рядом факторов. Прежде всего, увеличение количества транзакций в сети блокчейна приводит к увеличению времени обработки и подтверждения каждой транзакции. Это происходит из-за необходимости достижения консенсуса между всеми участниками сети, что требует временных затрат. *Данный недостаток накладывает ограничение на реализацию на базе технологии блокчейн хранилища информации, предоставляющего инструментарий для изменения/добавления данных в хранилище в режиме реального времени.*
- 2) Рост количества информации, хранимой в блокчейне. Увеличение объема данных в блокчейне, без возможности удаления или изменения сохраненных в нем данных, является характерной особенностью данной технологии. Вследствие этого, увеличение объема данных в блокчейне приводит к накоплению информации в цепочке блоков, сохраняя каждое состояние системы с момента ее создания. Однако, при этом возникают проблемы с масштабируемостью и эффективным управлением большим объемом данных, так как каждый узел в сети должен хранить полную копию блокчейна. *Данный недостаток указывает на нецелесообразность хранения в блокчейне больших объемов данных.*
- 3) Дублирование информации на всех узлах сети, в сочетании с невозможностью удаления или изменения сохраненных в сети данных, создает потенциальную угрозу безопасности информации. При сохранении данных в блокчейне они остаются неизменными и доступными на всех узлах сети, что может привести к серьезным последствиям в случае утечки конфиденциальной информации или ошибочного внесения неправильных данных. *Данный недостаток указывает на необходимость использования шифрования информации перед ее размещением в блокчейне с помощью стойких криптографических методов, способных обеспечить конфиденциальность сведений в долгосрочной перспективе.*
- 4) Несовместимость различных блокчейн-сетей представляет собой значительное ограничение для развития блокчейн-технологий и обеспечения взаимодействия между смарт-контрактами разных сетей. Это связано с тем, что различные блокчейны могут иметь разные протоколы консенсуса, форматы данных, архитектуру смарт-контрактов и другие технические особенности, что делает их несовместимыми между собой. *Данный недостаток указывает на трудоемкость и нецелесообразность (без веских причин) созда-*

ния хранилищ информации, задействующих несколько различных блокчейн-сетей.

- 5) Слабая связь с реальным миром, также известная как проблема «оракулов» [8], является одним из ограничений блокчейн-технологии. Она связана с тем, что большинство блокчейн-сетей не имеют возможности напрямую взаимодействовать с внешними данными или событиями, происходящими в реальном мире. Оракулы — это сторонние сервисы или узлы, которые предоставляют информацию о внешних событиях или данных в блокчейн. Они выполняют функцию по передаче внешних данных в блокчейн, чтобы они могли быть использованы в смарт-контрактах или других децентрализованных приложениях.

Однако использование оракулов вводит некоторые риски, включая:

- а) Недостаточная децентрализация: оракулы могут быть централизованными или подвержены взлому, что может привести к манипуляциям или фальсификации внешних данных, поступающих в блокчейн.
- б) Односторонняя доверенность: децентрализованные приложения могут полагаться только на те данные, которые им предоставляют оракулы. Это создает риск, что информация, поступающая извне, может быть неточной или недостоверной.
- с) Сложности интеграции: интеграция оракулов с блокчейн-сетями может быть сложной и требовать дополнительных ресурсов и усилий для обеспечения безопасности и надежности передачи данных.

Данный недостаток указывает на недопустимость применения оракулов для обеспечения функционала хранилища информации в блокчейн-системе, ответственного за конфиденциальность, целостность и доступность пользовательских данных.

- б) За действия в сети блокчейна, за исключением чтения данных, предусмотрено взимание платы. Данная плата, называемая «комиссия» или «gas» [9], представляет собой форму оплаты, которую пользователи сети должны уплатить за выполнение определенных операций или транзакций в блокчейне.

В сети *Ethereum* [10] комиссия взимается за выполнение функций смарт-контрактов или передачу токенов между пользователями. Размер комиссии зависит от ресурсов, требуемых для выполнения операции, таких как объем вычислений, необходимый для выполнения смарт-контракта, или размер данных, передаваемых в транзакции.

Данные платежи выполняют важную роль в поддержании безопасности и эффективности работы блокчейн-сети, так как они обеспечивают мотивацию для участников сети, таких как «майнеры» (для PoW) или «валидаторы» (для PoS) продолжать свою деятельность. Кроме того, плата комиссии служит средством защиты от DDoS-атак [11], так как высокие комиссии делают экономически невыгодным отправку большого количества ненужных транзакций. Это помогает сохранять работоспособность сети и обеспечивает эффективное использование ее ресурсов, способствуя созданию устойчивой и надежной блокчейн-экосистемы. Данный недостаток указывает на экономическую нецелесообразность хранения больших объемов данных, не имеющих критического значения, а также необходимость декомпозировать и структурировать хранимую информацию, чтобы при изменении незначительной части данных не требовалось изменение большого объема информации, размещенной в блокчейне. Это создает необходимость разработки специализированных методов хранения и обработки зашифрованной информации, учитывающих как различные аспекты защиты от угроз безопасности информации, размещенной в блокчейн-сети, так и экономическую эффективность операций с данной информацией.

Сравнительный анализ локальных, облачных и децентрализованных хранилищ данных

Достоинства локальных хранилищ данных.

1. Высокий уровень контроля и безопасности (нет необходимости в доверии внешней организации);
2. Невозможность «отказа в обслуживании» (нет необходимости в доверии внешней организации);
3. Отсутствие платы за обслуживание.

Недостатки локальных хранилищ данных.

1. Отсутствие резервирования + утеря устройства = утеря данных;
2. Отсутствие «синхронизации» между устройствами пользователя.

Достоинства облачных хранилищ данных.

1. Резервирование данных;
2. «Синхронизация» данных между устройствами пользователя.

Недостатки облачных хранилищ данных.

1. Инфраструктура безопасности облачного хранилища, не подлежащая открытому аудиту, может содержать уязвимости;
2. Возможен «отказ в обслуживании», и, как следствие, утеря доступа к данным;
3. Необходимость платы за обслуживание (как за доступ к данным, так и за хранение и/или изменение данных).

Достоинства децентрализованных хранилищ данных.

1. Высокий уровень контроля и безопасности (нет необходимости в доверии внешней организации);
2. Невозможность «отказа в обслуживании» (нет необходимости в доверии внешней организации);
3. Резервирование данных;
4. «Синхронизация» данных между устройствами пользователя.

Недостатки децентрализованных хранилищ данных.

1. Необходимость платы за обслуживание (только за изменение данных).

Таким образом, децентрализованное хранилище данных представляет собой синтез преимуществ локальных и «облачных» подходов к хранению информации, а из недостатков наследует только необходимость платы за обслуживание, связанное с изменением данных.

Области применения

Учитывая перечисленные достоинства и недостатки технологии блокчейн, можно выделить ряд прикладных областей, в которых целесообразно использование децентрализованного хранилища данных:

- 1) Децентрализованные менеджеры паролей. Авторизационная и аутентификационная информация имеет критическое значение для пользователей и занимает относительно небольшой информационный объем. Также для данной предметной области не требуется поддержка функционирования в режиме реального времени.
- 2) Децентрализованные хранилища исходных кодов проектов. Именно хранение исходных кодов готовых проектов, изменения в которые будут вноситься только со значимыми обновлениями («релизами» программного обеспечения). Использование блокчейна в качестве распределенной системы управления версиями исходного кода может быть экономически неэффективным.
- 3) Децентрализованные хранилища небольших файлов и документов. Это могут быть, например, конфигурационные файлы для информационных систем или внутренняя документация организаций.

Приведенный перечень не является исчерпывающим. Он может быть дополнен и расширен в зависимости от конкретной области и решаемых организацией или индивидуальным пользователем типов задач.

Заключение

Резюмируя вышесказанное, можно сделать следующий вывод. Децентрализованные хранилища данных

представляют собой интеграцию сильных сторон локальных и «облачных» систем хранения информации. Используя преимущества обоих подходов, такие системы обеспечивают повышенную отказоустойчивость, гарантированную доступность, распределенный доступ и прозрачность оперирования с хранимыми данными. Однако для поддержания такой структуры может потребоваться плата за обслуживание, особенно при частых изменениях данных. Эта необходимость обусловлена требованием к согласованию изменений между раз-

личными узлами децентрализованной сети, что может привести к дополнительным операционным расходам, что в свою очередь, в совокупности с ограничениями в производительности блокчейн-систем, накладывает определенные ограничения на сферы применения подобных хранилищ, а также указывает на необходимость разработки специальных адаптированных к определенной предметной области способов организации хранения и обработки данных в смарт-контрактах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang, R., Xue, R., & Liu, L. (2019). Security and Privacy on Blockchain. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 52, 1–34. <https://doi.org/10.1145/3316481>.
2. Gervais, A., Karame, G., Wüst, K., Glykantzis, V., Ritzdorf, H., & Capkun, S. (2016). On the Security and Performance of Proof of Work Blockchains. *Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*. <https://doi.org/10.1145/2976749.2978341>.
3. Saleh, F. (2020). Blockchain Without Waste: Proof-of-Stake. *Information Systems & Economics eJournal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3183935>.
4. Zhang, S., & Lee, J. (2020). Analysis of the main consensus protocols of blockchain. *ICT Express*, 6, 93–97. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2019.08.001>.
5. Aponte-Novoa, F., Orozco, A., Villanueva-Polanco, R., & Wightman, P. (2021). The 51 % Attack on Blockchains: A Mining Behavior Study. *IEEE Access*, PP, 1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3119291>.
6. Cai, W., Wang, Z., Ernst, J., Hong, Z., Feng, C., & Leung, V. (2018). Decentralized Applications: The Blockchain-Empowered Software System. *IEEE Access*, 6, 53019–53033. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2870644>.
7. Macrinici, D., Cartoceanu, C., & Gao, S. (2018). Smart contract applications within blockchain technology: A systematic mapping study. *Telematics Informatics*, 35, 2337–2354. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2018.10.004>.
8. Sheldon, M. (2020). Auditing the Blockchain Oracle Problem. *J. Inf. Syst.*, 35, 121–133. <https://doi.org/10.2308/isys-19-049>.
9. Koutmos, D. (2023). Network Activity and Ethereum Gas Prices. *Journal of Risk and Financial Management*. <https://doi.org/10.3390/jrfm16100431>.
10. Tikhomirov, S. (2017). Ethereum: State of Knowledge and Research Perspectives. 206–221. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75650-9_14.
11. Behal, S., Kumar, K., & Sachdeva, M. (2017). Characterizing DDoS attacks and flash events: Review, research gaps and future directions. *Comput. Sci. Rev.*, 25, 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.07.003>.

© Тарасенко Сергей Сергеевич (Dor7la96@mail.ru); Королева Юлия Евгеньевна (Julkor3@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

УЛУЧШЕННЫЙ КВАНТОВЫЙ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ С КУТРИТНЫМ ПРЕДСТАВЛЕНИЕМ В ЗАДАЧАХ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

IMPROVED QUANTUM GENETIC ALGORITHM WITH QUTRITE REPRESENTATION IN FUNCTIONAL OPTIMIZATION PROBLEMS

S. Tyryshkin

Summary. Quantum optimization algorithms have the potential to revolutionize the application of brute-force methods in decision making. It is widely believed that for certain classes of optimization problems, quantum algorithms can achieve significant performance gains over current state-of-the-art solutions. Taking into account the fact that the latest achievements in the field of quantum computers are reaching the stage of industrialization, optimization algorithms based on quantum technologies become more and more relevant. Taking into account the noted, the paper considers the possibilities of the improved quantum genetic algorithm with qutrit representation in functional optimization problems. The developed scheme of the algorithm is based on decomposition of the generalized Hadamard gate without the use of ancilla. The considered solution of the MaxCut problem shows that the algorithm has a higher probability of sampling the correct solution, and can do so with fewer layers.

Keywords: quantum algorithm, qutrit, optimization, transition, gate.

Тырышкин Сергей Юрьевич

к.т.н., доцент, Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул
service.vip-spe@yandex.ru

Аннотация. Квантовые алгоритмы оптимизации способны кардинально изменить применение методов перебора при принятии решений. Широко распространено мнение, что для определенных классов оптимизационных задач квантовые алгоритмы позволяют добиться значительного выигрыша в производительности по сравнению с текущими современными решениями. С учетом того, что последние достижения в области создания квантовых компьютеров выходят на стадию индустриализации, алгоритмы оптимизации на основе квантовых технологий становятся все более актуальными. С учетом отмеченного, в статье рассмотрены возможности улучшенного квантового генетического алгоритма с кутритным представлением в задачах функциональной оптимизации. Разработанная схема алгоритма базируется на декомпозиции обобщенного затвора Хадамарда без использования анкилла. Представленное решение задачи MaxCut показывает, что квантовый генетический алгоритм на основе кутритов имеет более высокую вероятность выборки правильного решения, и может делать это с меньшим количеством слоев.

Ключевые слова: квантовый алгоритм, кутрит, оптимизация, переход, ворота.

Проблема оптимизации — одна из важнейших задач в современной науке и технике. Она охватывает широкий спектр задач, начиная от машинного обучения, квантово-механических расчетов, молекулярного моделирования и заканчивая комбинаторной оптимизацией. Эти задачи можно разделить на различные категории, например, детерминированная или стохастическая оптимизация, оптимизация с ограничениями или без ограничений, непрерывная или дискретная оптимизация, дифференцируемая или недифференцируемая оптимизация, выпуклая или невыпуклая оптимизация и т.д. [1, 2]. В тоже время, следует отметить, что универсального подхода к оптимизации не существует. Большинство классических эволюционных алгоритмов оптимизации берут свое начало с пробного вектора, который варьируется с помощью различных техник для поиска оптимума объективной функции. В тоже время, главным недостатком традиционных алгоритмов является то, что их стоимость может стать очень высокой из-за увеличения

размерности пространства состояний задачи, что известно как «проклятие размерности». Другая проблема, которая часто возникает при использовании алгоритмов оптимизации, заключается в том, что пробный вектор застревает в глубоком локальном минимуме, а глобальный минимум объективной функции отсутствует [3].

В данном контексте особого внимания заслуживают квантовые вычисления, которые основаны на принципах квантово-механических явлений. За последние несколько лет данные алгоритмы достигли значительного прогресса. Неснижающая тема эволюция аппаратных средств квантовых вычислений в настоящее время уже продемонстрировала для конкретных задач существенное квантовое ускорение по сравнению с классическими вычислениями. Внутренний параллелизм, основанный на принципах суперпозиции квантовых состояний, в сочетании с эффектами интерференции приводит к экспоненциальным вычислительным возможностям,

которые открывают интересные перспективы в исследовании операций [4].

С точки зрения оптимизации, суперпозиция квантовых кутритов, которые существуют в нескольких состояниях одновременно, по своей сути, хорошо подходит для решения оптимизационных задач. Однако вероятностная природа кутритов требует «умных» квантовых алгоритмов для повышения достижения некоторого желаемого состояния, соответствующего решению задачи. Поэтому одной суперпозиции недостаточно, чтобы достигнуть квантового преимущества. В связи с отмеченным, особое значение приобретают квантовые генетические алгоритмы.

Однако, несмотря на имеющиеся исследования, вопросы типичного кодирования в кутриты и определения величины доступного квантового ускорения для оптимизационных задач, трудно оценить, что предопределяет необходимость проведения дальнейших, более углубленных исследований.

Экспериментальные демонстрации использования кутритов для выполнения реальных квантовых алгоритмов описывают в своих трудах Кадченко С.И., Ставцева А.В., Abdulbasit M. A. Sabaawi, Mohammed R. Almasaoodi, Sara El Gaily, Sándor Imre, Fan Yang, Jiawen Chen, Jinyang Li.

Методы и способы уменьшения ошибок в квантовом приборе, которые возникают во время измерения, а также разработка простых моделей постобработки входят в круг научных интересов Бочарова Н.А., Кириллюка М.А., Yuanyuan Li, Qichun Sun, Hua Xu, Xiaogang Li, Zhijun Fang, Wei Yao.

Возможности управления кутритом с использованием когерентного подхода, а также метода, как правило, зависящего от времени скорости декогеренции, которая регулируется так называемым некогерентным управлением, изучают Терновая А.К., Уваров Н.К., Хомоненко А.Д., Jinlei Zhang, Xue Qiu, Xiang Li, Zhijie Huang, Mingqiu Wu, Yumin Dong.

Высоко оценивая имеющиеся на сегодняшний день исследования и наработки, следует отметить, что ряд проблемных аспектов заслуживают отдельного внимания. Так, открытым остается вопрос способен ли квантовый отжиг обеспечить квантовое ускорение по сравнению с классическими эвристическими алгоритмами. Кроме того, в дальнейшем обосновании нуждается многозначная квантовая логика, которая более перспективна с точки зрения вычислительной мощности.

Таким образом, цель статьи заключается в рассмотрении возможностей использования улучшенного кванто-

вого генетического алгоритма с кутритным представлением для решения задач функциональной оптимизации.

Кутрит — это фундаментальная единица квантовых вычислений. По сравнению со своими классическими аналогами, которые принимают значения 0 и 1, кутриты могут существовать в суперпозиции двух состояний. Обозначим эти два базисных состояния как $|0\rangle$ и $|1\rangle$, в результате можно представить любой кутрит как $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ с $\|\alpha\|^2 + \|\beta\|^2 = 1$. $\|\alpha\|^2$ и $\|\beta\|^2$ соответствующие вероятностям измерения $|0\rangle$ и $|1\rangle$ [5].

На квантовые состояния можно воздействовать с помощью квантовых ворот, которые (а) сохраняют действительные распределения вероятностей, обеспечивающих в сумме 1, и (б) гарантируют обратимость. Например, X-ворота преобразуют состояние $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ в $X|\psi\rangle = \beta|0\rangle + \alpha|1\rangle$. Ворота X также являются примером классической обратимой операции, эквивалентной операции NOT. В квантовых вычислениях есть единственная необратимая операция, называемая измерением, которая преобразует квантовое состояние в одно из двух базисных состояний с заданной вероятностью, основанной на α и β .

Итак, для решения задачи функциональной оптимизации будем считать, что квантовая система d -уровня может быть выражена как линейная комбинация d базисных состояний, $|\psi\rangle = \sum_{k=0}^{d-1} \alpha_k |k\rangle$. Состояние кутрита описывается следующим образом [6]:

$$|\psi\rangle = \alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle + \alpha_2|2\rangle \quad (1)$$

Чтобы выполнить квантовое вычисление с помощью кутритов, необходим универсальный набор унитарных операций и средства для проведения измерений. В литературе существует множество описаний операций над кутритами. В рамках проводимого исследования будем использовать естественное представление, основанное на вращениях с применением двумерных подпространств, и наблюдаемые Гелл-Манна, которые естественным образом обобщают операции Паули на кубитах и описывают измерение в вычислительном базисе кутритов [7].

В частности, мы используем формализм, который определяет три матрицы вращения, аналогичные вращениям кутритов $RX(\theta)$, $RY(\theta)$ и $RZ(\theta)$. Обозначим их как $TRX^{(ij)}(\theta)$, $TRY^{(ij)}(\theta)$ и $TRZ^{(ij)}(\theta)$. Эти операции действуют как поворот кутрита на θ в подпространстве $\{|i\rangle, |j\rangle\}$, оставляя третье состояние нетронутым. В качестве явного примера, для случая $(ij) = (01)$, можно определить:

$$TRX^{(01)}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) & -isin\left(\frac{\theta}{2}\right) & 0 \\ -isin\left(\frac{\theta}{2}\right) & \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$TRX^{(01)}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) & -sin\left(\frac{\theta}{2}\right) & 0 \\ sin\left(\frac{\theta}{2}\right) & \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$TRX^{(01)}(\theta) = \begin{pmatrix} e^{-i\theta/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\theta/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Произвольная однокватритная операция может быть реализована с помощью последовательности из восьми таких вращательных ворот, включающих четыре различных вращения, работающих в двух разных подпространствах. Выбор подпространств приводит к обобщениям непараметризованных ворот, таким как аналоги Паули X , которые выполняют сложение по модулю 3 на базисных состояниях [8]. Ворота Хадамарда, которые необходимы для построения генетического квантового алгоритма функциональной оптимизации, можно определить несколькими способами. Один из вариантов — это эквивалент однокубитного Хадамарда, действующего в двухсостоятельном подпространстве. Другой вариант, который будем использовать в данном исследовании — это вентиль Клиффорда кутрита (ТН):

$$TH = \frac{-i}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \omega & \omega^2 \\ 1 & \omega^2 & \omega \end{pmatrix}, \omega = e^{2\pi i/3} \quad (5)$$

Чтобы развить интуицию в отношении предлагаемой техники, сначала представим декомпозицию ворот Хадамарда, которая закладывает основу для обобщения на множественное управление. В каждой из следующих конструкций все входы и выходы являются кубитами, но мы можем временно занимать состояние $|2\rangle$ во время вычислений. Сохранение двоичного входа и выхода позволяет вставлять эти конструкции в любые ранее существовавшие схемы, состоящие только из кутритов. На рисунке 1 приведено разложение Хадамарда с использованием кутритов.

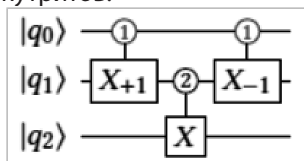


Рис. 1. Декомпозиция Хадамарда через кутриты

На рис. 1 каждый вход и выход — это кутриты. Красные ворота активируются на $|1\rangle$, а синие — на $|2\rangle$. Первые ворота временно поднимают q_1 до уровня $|2\rangle$, если q_0 и q_1 были $|1\rangle$. Затем выполняется операция X , только если q_1 — $|2\rangle$. Последние ворота возвращают q_0 и q_1 в исходное состояние.

Аналогичная конструкция для ворот Хадамарда известна из предыдущих работ. Задача состоит в том, чтобы выполнить операцию X на последнем (целевом) входном кутрите q_2 тогда и только тогда, когда два управляющих кутрита, q_0 и q_1 , оба $|1\rangle$. Сначала над q_0 и q_1 выполняется операция $X+1$ с контролем $|1\rangle$. Это поднимает q_1 до уровня $|2\rangle$, если q_0 и q_1 оба были $|1\rangle$. Затем к q_2 применяются ворота X с управлением $|2\rangle$. Таким образом, X выполняется только тогда, когда и q_0 , и q_1 были $|1\rangle$, как и требуется. Элементы управления возвращаются в исходное состояние с помощью $|1\rangle$ -управляемых ворот $X-1$, которые отменяют действие первых ворот. Ключевая интуиция в этой декомпозиции заключается в том, что состояние кутрита $|2\rangle$ можно использовать для хранения временной информации.

Набор наблюдаемых параметров, которые измеряются, — это наблюдаемые Гелл-Манна. Это набор из 8 эрмитовских наблюдаемых, которые обобщают группу Паули кутрита [9]. Кроме того, они представляют собой эрмитовы генераторы унитарных операций TRX , TRY и TRZ . Наблюдаемые Гелл-Манна перечислены в таблице 1.

Для двухкватритной операции был выбран тернарный оператор сложения $TAdd$, который выполняет управляемое сложение по модулю 3. Действие $TAdd$ и его адьюнкта (который обозначен $TSub$) на состояния кутритного базиса записывается следующим образом:

$$TAdd|j\rangle|k\rangle = |j\rangle|k + j \bmod 3\rangle \quad (6)$$

$$TAdd|j\rangle|k\rangle = |j\rangle|k - j \bmod 3\rangle = TSub|j\rangle|k\rangle \quad (7)$$

Таким образом, обобщая вышеизложенное, работу предлагаемого алгоритма можно представить в виде следующих шагов (см. рис. 2).

На рисунке $Q(t)$ — квантовая популяция решений на момент времени t ; $P(t)$ — классическое представление особой популяции в системе исчисления с основанием $n=3$, полученное в результате квантового измерения.

Для простоты и без потери общности, чтобы показать как работает предложенный алгоритм сосредоточимся на задаче $MaxCut$. $MaxCut$ — это задача разбиения вершин графа на два непересекающихся подмножества таким образом, чтобы сумма весов ребер между этими двумя подмножествами была максимальной [10]. Такое разбиение называется разрезом. Как показано на рис. 3,

Таблица 1.

Кутритные наблюдаемые Гелл-Манна, сгруппированные по аналогичным кутритным операторам Паули

Паули	Наблюдаемая Гелл-Манна		
X	$\lambda^1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\lambda^4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\lambda^6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$
Y	$\lambda^2 = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\lambda^5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\lambda^7 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$
Z	$\lambda^3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\lambda^8 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$	

1 $t=0$ 2 инициализация $Q(t)$ 3 измерение $Q(t)$ и переход к $P(t)$ 4 оценка приспособленности $P(t)$ 5 нахождение B - наилучшего решения в $P(t)$

6 while (условие завершения эволюции)

7 $t = t + 1$ 8 обновление $Q(t)$ с помощью оператора квантовых ворот9 измерение $Q(t)$ и переход к $P(t)$ 10 оценка приспособленности $P(t)$ 11 нахождение B - наилучшего решения в $P(t)$

12 оператор квантовой катастрофы

13 конец while тут: Q

Рис. 2. Квантовый генетический алгоритм на основе кутритов

когда все вершины взвешенного неориентированного графа разделены на две группы S_1 и S_2 , сумма весов ребер, подлежащих разрезанию, обозначается как значение разрезания [11]:

$$C(\sigma) = \sum_{i \in S_1, j \in S_2} \omega_{ij} = \sum_{i > j} \omega_{ij} \left(\frac{1 - \sigma_i \sigma_j}{2} \right) \quad (8)$$

где ω_{ij} обозначает веса ребер с вершинами i и j , а $\sigma_i \in \{-1, +1\}$ означает, что вершина i делится на S_1 или S_2 , соответственно.

На рис. 3 серым пунктиром обозначена схема разрезания, серой сплошной линией — разрезаемые ребра, W_{ij} — веса, соответствующие ребрам, а темно-серыми слева и темно-серыми справа кружками — узлы, разделяемые на S_1 и S_2 .

Путем простого преобразования значение разреза изменяется на:

$$C(\sigma) = \frac{1}{2} \left(\sum_{i < j} \omega_{ij} - \sum_{i < j} \omega_{ij} \sigma_i \sigma_j \right) \quad (9)$$

где $\sum_{i < j} \omega_{ij} \sigma_i \sigma_j$ формально похож на гамильтониан модели

Изинга. В этой точке «узлы» в графе соответствуют спинам в модели Изинга, а «ребра» в графе соответствуют взаимодействиям между спинами. Квантовая версия этого гамильтониана имеет вид [11]:

$$H_{MaxCut} = \sum_{i < j} \omega_{ij} \sigma_i^z \sigma_j^z \quad (10)$$

где σ_i^z это матрица Паули-Z, действующая на i -й кутрит. Тогда максимизация значения разреза в уравнении (8) эквивалентна нахождению основного состояния гамильтониана модели Изинга в уравнении (9), поэтому квантовый генетический алгоритм можно использовать для решения задачи MaxCut.

Подводя итоги проведенному исследованию, можно сделать такие выводы.

Недавние аппаратные демонстрации и прогресс в составлении схем сделали квантовые вычисления с системами более высокой размерности (кутритами) на устройствах ближайшего будущего привлекательной возможностью. Некоторые проблемы имеют более естественное или оптимальное кодирование с помощью кутритов, чем с помощью кубитов. В связи с этим в статье рассмотрены возможности использования улучшенного квантового генетического алгоритма с кутритами для решения задач функциональной оптимизации.

В статье представлен авторский подход к генетическому квантовому алгоритму на основе кутритов, кото-

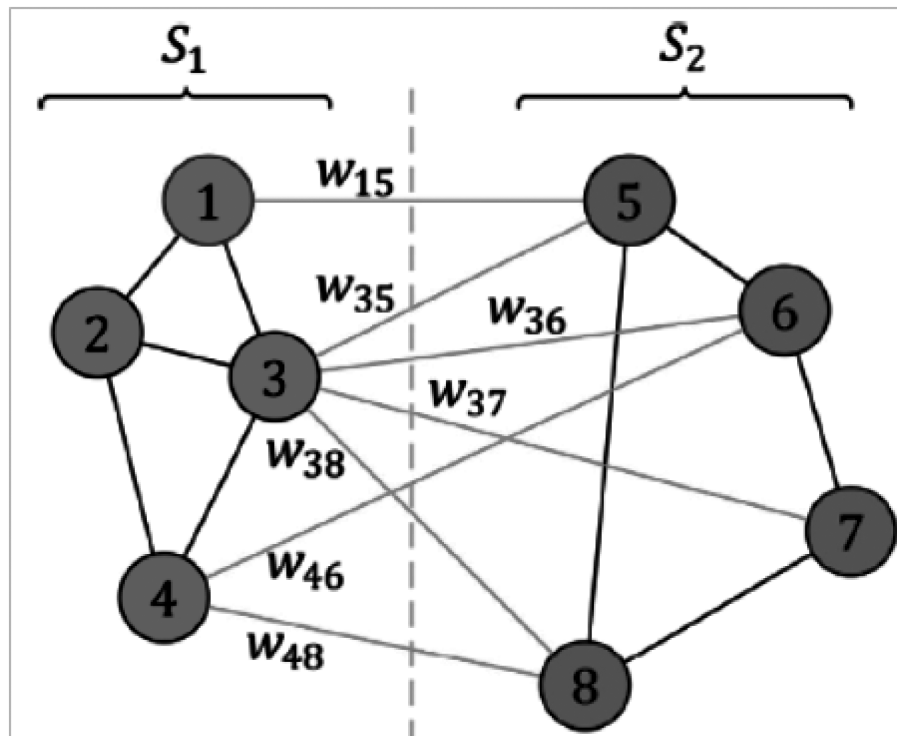


Рис. 3. Схематическое изображение задачи MaxCut

рый опирается на новую технику использования кутритов для достижения логарифмической глубины (времени выполнения) декомпозиции обобщенного затвора Хадмарда без использования анксилла. Предполагается, что предложенный алгоритм позволит получить значительное снижение стоимостных показателей, включая

запутывающие ворота на слой и глубину схемы. Решение задачи MaxCut показывает, что алгоритм имеет более высокую вероятность выборки правильного решения, и может делать это с меньшим количеством слоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тырышкин, С.Ю. Эффективные квантовые алгоритмы для квантового оптимального управления / С.Ю. Тырышкин // Современные наукоемкие технологии. — 2025. — № 3. — С. 66–72. — DOI 10.17513/snt.40325. — EDN TJJKOE.
2. Xiaoming Yang Fuzzy Control Path Planning of Soccer Robot Relying on Quantum Genetic Algorithm // Mobile Information Systems. 2022. Volume 2022, Issue 1. P. 56–62.
3. Скобцов Ю.А. Сравнение традиционных квантовых генетических алгоритмов // Математические методы в технологиях и технике. 2023. № 4. С. 91–95.
4. Abdulbasit M.A. Sabaawi, Mohammed R. Almasaoodi Energy efficiency optimisation in massive multiple-input, multiple-output network for 5G applications using new quantum genetic algorithm // IET Networks. 2023. Volume 13, Issue 2. P. 113–119.
5. Fan Yang, Jiawen Chen Application of QGA algorithm improved by gradient descent in fault diagnosis and location of distributed distribution network // Advanced Control for Applications: Engineering and Industrial Systems. 2023. № 45. P. 11–19.
6. Антонов И.В. Синтез структуры организованных систем как центральная проблема эволюционной кибернетики // Компьютерные исследования и моделирование. 2023. Т. 15. №5. С. 1103–1124.
7. Yuanyuan Li, Qichun Sun Rolling Bearing Fault Diagnosis Based on SVM Optimized with Adaptive Quantum DE Algorithm // Shock and Vibration. 2022. Volume 2022, Issue 1. P. 87–92.
8. Xiao Wang, Yan Li Facial Recognition System Based on Genetic Algorithm Improved ROI-KNN Convolutional Neural Network // Applied Bionics and Biomechanics. 2022. Volume 2022, Issue 1. P. 76–82.
9. Jinlei Zhang, Xue Qiu Corrigendum to "Support Vector Machine Weather Prediction Technology Based on the Improved Quantum Optimization Algorithm // Computational Intelligence and Neuroscience. 2022. Volume 2022, Issue 1. P. 34–39.
10. Umar Lucio Rezende An approach based on genetic algorithms and machine learning coupled for studying alloy and molecular clusters by optimizing quantum energy surfaces // Journal of Computational Chemistry. 2023. Volume 44, Issue 24. P. 44–51.
11. Уваров Н.К. Модификации квантового алгоритма Гровера и подходы к их реализации // Информатизация и связь. 2022. №4. С. 42–50.

© Тырышкин Сергей Юрьевич (service.vip-spe@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В УПРАВЛЕНИИ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ: ПЕРСПЕКТИВЫ, ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

Фомичев Сергей Михайлович

Аспирант, Московский финансово-юридический
университет МФЮА
fomichevsm@gmail.com

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS MANAGEMENT: PROSPECTS, CHALLENGES, AND STRATEGIC DIRECTIONS OF DEVELOPMENT

S. Fomichev

Summary. This article examines modern aspects of the implementation of artificial intelligence (AI) technologies in organizational systems management processes. Particular attention is paid to the development of automated decision-making systems, robotic process automation (RPA), supply chain management, and strategic approaches to integrating AI into management practice. Prospects, challenges, and possible development scenarios are analyzed, and recommendations are offered for the formation of effective strategies for using AI in the management of organizations of the future.

Keywords: artificial intelligence, organizational systems, automation of management processes, robotics, supply chain management, self-learning AI, strategic development directions.

Аннотация. В данной статье рассматриваются современные аспекты внедрения технологий искусственного интеллекта (ИИ) в процессы управления организационными системами. Особое внимание уделяется развитию автоматизированных систем принятия решений, роботизированной автоматизации процессов (РАП), управлению цепочками поставок и стратегическим подходам к интеграции ИИ в управленческую практику. Анализируются перспективы, вызовы и возможные сценарии развития, а также предлагаются рекомендации по формированию эффективных стратегий использования ИИ в управлении организациями будущего.

Ключевые слова: искусственный интеллект, организационные системы, автоматизация управленческих процессов, роботизация, управление цепочками поставок, самообучение ИИ, стратегические направления развития.

Современные организации представляют собой сложные системные образования, функционирование которых требует постоянного анализа, принятия решений и оптимизации внутренних процессов. В условиях глобальной конкуренции, высокой динамики рыночных условий и постоянно растущего объема данных традиционные методы управления перестают обеспечивать необходимую эффективность и оперативность реагирования. В этой связи внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ) в управленческие процессы становится одним из ключевых факторов повышения конкурентоспособности и адаптивности современных предприятий.

Технологии ИИ позволяют автоматизировать рутинные операции, повысить качество аналитики, ускорить принятие управленческих решений и снизить вероятность ошибок. Однако внедрение ИИ в организационные системы сопряжено с рядом вызовов, связанных как с технологическими аспектами, так и с организаци-

онной культурой, этическими вопросами и вопросами безопасности данных. В данной статье рассматриваются основные направления развития ИИ в управлении организациями, анализируются возникающие в связи с этим перспективы и вызовы, а также предлагаются стратегические подходы к интеграции ИИ в управленческие системы.

Одним из наиболее активно развивающихся направлений является использование ИИ для анализа больших данных и построения прогнозных моделей. В современных организациях активно внедряются системы машинного обучения, глубокие нейронные сети и алгоритмы предиктивной аналитики, позволяющие выявлять скрытые тренды, аномалии и взаимосвязи в данных, что существенно повышает качество стратегического и оперативного планирования.

Например, в сфере финансового менеджмента системы ИИ используются для оценки рисков и прогно-

зирования рыночных тенденций, а в маркетинге — для анализа потребительского поведения и определения наиболее эффективных рекламных стратегий [1]. В логистике и управлении запасами алгоритмы предиктивной аналитики позволяют заранее прогнозировать спрос, планировать закупки и оптимизировать складские операции.

Современные системы способны в режиме реального времени собирать и анализировать данные из различных источников — внутренние бизнес-системы, социальные сети, открытые источники рынка. Это дает руководству возможность быстро реагировать на изменения ситуации, корректировать стратегии и принимать обоснованные решения, основанные на актуальной информации.

Роботизированная автоматизация процессов (РАП) уже стала неотъемлемой частью многих управленческих сфер. Внедрение систем на базе ИИ позволяет автоматизировать обработку документов, ввод данных, управление запасами, финансовый учет, а также ряд других операционных задач. В результате значительно снижается трудозатратность, повышается точность и скорость выполнения операций, а также минимизируются человеческие ошибки.

Например, системы автоматического ввода данных из сканов документов, автоматическая сверка счетов, генерация отчетов и автоматическое заполнение форм — все это стало возможным благодаря развитию технологий ИИ. В ряде компаний внедрение таких решений позволило в разы сократить сроки обработки документов и повысить качество данных.

Особенно важна интеграция РАП-систем с корпоративными информационными системами (ERP, CRM, SCM), что обеспечивает бесшовное взаимодействие всех бизнес-процессов внутри организации. Такие системы позволяют не только ускорить выполнение рутинных задач, но и освободить ресурсы для выполнения более креативных и стратегически важных функций, что особенно актуально в условиях высоких объемов данных и необходимости высокой оперативности.

Искусственный интеллект служит мощным инструментом для поддержки руководителей. Используя аналитические отчеты, модели предсказания и сценарное моделирование, системы ИИ могут предложить оптимальные решения в сложных ситуациях.

Например, при планировании производства системы ИИ способны моделировать различные сценарии и оценивать их последствия, что помогает минимизировать риски и повысить эффективность. В управлении цепочками поставок такие системы позволяют учитывать множество факторов — от внешних условий до внутренних ресурсов — и принимать решения, минимизирующие издержки и повышающие уровень обслуживания.

Особенностью таких систем является баланс между автоматическим принятием решений и ролью человека как контролера и критика [2]. Важным аспектом является прозрачность решений ИИ, а также возможность руководства вмешиваться и корректировать автоматизированные сценарии. Такой подход обеспечивает более высокий уровень ответственности и этической ответственности за принятые решения [3].

В ближайшем будущем ожидается значительный рост числа систем с возможностью самообучения и автономного функционирования. В настоящее время большинство систем требуют постоянного человеческого вмешательства для обучения и корректировки моделей, однако развитие технологий делает возможным создание полностью автономных систем, способных самостоятельно анализировать свои ошибки, адаптироваться к новым условиям и принимать решения без участия человека.

Такие системы смогут не только выполнять рутинные задачи, но и участвовать в стратегическом управлении. Например, системы, управляющие производственными линиями или логистическими цепочками, смогут самостоятельно оптимизировать процессы, реагировать на изменения спроса и внешних условий, что значительно повысит эффективность и устойчивость бизнеса [4].

Важным направлением является внедрение ИИ на уровне формирования стратегий развития. Системы смогут моделировать множество сценариев, учитывать внешние и внутренние факторы, прогнозировать возможные риски и предлагать оптимальные пути развития [5].

Это позволит создать более гибкие, адаптивные и проактивные механизмы управления, снизить вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором, и повысить конкурентоспособность организации. Внедрение ИИ в процессы стратегического планирования также способствует созданию динамических систем мониторинга и оценки эффективности реализации стратегий, что позволяет своевременно корректировать направления развития.

Развитие технологий ИИ в сфере логистики и цепочек поставок обещает революцию в управлении запасами, транспортировкой и взаимодействием с поставщиками и клиентами. Использование автономных транспортных средств, дронов и систем предиктивного анализа сделает логистические операции более точными, быстрыми и дешевыми.

Например, системы смогут автоматически планировать маршруты, учитывать погодные условия, дорожные ситуации и риски, а также вовремя реагировать на неожиданные ситуации, такие как задержки или повреждение грузов. В результате организации смогут значительно сократить сроки доставки, снизить издержки и повысить уровень обслуживания клиентов.

Несмотря на достижения, внедрение ИИ сталкивается с рядом технических ограничений. Обработка больших объемов данных требует мощной инфраструктуры — высокопроизводительных серверов, систем хранения и быстрого соединения. Интеграция новых решений с существующими корпоративными системами зачастую требует значительных затрат и времени.

Ключевым аспектом является обеспечение кибербезопасности — защита данных и систем от внешних и внутренних угроз. Также важна подготовка квалифицированных специалистов по работе с данными, инженеров по машинному обучению, аналитиков, что зачастую становится барьером для многих организаций.

Использование ИИ вызывает множество этических вопросов — ответственность за автоматические решения, приватность данных, возможность предвзятости в моделях. Недостаточная прозрачность алгоритмов (черный ящик) может привести к недоверию со стороны сотрудников и клиентов.

Не менее важны правовые аспекты: обработка персональных данных, интеллектуальная собственность, ответственность за сбои и ошибки систем ИИ. Отсутствие четких нормативных актов и стандартов может тормозить развитие технологий и их внедрение.

Высокий уровень автономности систем ИИ способен привести к ситуациям, когда управление ими станет сложным или невозможным. Автоматические решения на основе сложных моделей могут иметь непредсказуемые последствия, что требует разработки механизмов контроля, мониторинга и вмешательства человека.

Организациям необходимо формировать стратегические планы внедрения ИИ, включающие этапы пилотных проектов, масштабирования успешных решений, обучения персонала и развития инфраструктуры. Важным является создание межфункциональных команд, ответственных за развитие и контроль внедрения.

Для эффективного использования ИИ важно повышать уровень цифровой грамотности сотрудников,

создавать внутренние центры экспертизы, развивать партнерства с университетами и исследовательскими центрами. Инвестиции в облачные платформы, аналитические системы и безопасную инфраструктуру обеспечат стабильную работу решений.

Разработка и внедрение стандартов этики и ответственности в использовании ИИ поможет снизить риски и повысить доверие. Важно участвовать в международных и национальных дискуссиях, обеспечивать прозрачность алгоритмов и решений систем ИИ.

Современные тенденции показывают, что роль человека в управлении постепенно смещается от оператора к стратегическому координатору и контролеру систем ИИ. В будущем организации, использующие интегрированные и самообучающиеся системы, смогут работать более гибко и быстро реагировать на изменения внешней среды.

Концепция «умных предприятий», где автоматизированные системы управляют производством, логистикой, финансами и стратегией, становится все более реалистичной. В таких системах роль руководства сводится к постановке целей, контролю и этическому регулированию, в то время как рутинные задачи выполняют интеллектуальные системы.

Внедрение технологий искусственного интеллекта в управление организационными системами открывает новые горизонты для повышения эффективности, гибкости и инновационности предприятий. Однако для достижения максимальных результатов необходимо учитывать существующие вызовы — технические, этические, правовые — и разрабатывать стратегические подходы к развитию, интеграции и ответственному использованию ИИ. В будущем развитие самообучающихся, автономных и интегрированных систем ИИ способно привести к глубокой трансформации управленческих практик, где роль человека будет сосредоточена на стратегическом видении, этическом регулировании и контроле, а машины станут надежными партнерами в достижении целей организации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф.А. Бедненко. Использование искусственного интеллекта в финансовом менеджменте организации для улучшения управления финансами // Экономика строительства, №8, 2023 — С.43–46
2. А.А. Гершанок. Управление организацией на основе искусственного интеллекта // Journal of Economy and Business, vol. 5-1 (75), 2021 — С.137–139.
3. Н.В. Дмитриева. Роль искусственного интеллекта в управлении современно организацией // Вестник университета мировых цивилизаций, том.14, № 4(41), 2023, — С.86–90.
4. А.С. Бевз. Актуальность внедрения RPA-технологии в бизнес-процессы предприятия // Международный научный журнал «Вестник науки» № 7(64), 2023 — С.139–143.
5. М.А. Садикова, Н.К. Авазова. Самообучение искусственного интеллекта, базовые принципы работы искусственного интеллекта на простом примере // Электронный научный журнал «Потомки Аль-Фаргани» Ферганского филиала ТАТУ имени Мухаммада аль-Хоразми, Выпуск 4, 2023 — С. 246–250.

© Фомичев Сергей Михайлович (fomichevsm@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАШИН ОПОРНЫХ ВЕКТОРОВ В КЛАССИФИКАЦИИ ДАННЫХ И ИХ ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Хежжо Мухсен

Аспирант, Казанский федеральный университет
muhseen.hejoo@gmail.com

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF SUPPORT VECTOR MACHINES IN DATA CLASSIFICATION AND THEIR PRACTICAL

Hejjo Muhsen

Summary. The aim of the study is to improve the efficiency of unmanned aerial vehicles (One of the classification methods presented in this work is the support vector machine classifier. The support vector machine (SVM) is a supervised learning method that ensures a correspondence between desired input and output data. This method is based on statistical learning theory and is applied to classification tasks such as disease diagnosis, image classification, and handwritten text recognition. Traditional artificial neural networks face challenges in generalization because they rely on the principle of empirical risk minimization (ERM). Consequently, in 1995, Vapnik developed the support vector machine method to enhance the generalization process based on the principle of structural risk minimization (SRM). This principle surpasses empirical risk minimization, as it focuses on reducing the upper bound of expected risk rather than merely minimizing errors in the training set. This distinction provides the support vector machine with greater generalization capabilities, which is a key goal of statistical learning.

Keywords: Support vectors, support vector machine, Lagrange multiplier, kernel trick, maximum margin.

Аннотация. Одним из методов классификации, рассматриваемых в данной работе, является классификатор на основе машин опорных векторов. Машина опорных векторов (SVM) представляет собой метод обучения с учителем, который обеспечивает соответствие между желаемыми входными и выходными данными. Этот метод основан на статистической теории обучения и находит применение в задачах классификации, таких как диагностика заболеваний, классификация изображений и распознавание рукописного текста. Традиционные искусственные нейронные сети сталкиваются с проблемами обобщения, поскольку они основываются на принципе минимизации эмпирического риска (ERM). В связи с этим, в 1995 году Вапник разработал метод машин опорных векторов, направленный на улучшение процесса обобщения на основе принципа минимизации структурного риска (SRM). Данный принцип превосходит минимизацию эмпирического риска, так как он фокусируется на снижении верхнего предела ожидаемого риска, а не только на уменьшении ошибок в обучающем наборе. Это различие обеспечивает векторной машине повышенные способности к обобщению, что является ключевой целью статистического обучения.

Ключевые слова: опорные векторы, машина опорных векторов, множитель Лагранжа, ядерный трюк, максимальная маржа.

Введение

Современные достижения в области машинного обучения открывают новые возможности для решения сложных задач классификации данных, особенно в контексте автономных систем и медицинской диагностики. Одним из ключевых методов, демонстрирующих высокую эффективность в этих областях, является метод опорных векторов (SVM). Его уникальность заключается в способности находить оптимальные границы решений, минимизируя структурный риск, что обеспечивает устойчивость к переобучению и высокую обобщающую способность. В отличие от традиционных искусственных нейронных сетей, основанных на минимизации эмпирического риска, SVM опирается на принцип структурной минимизации риска, предложенный Вапником, что делает его особенно ценным для работы с ограниченными наборами данных и задачами высокой размерности. Целью данной работы является комплекс-

ный анализ метода SVM, включая его теоретические основы, преимущества перед другими подходами, а также практическое применение в реальных сценариях. В статье рассматриваются ключевые аспекты SVM: от математического обоснования максимального зазора и использования множителей Лагранжа до применения ядерных функций для нелинейно разделимых данных. Особое внимание уделено сравнительному анализу SVM с классическими нейронными сетями, что позволяет выделить его сильные стороны в контексте задач классификации. Практическая значимость исследования подтверждается примерами использования SVM в диагностике рака молочной железы и управлении группами беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Эти приложения демонстрируют, как теоретические принципы метода трансформируются в эффективные инструменты для решения реальных проблем. Статья структурирована следующим образом: в первом разделе представлены теоретические основы SVM, включая линейные и нелинейные

модификации. Далее рассматриваются методы оптимизации и применения ядерных функций. Заключительные разделы посвящены практическим кейсам и выводам, подчеркивающим роль SVM в современных технических и медицинских исследованиях. Работа вносит вклад в развитие методов машинного обучения, предлагая как теоретический анализ, так и практические рекомендации для инженеров и исследователей, работающих в области анализа данных и искусственного интеллекта.

Векторы поддержки и максимальная маржа

Этот метод использует подмножество обучающих примеров, известных как опорные векторы, для представления границы решения путем поиска наибольшего запаса, на который данные расходятся с обоих концов. Это гиперплоскость с максимальными запасами. Цель выбора пределов решения с максимальными запасами заключается в том, что максимальные запасы делают ошибки при обобщении пределов принятия решений минимальными [2].

Машина опорных векторов

Ниже мы показываем машину опорных векторов в случае линейно разделимых и неразделимых данных, а также машину нелинейных опорных векторов [7].

Машина опорных векторов для линейно разделимых данных (SVM)

Если $x_i = (x_1, \dots, x_d)$ представляет собой набор атрибутов линейно разделимых данных двоичной классификации, (представленных кружками и треугольниками), которые предназначены для классификации в набор классов $y_i = \{-1, 1\}$. Взяв обучающий набор N , как показано на рисунке (1).

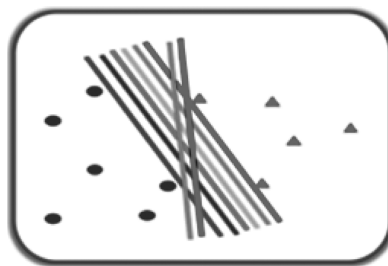


Рис. 1. Уровни разделения данных

Мы замечаем, что существует более одной плоскости для разделения данных, но плоскость, которую ищет машина опорных векторов, это плоскость, к которой приближаются или лежат опорные векторы (обозначенные пунктирными кружками обоих типов), как показано на рисунке (2).

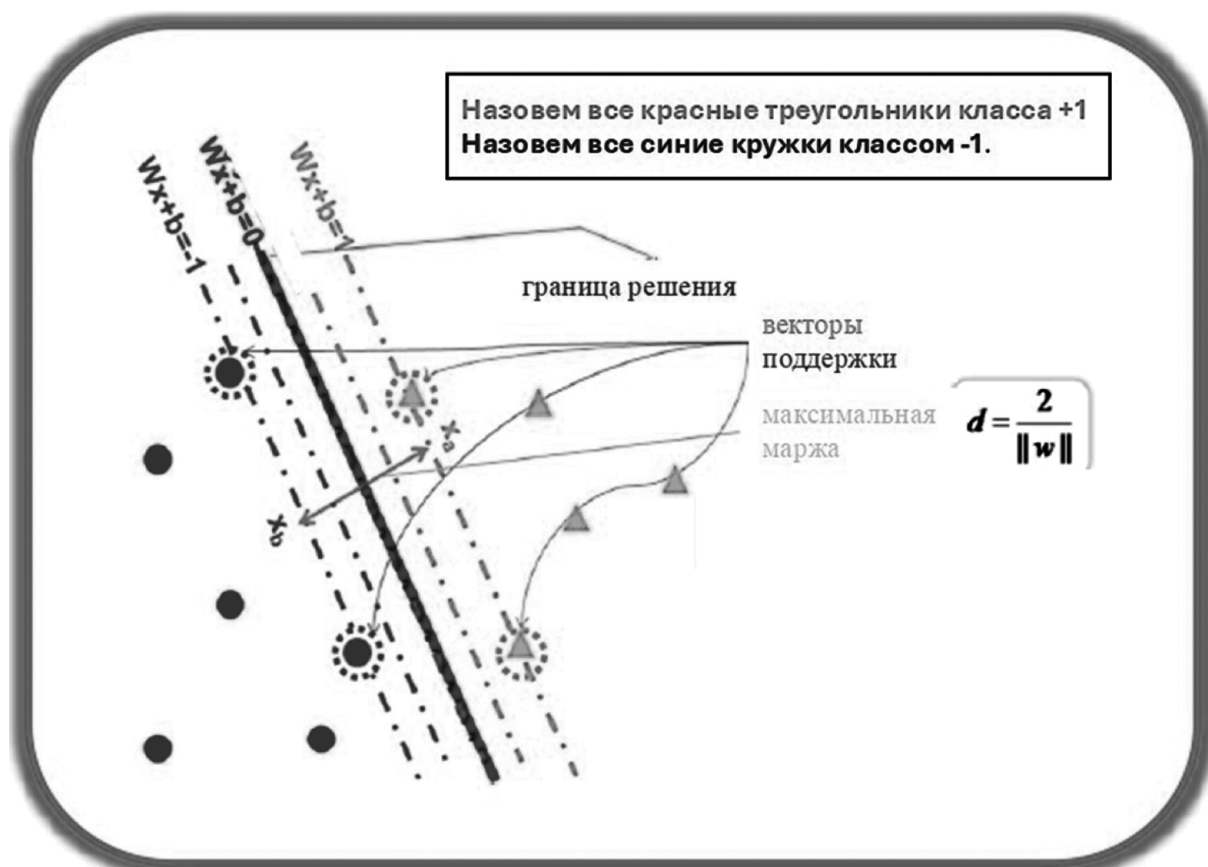


Рис. 2. Граница принятия решения о разделении данных, определяемая опорными векторами для линейно разделимых данных

Если x входной вектор, а w, b посредник модели, то предел решения для линейного классификатора определяется уравнением [8]:

$$wx + b = 0 \quad (1)$$

Точки решения средней прямой удовлетворяют ее уравнению. Что касается точек, лежащих выше предела решения (треугольники), то они достигают $wx + b > 0$ а точки ниже предела решения (кружки) достигают $wx + b < 0$. Если отметить категории Y соответственно любая запись данных классифицируется следующим образом:

$$Y = \begin{cases} 1 & \text{если } wx + b \geq 1 \\ 0 & \\ -1 & \text{если } wx + b \leq -1 \end{cases} \quad (2)$$

Что записано в виде:

$$Y_i (wx_i + b) \geq 1 \quad (3)$$

Рассчитать маржу линейного классификатора

Треугольник, ближайший к пределу решения, достигает $wx_1 + b = 1$ и круг, ближайший к пределу решения, достигает $wx_2 + b = -1$ и расстояние между ними d представляет собой линейную границу книги. Вычитая два уравнения, находим:

$$w(x_1 - x_2) = 2 \Rightarrow wd = 2$$

Если ширина поля d :

$$d = \frac{2}{w} \quad (4)$$

Изучение линейной машины опорных векторов

Линейная машина опорных векторов поставляется с обучающим набором [6]. Чтобы оценить медиаторы предела решения линейного классификатора w, b из обучающего набора. Две медианы оцениваются w, b так, чтобы были выполнены два условия:

$$wx_i + b \geq -1 \text{ если } y_i = -1 \quad (5)$$

$$wx_i + b \leq 1 \text{ если } y_i = 1 \quad (6)$$

Процесс машинного обучения опорных векторов направлен на достижение наибольшего запаса $d = \frac{2}{\|w\|}$ от которого данные отходят с обоих концов. Это приводит к задаче нелинейного программирования с ограничениями, представленной целевой функцией

$$f(w) = \min_w \frac{\|w\|^2}{2} \quad (7)$$

С письменными ограничениями

$$y_i (wx_i + b) \geq 1, i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

Это задача выпуклой оптимизации, поскольку целевая функция представляет собой уравнение второй степени, а ограничения линейны по параметрам w, b и она решается с использованием метода множителей Лагранжа. Это метод нахождения значений локальных пределов функции нескольких переменных, подчиняющихся одному или нескольким ограничениям. Этот метод сводит задачу с n переменными с k ограничениями к разрешимой задаче с $n+k$ переменными без каких-либо ограничений. Этот метод использует неизвестную постоянную переменную (факториал Лагранжа) для каждого ограничения и формирует линейные структуры, которые включают факториалы Лагранжа в качестве коэффициентов. Сформируем функцию Лагранжа для задачи оптимизации:

$$L_p = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^N \lambda_i (y_i (wx_i + b) - 1) \quad (9)$$

Где λ_i факториалы Лагранжа. Чтобы сделать функцию Лагранжа минимальной, придаем частным производным L по w, b нулевое значение, находим:

$$\frac{\partial L_p}{\partial w} = 0 \Rightarrow w = \sum_{i=1}^N \lambda_i y_i x_i \quad (10)$$

$$\frac{\partial L_p}{\partial b} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^N \lambda_i y_i = 0 \quad (11)$$

Факториалы Лагранжа λ_i неизвестны, поэтому решение невозможно для w, b . Поэтому мы преобразуем ограничения-неравенства в набор ограничений-равенств и получаем факториальные ограничения Лагранжа, известные как Каруша-Куна. — Условия Такера (ККТ).

$$\lambda_i \geq 0 \quad (12)$$

$$\lambda_i [y_i (wx_i + b) - 1] = 0 \quad (13)$$

Число медиаторов по-прежнему велико, и для простоты преобразуем функцию Лагранжа в функцию для факториалов Лагранжа, только взяв задачу, сопровождающую задачу оптимизации:

$$L_D = \sum_{i=1}^N \lambda_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \lambda_i \lambda_j y_i y_j x_i x_j \quad (14)$$

Решая сопутствующую задачу (с использованием численных методов, таких как квадратичное программирование), получаем значения λ_i . Расчет w, b . Используем два уравнения ...:

Это будет предел решения [3]

$$\left(\sum_{i=1}^N \lambda_i y_i \chi_i \right) x + b = 0 \quad (15)$$

**Машина опорных векторов
для линейно неразделимых данных
(Нелинейно разделимая SVM)**

В случае неразделимых линейных данных, как показано на рисунке (3)

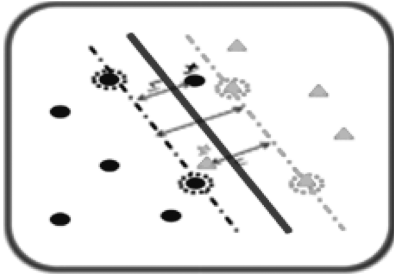


Рис. 3. Граница принятия решения о разделении данных, определяемая опорными векторами для данных, которые не являются линейно разделимыми

В этом случае машина опорных векторов использует мягкий запас, который позволяет пределу решения допускать небольшие ошибки обучения, поскольку данные не являются линейно разделимыми. Когда машина опорных векторов находит компромисс между шириной поля и количеством ошибок обучения, допущенных пределом решения, путем уменьшения линейных ограничений для соответствия данным путем введения формальных переменных L_i , пределы решения принимают форму:

$$Y = \begin{cases} 1 & \text{если } wx + b \geq 1 - L_i \\ 0 & \\ -1 & \text{если } wx + b \leq -1 + L_i; L_i > 0 \end{cases} \quad (16)$$

Чтобы алгоритм обучения не увеличивал предел решения и некорректно классифицировал множество обучающих примеров, предел решения модифицируется путем наложения штрафа на целевую функцию путем присвоения больших значений ее формальным переменным, так что

$$f(w) = \frac{\|w\|^2}{2} + C \left(\sum_{i=1}^N L_i \right)^k \quad (17)$$

Где C, k представляет собой параметр штрафа за классификацию и определяется пользователем. Для $k = 1$ это функция Лагранжа для задачи оптимизации с ограничениями.

$$L_p = \frac{\|w\|^2}{2} + C \sum_{i=1}^N L_i - \sum_{i=1}^N \lambda_i (y_i (wx_i + b) - 1 + L_i) - \sum_{i=1}^N \mu_i L_i \quad (18)$$

Термин $\sum_{i=1}^N \mu_i L_i$ был добавлен для того, чтобы значения не были отрицательными L_i , $L_p = \frac{\|w\|^2}{2} + C \sum_{i=1}^N L_i$ представляет собой целевую функцию, которую необходимо минимизировать до наименьшее значение. В то время как $\sum_{i=1}^N \lambda_i (y_i (wx_i + b) - 1 + L_i)$ представляет собой арбитражные ограничения, которые преобразуются с помощью условий Каруша-Куна-Такера (ККТ) в ограничения равенства

$$\begin{cases} L_i \geq 0, \lambda_i \geq 0, \mu_i \geq 0 \\ \lambda_i (y_i (wx_i + b) - 1 + L_i) = 0 \\ \mu_i L_i = 0 \end{cases} \quad (19)$$

Коэффициенты Лагранжа μ_i в последнем уравнении равны нулю для $L_i \geq 0$ что соответствует неправильно классифицированным примерам обучения.

Чтобы сделать функцию Лагранжа минимальной, приведем частные производные L по L_i, w, b нулевому значению. Находим:

$$\frac{\partial L}{\partial w_j} = w_j - \sum_{i=1}^N \lambda_i y_i \chi_{ij} = 0 \Rightarrow w_j = \sum_{i=1}^N \lambda_i y_i \chi_{ij} \quad (20)$$

$$\frac{\partial L}{\partial b} = -\sum_{i=1}^N \lambda_i y_i = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^N \lambda_i y_i = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial L}{\partial L_i} = C - \lambda_i - \mu_i = 0 \Rightarrow \lambda_i + \mu_i = C \quad (22)$$

Подставив его в функцию Лагранжа, найдем функцию Лагранжа для задачи, сопровождающей задачу оптимизации:

$$L_D = \frac{1}{2} \sum_{i,j} \lambda_i \lambda_j y_i y_j x_i x_j + C \sum_i L_i - \sum_i \lambda_i \left\{ y_i \left(\sum_j \lambda_j y_j x_j + b \right) - 1 + L_i \right\} - \sum_i (C - \lambda_i) L_i \quad (23)$$

Отметим, что функции Лагранжа совпадают в случае линейно разделимых и нелинейно разделимых данных. Ограничения на функцию Лагранжа в двух случаях различны. В случае разделимых данных оно было $\lambda_i = 0$, но в случае нелинейно разделимых данных λ_i оно должно достигать $0 \leq \lambda_i \leq C$.

Вычисление медиаторов предела решения осуществляется путем решения задачи, сопровождающей задачу оптимизации по нахождению факториалов Лагранжа λ_i и подстановки их в (17) и условия ККТ[2].

Машина опорных векторов для SVM нелинейных данных

Если набор данных имеет нелинейную границу решения (рис. 4), он преобразуется так, что линейную границу решения можно использовать для разделения набора обучающих данных в пространстве, в которое он был преобразован...[4]

То есть признаки x в исходном пространстве заменяются преобразованными признаками $\Phi(x)$. Таким образом, задачей обучения в нелинейной машине опорных векторов является следующая задача оптимизации:

$$f(w) = \min_w \frac{\|w\|^2}{2}$$

Итак, это:

$$y_i(w \cdot \Phi(x_i) + b) \geq 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (24)$$

Функция Лагранжа, связанная с задачей оптимизации:

$$L_D = \sum_{i=1}^N \lambda_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} L_i \lambda_i \lambda_j y_i y_j \Phi(x_i) \Phi(x_j) \quad (25)$$

Решая сопутствующую задачу (с использованием численных методов, таких как квадратичное программирование), мы получаем значения λ_i . Для расчета w, b мы используем два уравнения [4]

$$w = \sum_{i,j} \lambda_i y_i \Phi(x_i) \quad (26)$$

$$\lambda_i \left\{ y_i \left(\sum_j \lambda_j \Phi(x_j) \cdot \Phi(x_i) + b \right) - 1 \right\} = 0 \quad (27)$$

Хитрость ядра

Трюк с ядром — это метод вычисления сходства между векторами в пространстве, в которое они были преобразованы, с использованием исходных признаков, то есть нахождение произведения $\Phi(x_j) \cdot \Phi(x_i)$ чтобы узнать сходство между двумя векторами x_j, x_i . Это делается с помощью функции сходства K в исходном пространстве, известной как функция ядра. Существует множество функций ядра, таких как функция Гаусса.

$$K(x, y) = e^{-\frac{\|x-y\|^2}{2\sigma^2}} \quad (28)$$

Функция логистического ядра

$$K(x, y) = \tanh(kx \cdot y - \delta) \quad (29)$$

Полиномиальная функция

$$K(x, y) = \Phi(x) \cdot \Phi(y) = (x \cdot y + 1)^2 \quad (30)$$

Некоторые функции ядра показаны в Приложении 3.

Преимущества и недостатки машины опорных векторов Адв. И недостатки SVM

1. Легкость обучения (обучения).
2. Он характеризуется своей силой для небольшого и большого количества переменных.
3. Он использует передовые математические принципы, чтобы избежать переобучения и хранения большого количества примеров.

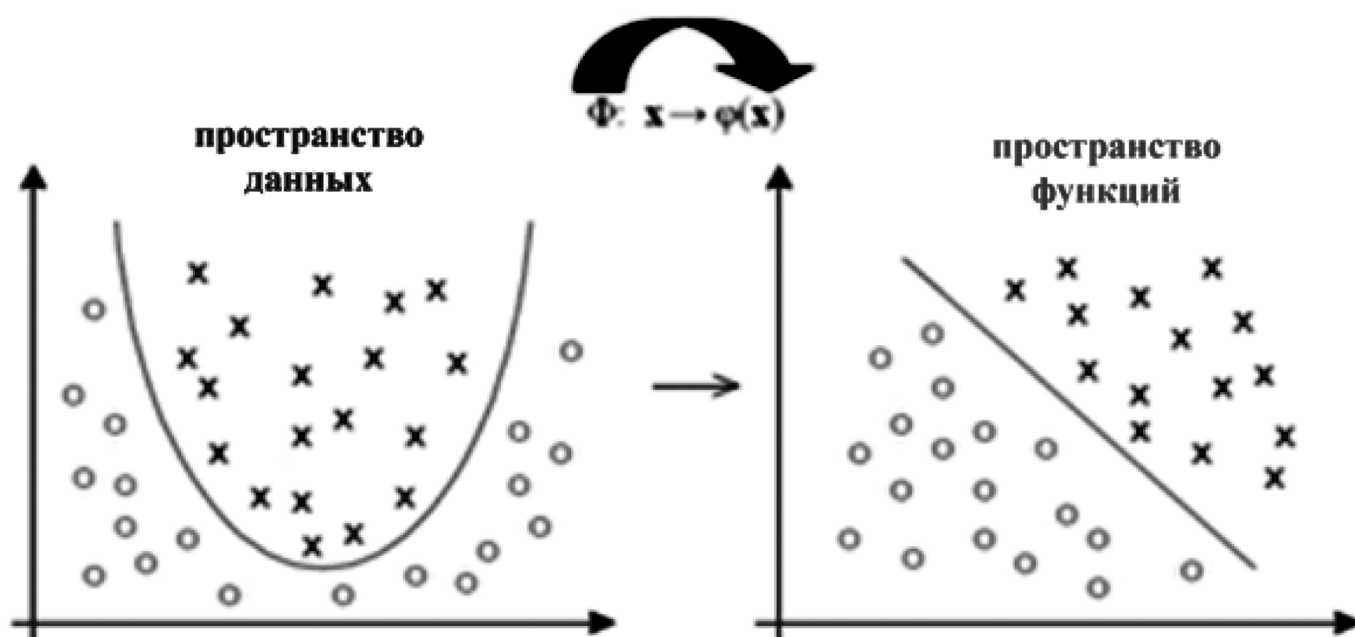


Рис. 4. Преобразование нелинейных данных в линейно разделимые данные

4. В отличие от сетей нет локальных минимумов.
5. Возможность преобразования данных в более высокие измерения.

Это недостаток машины опорных векторов.

1. Необходимо выбрать функцию Кемеля.
2. Это отнимает время.

Приложения для машин опорных векторов

Ниже мы представляем два применения машины опорных векторов. В первом показан механизм расчета параметров машины опорных векторов для установки границы решения двумерного набора данных, а во втором показано применение машины опорных векторов к образцу. пациентов с раком молочной железы, использующих пакет программного обеспечения Matlab.

Приложение (1): В этом примере мы показываем применение машины опорных векторов к двумерному набору данных.

Таблица 1.

Машины опорных векторов
к двумерному набору данных

Входные данные		Целевой результат
x_1	x_2	y
0.3858	0.4687	1
0.4871	0.611	-1
0.9218	0.4103	-1
0.7382	0.8936	-1
0.1763	0.579	1
0.4057	0.3529	1
0.9355	0.8132	-1
0.8146	0.0093	1

Сначала необходимо рассчитать коэффициенты Лагранжа λ_i соответствующие каждому обучающему примеру.

Это делается путем решения задачи оптимизации

$$L = \sum_{i=1}^N \lambda_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \lambda_i \lambda_j y_i y_j x_i x_j$$

Используя квадратичное программирование, находим:

$$\lambda_1 = 65.5261, \lambda_2 = 65.5261, \lambda_3 = 0, \lambda_4 = 0, \\ \lambda_5 = 0, \lambda_6 = 0, \lambda_7 = 0, \lambda_8 = 0$$

$\lambda_1 \neq 0$ означает, что первый обучающий пример представляет собой опорный вектор для обучающего набора.

$\lambda_2 \neq 0$ означает, что второй обучающий пример представляет собой опорный вектор для обучающего набора.

Уравнение предела решения:

$$wx + b = w_1 x_1 + w_2 x_2 + b = 0.$$

Вычислим два посредника w, b

Матрица весов

$$w = \{w_1, w_2\} \Rightarrow w_i = \sum_{i=1}^N \lambda_i y_i x_i \\ w_1 = \lambda_1 y_1 x_{11} + \lambda_2 y_2 x_{21}$$

$$w_1 = 65.5261 * 1 * 0.3858 + 65.5261 * (-1) * 0.4871 = -6.64$$

$$w_2 = \lambda_1 y_1 x_{12} + \lambda_2 y_2 x_{22}$$

$$w_2 = 65.5261 * 1 * 0.4687 + 65.5261 * (-1) * 0.611 = -9.32$$

Предвзятость

$$b = \{b_1, b_2\} = \{1 - w \cdot x, -1 - w \cdot x\}$$

$$b_1 = 1 - w_1 x_{11} - w_2 x_{12} = \\ = 1 - (-6.64)(0.3858) - (-9.32)(0.4687) = 7.93$$

$$b_2 = -1 - w_1 x_{21} - w_2 x_{22} = \\ = -1 - (-6.64)(0.4871) - (-9.32)(0.611) = 7.9289$$

b представляет собой среднее из двух значений b_1, b_2 т.е.

$$b = \frac{b_1 + b_2}{2} = \frac{7.93 + 7.9289}{2} = 7.93$$

Уравнение становится пределом решения

$$-6.64x_1 - 9.32x_2 + 7.93$$

Приложение (2): В этом приложении мы показываем диагноз рака молочной железы для выборки из 80 записей из набора данных о пациентах с раком молочной железы с использованием машины опорных векторов (SVM).

При применении машины опорных векторов к набору данных о пациентах с раком молочной железы машина опорных векторов выполняет этап обучения для оценки параметров классификатора, затем обобщает свои знания для записей, на которых она не обучалась, и выполняет процесс классификации. Машина опорных векторов была обучена на 57 записях и протестирована на 23 записях. В таблице показано 2 количество обучающих и тестовых выборок для доброкачественных и злокачественных случаев при применении машины опорных векторов.

Таблица 2.

Количество обучающих и тестовых выборок для доброкачественных и злокачественных случаев

Данные/Классы	Обучающая выборка	Тестовая выборка	Итого
Доброкачественный	38	16	54
Злокачественный	19	7	26
Итого	57	23	80
% от набора данных	71 %	29 %	100 %

Функция логистического ядра также использовалась с посредниками.

$$\sigma = 0.3, C = 1$$

Его производительность была превосходной, поскольку он правильно классифицировал 100 % тестового набора. Где выходные и целевые векторы совпадают в тестовом примере, как показано в таблице (3).

На рисунке (5) показана гистограмма выходных данных SVM в тестовом примере.

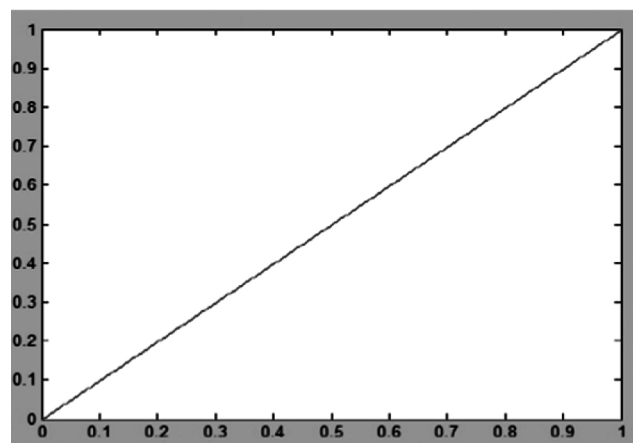


Рис. 5. Гистограмма вывода SVM в тестовом примере

Заключение

В данной статье представлены различные формы машины опорных векторов, что способствует улучшению процесса обобщения, основанного на принципе снижения структурного риска. Кроме того, данный метод был применен к выборке пациентов с раком молочной железы.

Таблица 3.

Целевые и выходные векторы после применения машины опорных векторов

Целевой выход	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1
Фактический выход	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1

ЛИТЕРАТУРА

- Gunn, S., Support Vector Machines for Classification and Regression, Faculty of Engineering, Science and Mathematics School of Electronics and Computer Science, 1998.
- Izenman, Alan J., Modern Multivariate Statistical Technique, Department of Statistics Temple University, 2008.
- Hastie, Tibshirani, Friedman, The Elements of Statistical Learning, Data Mining, Inference, and Prediction, 2009.
- Steinwart, Christmann, Support Vector Machines., Information Science and Statistics, 2008.
- Анисимова И.В. Вычислительные и компьютерные технологии определения коэффициентов переноса в моделях многокомпонентных смесей / И.В. Анисимова, В.Н. Игнатьев; Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего Образования «Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет им. А.Н. Туполева-Каи». Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, 2019. — 256 с. — ISBN 978-5-7579-2394-9. — EDN JQWPEO.
- H.S.Hota, Diagnosis of Breast Cancer Using Intelligent Techniques, International Journal of Emerging Science and Engineering (IJESE), ISSN: 2319-6378, Volume-1, Issue-3, January 2013.
- S. Aruna, Dr S.P. Rajagopalan, L.V. Nandakishore, An Empirical Comparison Of Supervised Learning Algorithms In Disease Detection, 2011.
- Madhavi Pradhan Ketki Kohale Parag Naikad Ajinkya Pachore Eknath Palwe, Design of Classifier for Detection of Diabetes using Neural Network and Fuzzy k- Nearest Neighbor Algorithm, 2012.

© Хежжо Мухсен (muhseen.hejoo@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФОВ В МУЛЬТИАГЕНТНОМ ОБУЧЕНИИ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ: ПРОГРЕСС ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА

APPLICATIONS OF GRAPHS IN MULTI-AGENT REINFORCEMENT LEARNING: RESEARCH PROGRESS AND METHODOLOGICAL FRAMEWORK

**Zhang Che
V. Terekhov
G. Afanasyev**

Summary. Graph-based modeling is one of the key paradigms in multi-agent reinforcement learning (MARL), offering innovative solutions to complex problems in collaborative decision making. This paper explores the application of graph theory in MARL by providing a holistic methodological framework in three key areas: modeling of graph-structured environments, coordinated dynamic graph optimization, and graph-driven communication mechanisms. Based on this, a detailed comparison and analysis of state-of-the-art graph-based modeling methods in multi-agent reinforcement learning is provided. Case studies in traffic signal control and autonomous vehicle coordination demonstrate the versatility of the graph model in real-world applications, including intelligent transportation systems. However, significant theoretical challenges remain, such as ensuring convergence in graph-based dynamic communication and efficiently processing heterogeneous graph data.

Keywords: multi-agent reinforcement learning, multi-agent system, graph neural networks, coordination graph, dynamic graph.

Чжан Чэ

Аспирант, Московский государственный
технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)
chezhangcn@gmail.com

Терехов Валерий Игоревич

К.т.н., доцент, Московский государственный
технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)
terekchow@bmstu.ru

Афанасьев Геннадий Иванович

К.т.н., доцент, Московский государственный
технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)
gaipcs@bmstu.ru

Аннотация. Моделирование на основе графов является одной из ключевых парадигм в мультиагентном обучении с подкреплением (MARL), предлагая инновационные решения сложных задач в области совместного принятия решений. В данной работе проводится исследование применения теории графов в MARL, создавая целостную методологическую основу по трём ключевым направлениям: моделирование среды с графовой структурой, координированная динамическая оптимизация графов и механизмы коммуникации, управляемые графами. На основе этого проводится детальное сравнение и анализ современных методов моделирования на основе теории графов в мультиагентном обучении с подкреплением. Примеры из практики в области управления транспортными сигналами, координации автономных транспортных средств демонстрируют универсальность графовой модели в реальных приложениях, включая интеллектуальные транспортные системы. Однако остаются значительные теоретические проблемы, такие как обеспечение сходимости при динамической коммуникации на основе графов и эффективная обработка неоднородных графовых данных.

Ключевые слова: мультиагентное обучение с подкреплением, мультиагентная система, графовые нейронные сети, координационный граф, динамический граф.

Введение

В последние годы мультиагентное обучение с подкреплением (MARL) показало значительный потенциал в решении сложных динамических взаимосвязанных задач. Основные трудности здесь связаны с эффективным моделированием среды, координацией поведения агентов и оптимизацией механизмов коммуникации. Традиционные методы часто сталкиваются с такими проблемами, как динамика среды, фрагментация информации вследствие локальных наблюдений,

«проклятие размерности» из-за взрыва в пространстве совместных действий [11] и чрезмерные затраты на коммуникацию. Графы как инструменты структурированного представления [2] предлагают MARL новую методологию благодаря их возможностям топологического моделирования, характеристикам реляционного рассуждения и вычислительной эффективности.

Суть данного аналитического обзора заключается в обосновании подхода классификации «моделирование–координация–коммуникация», основанного

на функциональных характеристиках графов. Рассматриваемый в этой статье подход классификации «моделирование-координация-коммуникация» анализирует различные парадигмы применения графов в мультиагентном обучении с подкреплением с функциональной точки зрения.

Теоретическая основа

1. Частично наблюдаемый марковский процесс принятия решений

Основа многоагентного обучения с подкреплением заключается в его математической формулировке, которая расширяет рамки одноагентных систем для решения задач распределённого принятия решений в частично наблюдаемых средах. Канонической моделью для MARL служит частично наблюдаемый марковский процесс принятия решений (POMDP) [1], определяемая кортежем $N, S, \{A^i\}, \{O^i\}, T, R, \gamma$:

N : множество агентов.

S : глобальное пространство состояний, часто недоступное отдельным агентам.

A^i : пространство действий агента i .

O^i : пространство наблюдений агента i , генерируемое функцией $\mathcal{E}^i: S \rightarrow O^i$.

$T(s'|s, a)$: вероятность перехода состояния для совместного действия $a = (a_1, \dots, a_N)$.

$R^i(s, a)$: индивидуальная функция вознаграждения (в кооперативных задачах часто предполагается общее вознаграждение).

γ : коэффициент дисконтирования вознаграждения.

Каждый агент i получает локальное наблюдение $o_t^i = \mathcal{E}^i(s_t)$ в момент времени t , формируя историю $h_t^i = (o_0^i, a_0^i, \dots, o_t^i)$. Децентрализованная стратегия $\pi^i(a_t^i | h_t^i)$ отображает истории в распределения действий.

Совместная стратегия $\pi = (\pi^1, \dots, \pi^N)$ порождает траекторию $\tau = (s_0, o_0, a_0, s_1, \dots)$, с целью максимизации ожидаемого возврата $\mathbb{E}_\tau \left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t \mathcal{R}(s_t, a_t) \right]$.

В частично наблюдаемых марковских играх (POMG) процесс обучения усложняется несколькими ключевыми проблемами. Во-первых, возникает нестационар-

ность, поскольку развивающиеся стратегии агентов постоянно изменяют динамику среды, дестабилизируя обучение и препятствуя сходимости к оптимальным стратегиям. Во-вторых, сложно распределить кредиты из-за взаимозависимостей между агентами. В-третьих, алиасинг наблюдений вводит неоднозначность, так как различные состояния могут порождать идентичные наблюдения. Эти проблемы создают препятствия для разработки эффективных алгоритмов обучения для многоагентных систем в условиях частичной наблюдаемости.

2. Фреймворк централизованного обучения и децентрализованного исполнения

Фреймворк централизованного обучения с децентрализованным выполнением (CTDE) решает проблему частичной наблюдаемости, используя глобальную информацию (например, полное состояние s_t) во время обучения и ограничивая политики локальными историями во время выполнения. На рисунке 1 показана рамочная структура CTDE. Методы, такие как VDN [24] и QMIX [20], раскладывают совместную функцию полезности $Q_{joint}(s, a)$ на индивидуальные полезности $Q^i(h^i, a^i)$, обеспечивая соответствие принципу «Individual-Global-Max»:

$$\arg\max_a Q_{joint}(s, a) = \left(\arg\max_{a^1} Q^1(h^1, a^1), \dots, \arg\max_{a^N} Q^N(h^N, a^N) \right). \quad (1)$$

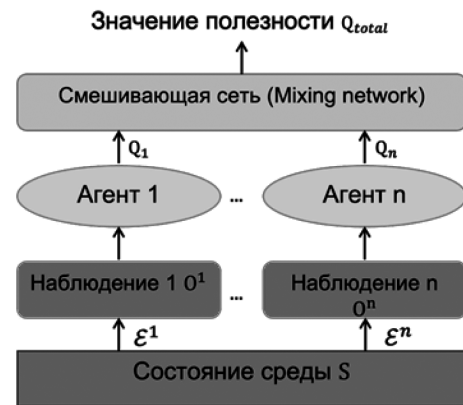


Рис. 1. Рамочная структура с централизованным обучением и децентрализованным исполнением

3. Роль графовых структур

Графовое мультиагентное обучение с подкреплением вводит реляционные индуктивные смещения [3] для смягчения проблемы частичной наблюдаемости. Моделируя взаимодействия агентов как рёбра в графе $G = (V, E)$, где узлы $v_i \in V$ представляют агентов или сущности, а рёбра $e_{ij} \in E$ кодируют отношения (например, коммуникационные связи или веса зависимостей), агенты могут распространять информацию с помощью

графовых нейронных сетей. Это позволяет агентам выводить скрытые состояния из локальных наблюдений и сообщений соседей, эффективно расширяя их «перцептивное поле» при сохранении децентрализации.

Такая формализация подчёркивает, как графовое мультиагентное обучение с подкреплением устраняет разрыв между децентрализованным выполнением и структурированным кооперативным рассуждением в условиях частичной наблюдаемости.

Методологии на основе графов

Интеграция графовых структур в мультиагентное обучение с подкреплением стала ключевой парадигмой для решения сложных задач координации. Подходы к моделированию среды на основе графов (раздел 3.1) используют обучение представлению графов для кодирования взаимодействия между агентами и средой. Методы на основе координационных графов (раздел 3.2) раскладывают глобальные задачи на коллаборативные единицы, повышая масштабируемость обучения политике. Техники оптимизации коммуникации с учётом графов (раздел 3.3) разрабатывают протоколы для балансировки эффективности обмена информацией и совместной производительности.

На рисунке 2 показаны различные роли теории графов в трех типах методологий. В совокупности эти методологии создают унифицированный фреймворк, который использует теорию графов для решения основных задач MARL, способствуя созданию интерпретируемых, масштабируемых и эффективных с точки зрения комму-

никации решений для многоагентных систем в реальных условиях.

1. Методы моделирования среды на основе графов

Первая категория методов предполагает моделирование среды с использованием графовых структур. В частности, в этих методах агенты, ресурсы или состояния в среде представлены в виде узлов графа, а их взаимосвязи описываются с помощью рёбер для построения эффективной модели среды. На этой основе подход обычно использует графовые нейронные сети (GNN) или их варианты для извлечения высокоуровневых реляционных признаков, тем самым расширяя возможности обучения агентов.

MAGNet [17] — это подход к многоагентному обучению с подкреплением, использующий графовые структуры для моделирования среды. На этапе генерации графа система моделирует агентов и объекты среды в виде узлов графа, строит динамическую матрицу корреляций и Зпринятия решений метод интегрирует архитектуру глубокой Q-сети (DQN), что позволяет использовать сгенерированный граф топологии среды для обучения политике и эффективного распределения совместных задач в многоагентных системах.

ING-MA [26] предлагает использовать разнородный граф транспортной сети (TN-HetG) с четырьмя типами узлов: контроллеров транспортных сигналов, перекрёстков, полос движения и транспортных средств. Нейронные сети кодируют разнородные признаки узлов и агрегируют информацию из сгруппированных окрест-

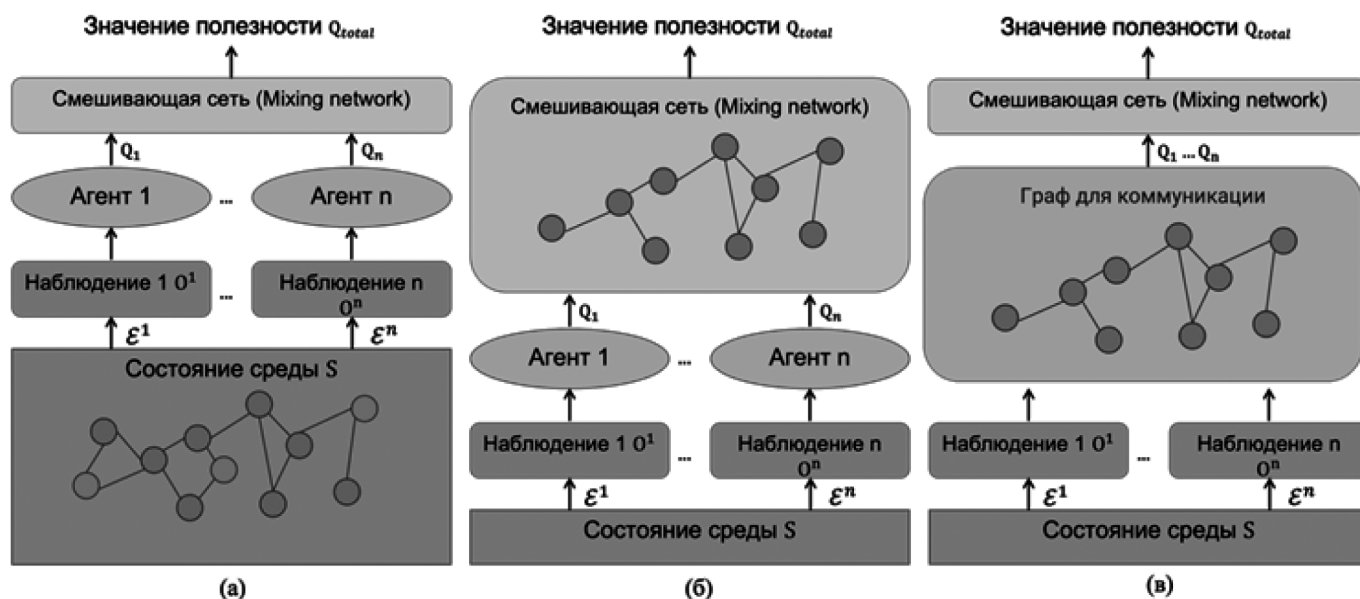


Рис. 2. 3 типа графовых методологий. (а) — использование графов для моделирования окружающей среды; (б) — метод координационного графа; (в) — использование графов для моделирования коммуникационных взаимодействий

ностей. Другая сеть, интегрированная с механизмами самовнимания, объединяет признаки узла и окрестностей для создания глобального представления состояния. На основе этого представления алгоритм использует фреймворк CTDE для обучения функции полезности или стратегии для каждого узла.

MAG-DQN [16] сочетает построение иерархической графовой структуры с графовым сверточным обучением с подкреплением для моделирования сложных сред и оптимизации политики. На этапе построения иерархической графовой структуры используется улучшенная нейронная сеть на основе теории адаптивного резонанса (ART) [6] для иерархической кластеризации карты.

2. Координационный граф

Координационные графы — основной инструмент для моделирования локального сотрудничества в мультиагентном обучении с подкреплением (MARL). Они определяют отношения взаимодействия между агентами с помощью графовых структур, решая проблему экспоненциального роста пространства совместных действий [13]. Данный метод объединил факторизацию из теории графов с динамическим программированием, снизив вычислительную сложность.

Глубокие координационные графы (DCG) [4] используют глубокие нейронные сети для автоматического изучения структуры и параметров координационного графа. DICG [14] объединяет механизмы самовнимания с графовыми свёрточными сетями (GCN), динамически выводятся неявные координационные графы с помощью дифференцируемых весов внимания.

Метод GCS [21] улучшает подход DCG, внедряя иерархический механизм топологической сортировки и динамически строя ориентированные ациклические графы (DAG). GACG [10] автоматически делит агентов на колаборативные подгруппы на основе их траекторий поведения. GraphMIX [18] использует сеть смешивания, которая отличается от традиционного подхода QMIX [20] благодаря применению архитектур GCN. HAMA [22] использует иерархическую графовую нейросеть с механизмом самовнимания (HGAT) для захвата межслойных отношений сотрудничества.

3. Оптимизация коммуникации

Методы оптимизации коммуникации направлены на разработку механизмов взаимодействия между агентами в многоагентных системах, управляемых графовыми структурами. Их цель — решить проблемы ограничений пропускной способности и избыточности информации в открытых средах. В отличие от традиционных моделей полностью связанного общения или

моделей с управляемыми коммуникациями, эти методы представляют агентов в виде узлов графа и обеспечивают эффективную фильтрацию и агрегацию информации через динамические рёберные соединения и структурированную передачу сообщений. Основная идея заключается в ограничении диапазона коммуникации топологией графа, оптимизации ценности информации с помощью графового рассуждения и балансировании индивидуального принятия решений и группового сотрудничества через графовое обучение. В этом разделе представлено несколько типичных методов.

G2ANet [15] использует механизм жёсткого внимания для выбора ключевых соседних узлов, строит разреженные графы взаимодействий и применяет мягкое внимание для назначения весов сохранённым рёбрам взаимодействия. MAGIC [19] использует дифференцируемый кодировщик графового внимания для генерации направленных динамических графов в реальном времени, определяя таким образом цели коммуникации в каждый момент. GAMA [5] вводит динамическую матрицу смежности, выбирая k ближайших соседей в качестве эффективных целей взаимодействия на основе состояния или статуса движения, и использует механизм графового внимания для взвешенного агрегирования полученной разнородной информации. Sparse-Att [23] применяет двухэтапный механизм внимания, сочетая жёсткое и мягкое внимание, чтобы устанавливать связи только с теми, кто значительно влияет на оптимизацию его политики.

Перспективы применения и теоретические вызовы

Методы мультиагентного обучения с подкреплением (MARL) на основе графов продемонстрировали большой потенциал применения в различных областях. В интеллектуальных транспортных системах этот подход моделирует топологические взаимосвязи перекрёстков и взаимодействия транспортных средств с помощью графовых нейронных сетей, что позволяет оптимизировать работу светофоров на нескольких перекрёстках совместно [26]. В автономном вождении графовые структуры эффективно фиксируют пространственно-временные зависимости между транспортными средствами, а модели принятия решений на основе графовой свёртки [12] повышают безопасность совместной работы в сложных интерактивных сценариях. Кроме того, графовые свёрточные сети (GCN) [7],[8],[9] поддерживают корректировку динамических формаций в реальном времени для адаптации к изменениям в среде выполнения задач.

Тем не менее в этом направлении остаются значительные теоретические проблемы. Во-первых, это вопрос гарантий сходимости [25] для графовых механизмов коммуникации. Когда многоагенты используют

графовые структуры для передачи информации, динамические изменения топологии могут привести к нестабильности при обновлении стратегий. Например, частые изменения топологии сети агентов могут вызывать колебания при обучении.

Выводы

Введение графовых структур в мультиагентное обучение с подкреплением (MARL) предлагает методологическую основу для решения сложных задач совместного принятия решений. Глубокая интеграция теоретико-графового моделирования с основными механизмами MARL

позволила исследователям разработать систему методологий, состоящую из трёх категорий: моделирование среды, оптимизация графа взаимодействия и оптимизация коммуникаций. Эти методы продемонстрировали значительные преимущества в различных сценариях, таких как распределение ресурсов, координация интеллектуальных транспортных средств при автономном вождении. Это подтверждает ценность графовых структур для представления отношений между агентами и агрегации глобальной информации. Основные теоретические проблемы в текущих исследованиях связаны с моделированием динамических графовых данных и фундаментальной теорией коммуникационных механизмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алфимцев, А.Н. Мультиагентное обучение с подкреплением: учебное пособие / А.Н. Алфимцев. — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. — С. 79–81.
2. Белянова М.А., Ревунков Г.И., Афанасьев Г.И., Гапанюк Ю.Е. Автоматическая генерация вопросов на основе текстов и графов знаний // Динамика сложных систем — XXI век. 2020. Т. 14. № 4. С. 55–64.
3. Battaglia P.W. et al. Relational inductive biases, deep learning, and graph networks //arXiv preprint arXiv:1806.01261. — 2018.
4. Böhmer W., Kurin V., Whiteson S. Deep coordination graphs //International Conference on Machine Learning. — PMLR, 2020. — С. 980–991.
5. Chen H. et al. Gama: Graph attention multi-agent reinforcement learning algorithm for cooperation //Applied Intelligence. — 2020. — Т. 50. — С. 4195–4205.
6. da Silva L.E.B., Elnabrawy I., Wunsch II D. C. A survey of adaptive resonance theory neural network models for engineering applications //Neural Networks. — 2019. — Т. 120. — С. 167–203.
7. Dai A. et al. Graph convolutional multi-agent reinforcement learning for UAV coverage control //2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). — IEEE, 2020. — С. 1106–1111.
8. Ding Z., Huang T., Lu Z. Learning individually inferred communication for multi-agent cooperation //Advances in neural information processing systems. — 2020. — Т. 33. — С. 22069–22079.
9. Du Y. et al. Learning correlated communication topology in multi-agent reinforcement learning //Proceedings of the 20th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems. — 2021. — С. 456–464.
10. Duan W., Lu J., Xuan J. Group-aware coordination graph for multi-agent reinforcement learning //arXiv preprint arXiv:2404.10976. — 2024.
11. Foerster J. et al. Learning to communicate with deep multi-agent reinforcement learning //Advances in neural information processing systems. — 2016. — Т. 29.
12. Gao X. et al. Multi-agent decision-making modes in uncertain interactive traffic scenarios via graph convolution-based deep reinforcement learning //Sensors. — 2022. — Т. 22. — №. 12. — С. 4586.
13. Guestrin C., Lagoudakis M., Parr R. Coordinated reinforcement learning //ICML. — 2002. — Т. 2. — С. 227–234.
14. Li S. et al. Deep implicit coordination graphs for multi-agent reinforcement learning //arXiv preprint arXiv:2006.11438. — 2020.
15. Liu Y. et al. Multi-agent game abstraction via graph attention neural network //Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence. — 2020. — Т. 34. — №. 05. — С. 7211–7218.
16. Luo T. et al. Multi-agent collaborative exploration through graph-based deep reinforcement learning //2019 IEEE International Conference on Agents (ICA). — IEEE, 2019. — С. 2–7.
17. Malysheva A., Kudenko D., Shpilman A. Magnet: Multi-agent graph network for deep multi-agent reinforcement learning //2019 XVI International Symposium» Problems of Redundancy in Information and Control Systems»(REDUNDANCY). — IEEE, 2019. — С. 171–176.
18. Naderializadeh N. et al. Graph convolutional value decomposition in multi-agent reinforcement learning //arXiv preprint arXiv:2010.04740. — 2020.
19. Niu Y., Paleja R.R., Gombolay M.C. Multi-Agent Graph-Attention Communication and Teaming //AAMAS. — 2021. — Т. 21. — С. 20th.
20. Rashid T. et al. Monotonic value function factorisation for deep multi-agent reinforcement learning //Journal of Machine Learning Research. — 2020. — Т. 21. — №. 178. — С. 1–51.
21. Ruan J. et al. GCS: Graph-based coordination strategy for multi-agent reinforcement learning //arXiv preprint arXiv:2201.06257. — 2022.
22. Ryu H., Shin H., Park J. Multi-agent actor-critic with hierarchical graph attention network //Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. — 2020. — Т. 34. — №. 05. — С. 7236–7243.
23. Sun C., Shen M., How J. P. Scaling up multiagent reinforcement learning for robotic systems: Learn an adaptive sparse communication graph //2020 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS). — IEEE, 2020. — С. 11755–11762.
24. Sunehag P. et al. Value-decomposition networks for cooperative multi-agent learning //arXiv preprint arXiv:1706.05296. — 2017.
25. Xu X. et al. The gradient convergence bound of federated multi-agent reinforcement learning with efficient communication //IEEE Transactions on Wireless Communications. — 2023. — Т. 23. — №. 1. — С. 507–528.
26. Yang S. et al. IHG-MA: Inductive heterogeneous graph multi-agent reinforcement learning for multi-intersection traffic signal control //Neural networks. — 2021. — Т. 139. — С. 265–277.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КУМУЛЯТИВНОЙ ИНВАЛИДИЗАЦИИ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ЭНДОКРИНОПАТИЯМИ, НУТРИТИВНЫМИ ДИСФУНКЦИЯМИ И МЕТАБОЛИЧЕСКИМИ НАРУШЕНИЯМИ У СОВЕРШЕННОЛЕТНИХ ЖИТЕЛЕЙ МОСКВЫ В СОПОСТАВЛЕНИИ С ДАННЫМИ ПО ЦЕНТРАЛЬНОМУ ФЕДЕРАЛЬНОМУ ОКРУГУ ЗА ПЯТИЛЕТНИЙ ПЕРИОД (2017–2021 ГГ.)

DYNAMIC CHANGES IN CUMULATIVE DISABILITY INDICATORS CAUSED BY ENDOCRINOPATHIES, NUTRITIVE DYSFUNCTIONS, AND METABOLIC DISORDERS AMONG ADULT RESIDENTS OF MOSCOW IN COMPARISON WITH DATA FROM THE CENTRAL FEDERAL DISTRICT OVER A FIVE-YEAR PERIOD (2017–2021)

**A. Asriyan
A. Sokurov
N. Zapariy
M. Polyakov**

Summary. This paper examines the specific features of disability dynamics caused by endocrinological pathologies, nutritional imbalances, and metabolic disorders among adult residents of the Russian capital over a five-year interval from 2017 to 2021. The research results indicate that in temporal projection, a substantial increase in the absolute number of persons with disabilities due to these causes was recorded with a growth rate of +25.6 %; an increase in the cumulative disability coefficient from 4.0 ± 0.08 to 5.0 ± 0.08 per 10 thousand adult population; prevalence in the nosological composition of persons who were not assigned disability status for the first time, with a distinct tendency toward increasing their proportional weight and intensity of disability while simultaneously reducing the share of those initially recognized as disabled; in the demographic distribution by age groups in Moscow, there is a predominance of middle-aged disabled persons with a tendency toward decreasing their percentage share, whereas the Central Federal District is characterized by the predominant presence of disabled persons above working age; prevalence of Group III disabled persons, with their proportional ratio in the structure being higher than similar indicators for the Central Federal District, while the relative number of Group I–II disabled persons in the Moscow region demonstrates lower values compared to district-wide data.

Keywords: accumulated disability, diseases of the endocrine system, eating disorders, metabolism, structure, age groups, level, disability groups.

Асриян Артем Юрьевич

Аспирант, ФГБУ Федеральное бюро
медико-социальной экспертизы
Министерства труда и социальной защиты РФ
asriyan1996@icloud.com

Сокуров Андрей Владимирович

доктор медицинских наук,
директор Института ранней помощи и сопровождения
ФГБУ ФНЦРИ им. Г.А. Альбрехта Минтруда России
ansokurov@yandex.ru

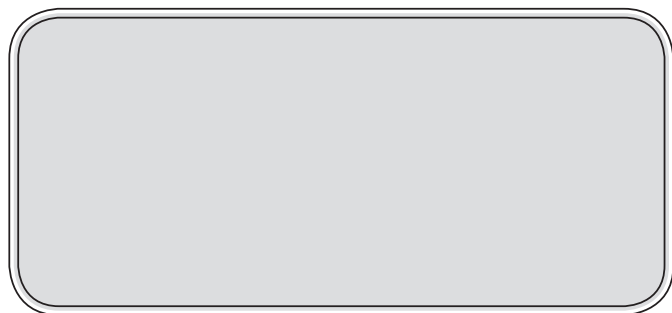
Запарий Наталья Сергеевна

доктор медицинских наук, доцент,
заведующий учебно-организационным отделом
Учебно-методологического Центра ФГБУ Федеральное
бюро медико-социальной экспертизы
Министерства труда и социальной защиты РФ,
zapariy_N@fbmse.ru

Поляков Михаил Игоревич

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский национальный исследовательский
медицинский университет имени Н.И. Пирогова»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
misha.polyakov.01@mail.ru

Аннотация. В данной работе исследованы специфические особенности динамики общей инвалидности, вызванной эндокринологическими патологиями, дисбалансом питательных веществ и метаболическими расстройствами среди взрослых жителей столицы России за пятилетний интервал с 2017 по 2021 годы. Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что в временной проекции зафиксировано существенное расширение абсолютного числа лиц с ограниченными возможностями вследствие указанных причин с интенсивностью прироста +25,6 %; увеличение коэффициента кумулятивной инвалидности с $4,0 \pm 0,08$ до $5,0 \pm 0,08$ в расчете на 10 тысяч взрослого контингента; преобладание в нозологической композиции лиц, которым статус инвалида был присвоен не впервые, с отчетливой тенденцией к возрастанию их удельного веса и интенсивности инвалидизации при одновременном сокращении доли первично признанных инвалидами; в демографическом распределении по возрастным группам в Москве отмечается преобладание инвалидов среднего возрастного сегмента с тенденцией к уменьшению их процентной доли, тогда как для Центрального



Проблематика эндокринопатий в настоящее время выдвигается на передний план медицинской и социальной значимости. Наблюдающаяся экспансия данных патологических состояний среди популяции, устойчивая динамика нарастания числа пациентов и значительный индекс инвалидности определяют критическую важность этого вопроса [1,2]. Минувшее десятилетие демонстрирует отчетливую тенденцию к эскалации встречаемости дисфункций эндокринной сферы. Анализ обращаемости в лечебно-профилактические учреждения с начала XXI века показывает, что нарушения функционирования желез внутренней секреции стабильно удерживают лидирующие позиции в общем спектре заболеваемости [3,4,10]. Фактографические материалы официальной статистики указывают на то, что контингент лиц с эндокринологическими дисфункциями в Москве приближается к рубежу в один миллион человек. По данным регистрации на начало 2022 года в столичном регионе насчитывается 967 тысяч таких пациентов, из которых 871 тысяча приходится на взрослое население, а 96 тысяч составляют дети и подростки. Ежегодный прирост количественных показателей пациентов достиг 9 %. В современных условиях каждый двенадцатый москвич сталкивается с тем или иным расстройством эндокринной системы. Распространенность эндокринопатий в московском мегаполисе составляет 8302 случая на 100 тысяч взрослых жителей [5,6,7,8,9].

Задача исследования: изучить эволюцию кумулятивной инвалидности взрослого контингента, обусловленной заболеваниями эндокринной системы, дисбалансом нутритивного статуса и нарушениями обмена веществ в столичном регионе, осуществляя компаративный анализ с соответствующими индикаторами Центрального федерального округа с учетом стратификации по возрастным группам и градациям степени утраты трудоспособности на протяжении хронологического промежутка 2017-2021 гг.

Методический инструментарий: Реализовано всеобъемлющее исследовательское изыскание на платформе Федерального казенного учреждения «Главное бюро медико-социальной экспертизы по г. Москве» Министерства труда Российской Федерации. Информационным

федерального округа характерно преимущественное наличие инвалидов старше трудоспособного возраста; превалирование инвалидов III группы, причём их пропорциональное соотношение в структуре выше аналогичных показателей по Центральному федеральному округу, а относительное количество инвалидов I-II групп в московском регионе демонстрирует более низкие значения по сравнению с общеокружными данными.

Ключевые слова: накопленная инвалидность, болезни эндокринной системы, расстройство питания, обмен веществ, структура, возрастные группы, уровень, группы инвалидности.

фундаментом послужили аналитические материалы статистических компендиумов ФГБУ Федерального бюро медико-социальной экспертизы Министерства труда России в количественном выражении 5 документальных источников. Методологический аппарат научной работы включал: экстракцию фактологических данных из информационно-аналитической системы ЕАВИАС МСЭ ФКУ «ГБ МСЭ по г. Москве» Минтруда России, приемы дескриптивной статистической обработки с вычислением абсолютных значений, относительных экстенсивных и интенсивных коэффициентов, параметров статистической значимости, калькуляцию средней арифметической величины (M) с её стандартной ошибкой (m), проведение комплексного аналитического и сравнительного исследования с использованием критерия достоверности (p). Хронологические рамки исследования охватывали пятилетний интервал с 2017 по 2021 год включительно.

Результаты и обсуждения

Агрегированная численность индивидов с ограничениями жизнедеятельности (совокупно первично диагностированных и подвергшихся реэкспертизе) вследствие патологий эндокринной сферы, алиментарных дисфункций и нарушений метаболизма в совершеннолетней когорте столичных жителей в 2017 году исчислялась 4265 пациентами. Последующий хронологический период характеризовался неравномерной флуктуацией: к 2018 году контингент редуцировался до 3807 субъектов (сокращение эквивалентно 10,7 %), в 2019 году прослеживалась дальнейшая депрессия количественного показателя до 3083 индивидуумов (дополнительная редукция на 19,0 %). Тем не менее, с наступлением 2020 года зарегистрирована существенная эскалация параметра — до 3878 лиц (инкремент составил 25,8 % в сравнении с предшествующим периодом), с последующей значительной прогрессией в 2021 году до 5358 освидетельствованных (что коррелирует с приростом на 38,2 %). Документируемая аугментация контингента инвалидизированных пациентов в двухлетний интервал 2020–2021 непосредственно коррелирует с имплементацией специального протокола экспертизы согласно «Временному порядку признания лица инвалидом», санкционированному Постановлением Правительства

Российской Федерации от 16.10.2020 № 1697, что детерминировалось эпидемиологической конъюнктурой, индуцированной диссеминацией нового коронавирусного агента COVID-19.

Кумулятивное количество субъектов за весь исследуемый темпоральный интервал достигло 20391 человека, при этом среднегодовой экстраполюнный индикатор составил 4078 пациентов. Интенсивный коэффициент аккумулярованной инвалидности в 2017 году регистрировался на позиции $4,0 \pm 0,08$ эпизодов на декаду тысяч взрослых резидентов, экспонируя затем нисходящий тренд до минимальной отметки $2,9 \pm 0,08$ в 2019 году, после чего наблюдалась выраженная восходящая динамика до пикового значения $5,0 \pm 0,07$ к 2021 году. Усредненный многолетний интенсивный индикатор зафиксирован на уровне $3,8 \pm 0,08$ (таблица 1).

Исследование структурного состава кумулятивной инвалидности выявило превалирование группы лиц, прошедших процедуру повторного освидетельствования. Их количественные параметры подверглись существенным модификациям: от первоначального уровня в 2980 индивидуумов в 2017 году зафиксирована депрессия до 2188 субъектов в 2019 году (декремент составил 26,6 %), которая трансформировалась в значительную прогрессию до 4542 персон к 2021 году (амплификация на 107,6 %). Суммарный объём данной когорты за интегральный временной интервал мониторинга достиг 15454 человека при экстраполированном годовом значении 3091 пациент. Пропорциональное представительство этой категории в целостном комплексе аккумулярованной инвалидности характеризовалось константной восходящей тенденцией с 68,9 % на инициальном этапе исследовательского цикла до 84,8 % в момент его финализации в 2021 году, при усреднённой величине 75,8 %. Коэффициент интенсивности инвалидизации для рассматриваемого контингента осциллировал в диапазональных границах от $2,1 \pm 0,09$ до $4,3 \pm 0,07$, с медианным

показателем $2,96 \pm 0,08$ в расчёте на 10 тысяч совершеннолетних жителей.

Популяция индивидуумов, первично аттестованных как лица с ограниченными возможностями, в рамках кумулятивной инвалидности экспонировала прогрессивную редукцию количественного состава с 1285 субъектов в исходной точке хронологического континуума (2017 год) до 816 персон к финальной фазе исследования в 2021 году, что корреспондирует с дефицитом в 36,5 %. Интегральный объём рассматриваемой категории граждан за комплексный период мониторинга достиг 4937 человек при экстраполированном годовом параметре 987 индивидуумов. Процентное представительство данной фракции в агрегированной композиции аккумулярованной инвалидности характеризовалось ярко выраженным регрессивным трендом — от первоначальных 31,6 % до терминальных 15,2 %, при медианной величине 24,2 %. Интенсивный коэффициент превалентности для анализируемой когорты подвергался флуктуационным изменениям в пределах от $1,2 \pm 0,08$ до $0,7 \pm 0,02$, генерируя среднеарифметический показатель $0,96 \pm 0,01$ эпизодов в перерасчёте на декаду тысяч совершеннолетних резидентов.

Исследование демографической стратификации в композиции кумулятивной инвалидности совершеннолетних жителей, детерминированной патологиями эндокринных желез, алиментарными дисфункциями и нарушениями метаболизма в московском мегаполисе, идентифицировало доминантную концентрацию лиц с ограниченными возможностями в медианной возрастной когорте (женский контингент 45–54 лет, мужской контингент 45–59 лет).

Долевое соотношение рассматриваемой категории в целостной структурной композиции отличалось поступательной депрессией — от 44,7 % на инициальном этапе аналитического цикла (2017 год) до 30,5 % в момент

Таблица 1.

Сведения о накопленном контингенте инвалидов среди взрослого населения вследствие болезней эндокринной системы, расстройства питания, обмена веществ с г. Москве за 2017–2021 гг. (абс. ч., %, на 10 тыс. населения; $M \pm m$)

Годы	Общее число инвалидов			ВПИ			ППИ		
	абс. число	уд. вес	уровень	абс. число	уд. вес	уровень	абс. число	уд. вес	уровень
2017	4265	100,0	$4,0 \pm 0,08$	1285	31,1	$1,2 \pm 0,09$	2980	68,9	$2,9 \pm 0,08$
2018	3807	100,0	$3,6 \pm 0,08$	1203	31,6	$1,2 \pm 0,09$	2604	68,4	$2,5 \pm 0,08$
2019	3083	100,0	$2,9 \pm 0,08$	895	29,0	$0,9 \pm 0,01$	2188	71,0	$2,1 \pm 0,09$
2020	3878	100,0	$3,6 \pm 0,08$	738	19,0	$0,7 \pm 0,02$	3140	81,0	$3,0 \pm 0,08$
2021	5358	100,0	$5,0 \pm 0,07$	816	15,2	$0,8 \pm 0,01$	4542	84,8	$4,3 \pm 0,07$
Среднее значение	4078	100,0	$3,8 \pm 0,08$	987	24,2	$0,96 \pm 0,01$	3091	75,8	$2,96 \pm 0,08$

его терминации (2021 год), формируя усреднённый параметр на градации 37,3 %. Квантитативный индикатор в абсолютных единицах осциллировал в интервальном диапазоне от 1905 до 1130 индивидуумов на протяжении исследуемого темпорального периода, с экстраполированным годовым показателем 1523 субъекта. Интенсивный коэффициент превалентности инвалидизации для анализируемой возрастной страты экспонировал первичную редукцию с $8,8 \pm 0,07$ в 2017 году до минимальной отметки $5,2 \pm 0,15$ в 2019 году, после чего регистрировалась восходящая тенденция до $7,5 \pm 0,11$ к 2021 году. Медианный многолетний интенсивный индикатор зафиксирован на уровне $6,9 \pm 0,12$ случаев в пересчёте на декаду тысяч жителей соответствующей возрастной категории (таблица 2).

В процессе компаративного изучения с эпидемиологической картиной в Центральном федеральном округе верифицировано, что индивидуумы с ограниченными возможностями медианной возрастной страты дислоцировались на второй позиции в ранговой иерархии. Их процентный удельный вес в архитектонике кумулятивной инвалидности демонстрировал нисходящую тенденцию от 33,1 % до 26,2 %, при усреднённом индикаторе 29,3 %, что достоверно уступает гомологичному параметру по столичному региону (37,3 %) при статистически валидных дивергенциях ($p < 0,05$). Валовая численность этой когорты в территориальном округе флуктуировала в пределах от 3558 до 4735 субъектов, при экстраполированном годовом значении 4152 человека. Коэффициент интенсивности агрегированной инвалидности для исследуемой возрастной категории в окружном масштабе характеризовался прогрессивной редукцией с $6,7 \pm 0,07$ в 2017 году до $5,4 \pm 0,0$ в 2019 году, с последующей трансформацией в аугментативную динамику до $7,3 \pm 0,05$ к 2021 году. Среднеарифметический многолетний параметр составил $6,3 \pm 0,07$ в перерасчёте на декаду тысяч соответствующего контингента, что статистически достоверно ниже московского индикатора ($p < 0,01$).

Вторую ступень в иерархической градации занимали индивидуумы с ограничениями жизнедеятельности пенсионного возрастного сегмента. Их процентная доля в интегральной композиции экспонировала отчетливый аугментативный тренд — от первоначальных 27,7 % до 39,1 % к терминальной фазе мониторингового периода, генерируя медианный параметр на уровне 35,0 %. Квантитативный состав рассматриваемой когорты в абсолютном исчислении характеризовался стабильной прогрессией с 1225 субъектов до 2086 индивидуумов на протяжении анализируемого темпорального интервала, при экстраполированном годовом индикаторе 1507 персон. Интенсивный коэффициент аккумулярованной инвалидности для популяции, превышающей трудоспособный возрастной порог, отличался последо-

вательной эскалацией с $3,7 \pm 0,14$ в 2017 году до $6,3 \pm 0,11$ в 2021 году, с усредненной величиной $4,4 \pm 0,13$ эпизодов в пересчете на декаду тысяч соответствующей демографической страты населения.

В ходе сравнительной оценки с эпидемиологической конъюнктурой в Центральном федеральном округе констатируется, что субъекты с ограниченными возможностями пенсионного возрастного ценза занимали превалирующую позицию в общей архитектонике, с процентным представительством 44,1 %, что статистически достоверно превалирует над гомологичным столичным индикатором ($p < 0,05$). Числовая характеристика анализируемой когорты в окружном масштабе отличалась прогрессивной амплификацией с 5807 индивидуумов в инициальной точке исследовательского цикла до 8068 персон к его финализации, демонстрируя инкремент в 38,9 %, при экстраполированном годовом параметре 6411 субъектов. Коэффициент интенсивности кумулятивной инвалидности для контингента, превышающего трудоспособный возрастной порог, в территориальном округе характеризовался последовательной аугментацией от $5,4 \pm 0,07$ до $7,5 \pm 0,05$ за интегральный период мониторинга, формируя усредненную величину $5,9 \pm 0,09$ в перерасчете на декаду тысяч соответствующей демографической страты, что с высокой статистической значимостью превосходит аналогичный параметрический индикатор по московскому региону ($p < 0,05$).

Процентное представительство лиц с ограниченными возможностями юной возрастной страты (18–44 года) в московском регионе в структурной композиции кумулятивной инвалидности, детерминированной дисфункциями эндокринных желез, алиментарными расстройствами и нарушениями метаболизма, достигало 27,7 % за интегральный анализируемый хронологический интервал. Квантитативный индикатор в абсолютных единицах для рассматриваемой когорты подвергался существенным флуктуациям — от минимальной отметки 715 индивидуумов до максимального параметра 1638 субъектов, генерируя экстраполированный годовой показатель 1129 персон. Интенсивный коэффициент аккумулярованной инвалидности для юной демографической группы характеризовался разновекторной динамикой: в инициальной фазе исследовательского цикла (2017–2019 гг.) регистрировалась последовательная депрессия с $2,3 \pm 0,12$ до $1,5 \pm 0,13$, которая впоследствии трансформировалась в выраженную эскалацию до $3,6 \pm 0,12$ к 2021 году. Медианный многолетний интенсивный параметр для анализируемой возрастной категории зафиксирован на градации $2,3 \pm 0,13$ эпизодов в пересчете на декаду тысяч соответствующей демографической страты популяции.

В географических пределах Центрального федерального округа доленое соотношение индивидуумов

Таблица 2.
Динамика накопленной инвалидности взрослого населения вследствие болезней эндокринной системы, расстройства питания, обмена веществ
с учетом возрастных групп в г. Москве за 2017–2021 гг. (абс. ч., %, на 10 тыс. соответствующего населения)

Возрастные группы	Показа- тели	Территории											
		г. Москва						ЦФО					
		2017	2018	2019	2020	2021	среднее	2017	2018	2019	2020	2021	среднее
Молодой (18-44 лет)	абс. ч.	1135	961	715	1092	1638	1129	3334	3060	2635	3655	5451	3627
	уд. вес	27,6	26,2	24,2	28,2	30,6	27,7	24,4	23,7	22,8	27,2	29,7	26,6
	уровень	2,3±0,12	2,0±0,13	1,5±0,13	2,3±0,13	3,6±0,12	2,3±0,13	2,2±0,07	2,1±0,07	1,8±0,07	2,5±0,07	3,9±0,07	2,5±0,07
Средний (45-54 л-жен.; 45-59 л-муж.)	абс. ч.	1905	1525	1130	1270	1634	1523	4522	4037	3558	3845	4795	4152
	уд. вес	44,7	40,1	36,7	32,7	30,5	37,3	33,1	31,2	29,4	27,6	25,2	29,3
	уровень	8,8±0,07	7,0±0,012	5,2±0,15	5,8±0,14	7,5±0,11	6,9±0,12	6,7±0,07	6,1±0,08	5,4±0,08	5,8±0,08	7,3±0,06	6,3±0,07
Старше трудоспособного (55 л и >жен.; 60 л и >муж.)	абс. ч.	1225	1321	1238	1516	2086	1507	5807	5835	5899	6449	8068	6411
	уд. вес	27,7	33,7	39,1	39,1	38,9	35,0	42,5	45,1	47,8	45,2	44,1	44,1
	уровень	3,7±0,14	3,9±0,13	3,5±0,14	4,4±0,13	6,3±0,11	4,4±0,13	5,4±0,07	5,4±0,07	5,3±0,06	6,0±0,06	7,5±0,05	5,9±0,06

Таблица 3.
Структура накопленной инвалидности взрослого населения вследствие болезней эндокринной системы, расстройства питания, обмена веществ
с учетом тяжести инвалидности в г. Москве за 2017–2021 гг. (абс. ч., %, на 10 тыс. соответствующего населения)

Группы инвалидности	Показатели	Территории											
		г. Москва						ЦФО					
		2017	2018	2019	2020	2021	среднее	2017	2018	2019	2020	2021	среднее
I	абс. ч.	201	152	205	185	242	200	1262	1289	1392	1151	1208	1261
	уд. вес	4,7	5,0	6,6	5,8	5,5	5,9	10,3	9,9	11,5	8,3	6,6	8,9
	уровень	0,19±0,02	0,14±0,03	0,19±0,02	0,17±0,03	0,23±0,03	0,18±0,03	0,39±0,01	0,40±0,01	0,43±0,01	0,35±0,01	0,37±0,01	0,39±0,01
II	абс. ч.	1003	804	604	742	1019	836	3553	3245	3106	3601	4598	3621
	уд. вес	23,5	21,1	19,6	19,1	19,0	20,5	26,0	25,1	25,7	25,8	25,1	25,5
	уровень	0,95±0,007	0,76±0,02	0,57±0,02	0,69±0,02	0,95±0,007	0,78±0,01	1,1±0,05	1,0±0,05	0,96±0,05	1,1±0,05	1,4±0,05	1,1±0,05
III	абс. ч.	3061	2851	2274	2951	4097	3042	8848	8398	7594	9197	12508	9309
	уд. вес	71,8	73,9	73,8	75,1	75,5	73,6	63,7	65,0	62,8	65,9	68,3	65,6
	уровень	2,9±0,08	2,7±0,08	2,1±0,09	2,8±0,08	3,8±0,07	2,9±0,08	2,7±0,05	2,6±0,05	2,4±0,05	2,8±0,05	3,8±0,04	2,9±0,05

с ограничениями жизнедеятельности юной возрастной когорты достигало 26,6 %, что с высокой степенью статистической достоверности уступает гомологичному индикатору по мегаполису ($p < 0,01$). Валовая квантитативная характеристика представителей анализируемой категории подвергалась существенным модификациям — от минимальной градации 2635 субъектов до пикового уровня 5451 индивидуумов, формируя экстраполированный годовой параметр 3627 персон. Интенсивный коэффициент кумулятивной инвалидности для рассматриваемой демографической страты в территориальном округе регистрировался на усредненной отметке $2,5 \pm 0,07$ эпизодов в перерасчете на декаду тысяч соответствующего контингента населения, что с высокой статистической значимостью превалирует над столичным параметрическим индикатором ($p < 0,01$).

Реализованное исследование архитектоники кумулятивной инвалидности среди совершеннолетней когорты населения, детерминированной патологическими состояниями эндокринных желез, алиментарными дисфункциями и нарушениями метаболизма, с учетом стратификации по уровню тяжести идентифицировало превалирование субъектов с третьей квалификационной категорией инвалидности. В частности, по столичному региону процентное представительство рассматриваемой группы характеризовалось прогрессивной тенденцией к поступательной аугментации — от первоначальных 71,8 % до 75,5 % к финальной фазе мониторингового интервала, при усредненном параметре 73,9 %. Квантитативный индикатор в абсолютном исчислении составил в среднем 3042 индивидуума в годовом эквиваленте. Коэффициент интенсивности аккумулированной инвалидности для третьей квалификационной группы осциллировал в диапозональных границах от $0,21 \pm 0,09$ до $3,8 \pm 0,07$, с медианной величиной $2,9 \pm 0,08$ эпизодов в пересчете на декаду тысяч совершеннолетних резидентов.

В территориальных границах Центрального федерального округа процентное представительство лиц с ограниченными возможностями третьей квалификационной категории в структурной композиции кумулятивной инвалидности характеризовалось прогрессивной эскалацией с 63,7 % до 68,3 %, генерируя усредненный параметр 65,6 %, что с высокой статистической значимостью уступает гомологичному индикатору по мегаполису ($p < 0,05$). Квантитативный коэффициент в абсолютных единицах для анализируемой когорты демонстрировал консистентную тенденцию к аугментации — от первоначальных 8848 субъектов в 2017 году до 12508 индивидуумов к 2021 году, при экстраполированном годовом значении 9309 персон. Интенсивный индикатор аккумулированной инвалидности для третьей классификационной группы в окружном масштабе флуктуировал в диапозональных границах от $2,4 \pm 0,0$ до $3,8 \pm 0,04$,

с медианной величиной $2,9 \pm 0,05$ эпизодов в пересчете на декаду тысяч совершеннолетнего контингента.

Вторую позицию в иерархической градации занимали субъекты со второй квалификационной категорией инвалидности. По столичному региону их долевое соотношение достигало 20,5 % с отчетливым регрессивным трендом — с 23,5 % до 19,0 % за интегральный период мониторинга. Валовая численность представителей рассматриваемой категории исчислялась в среднем 836 индивидуумами ежегодно. Коэффициент интенсивности кумулятивной инвалидности для второй группы регистрировался в интервале от $0,57 \pm 0,02$ до $0,95 \pm 0,07$, формируя усредненный параметр $0,78 \pm 0,01$ случаев в перерасчете на декаду тысяч совершеннолетних резидентов. В Центральном федеральном округе процентное представительство лиц с ограниченными возможностями второй группы достигало 25,5 %, что с высокой степенью статистической достоверности превалирует над столичным индикатором (20,5 %) при верифицированных дивергенциях ($p < 0,05$). Числовая характеристика в абсолютном исчислении составила в среднем 3621 субъект в годовом эквиваленте. Интенсивный параметр превалентности для анализируемой категории в территориальном округе осциллировал в пределах от $0,96 \pm 0,05$ до $1,4 \pm 0,05$, с медианной величиной $1,1 \pm 0,05$ эпизодов в пересчете на декаду тысяч совершеннолетнего контингента.

Минимальную фракцию в архитектонике составляли индивидуумы с первой квалификационной категорией инвалидности. Их процентное представительство в структурной композиции кумулятивной инвалидности, детерминированной дисфункциями эндокринных желез, алиментарными расстройствами и нарушениями метаболизма, достигало в среднем 5,9 % по столичному региону, в то время как в Центральном федеральном округе данный индикатор регистрировался на отметке 8,9 %. Интенсивный коэффициент превалентности инвалидизации первой группы в мегаполисе флуктуировал в диапозональных границах от $0,14 \pm 0,03$ до $0,23 \pm 0,03$, генерируя усредненный параметр $0,18 \pm 0,03$ эпизодов в пересчете на декаду тысяч совершеннолетней популяции населения.

В географических пределах Центрального федерального округа индикатор интенсивности аккумулированной инвалидности для первой классификационной группы фиксировался на существенно более элевированном уровне, осцилируя в интервале от $0,35 \pm 0,01$ до $0,43 \pm 0,01$, с медианной величиной $0,39 \pm 0,01$ случаев в перерасчете на декаду тысяч совершеннолетних резидентов, что дублированно превосходит гомологичный параметрический индикатор по московскому региону при статистически верифицированных дивергенциях ($p < 0,05$).

Заключение

Всесторонний анализ кумулятивной инвалидности совершеннолетней популяции, детерминированной патологическими состояниями эндокринных желез, алиментарными дисфункциями и нарушениями метаболизма в столичном мегаполисе в компаративном аспекте с Центральным федеральным округом за пятилетний хронологический интервал 2017–2021 гг. позволил верифицировать следующие закономерности:

- прогрессивная аугментация интегральной численности индивидуумов с ограниченными возможностями вследствие указанных этиологических факторов с агрегированным инкрементом 25,6 % за весь мониторинговый период;
- устойчивая эскалация интенсивного коэффициента аккумулированной инвалидности с инициального уровня $4,0 \pm 0,08$ до терминального значения $5,0 \pm 0,08$ эпизодов в пересчете на декаду тысяч совершеннолетних резидентов;
- превалирование в структурной композиции контингента реэкспертизированных субъектов

с отчетливой тенденцией к возрастанию их процентного представительства и индикатора превалентности при симультанной редукции удельного веса первично аттестованных инвалидов;

- доминирующая концентрация в возрастной стратификации московского региона лиц с ограниченными возможностями медианной возрастной когорты с последовательной депрессией их долевого соотношения, в то время как в Центральном федеральном округе регистрировалось преобладание индивидуумов, превышающих трудоспособный возрастной ценз;
- превалирование субъектов с третьей квалификационной категорией инвалидности, процентная доля которых в мегаполисе существенно превосходит гомологичный параметрический индикатор по территориальному округу, при этом удельный вес инвалидов первой и второй групп в столичном регионе демонстрирует более низкие значения в сопоставлении с Центральным федеральным округом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вербовой А.Ф. Долгих Ю.А., Вербовая Н.И., Галкин Р.А. Эндокринология: прошлое, настоящее, будущее // Эндокринология: новости, мнения, обучение. 2022 Т 11, № 3-С. 37–46.
2. Савина А.А. Тенденция показателей заболеваемости болезнями эндокринной системы взрослого населения Российской Федерации // Электронный научный журнал «Социальные аспекты здоровья населения» — 2021; 67 (4) 1–32.
3. Лужецкий К.П., Цинкер М.Ю., Вековщина С.А. Структурно-динамический анализ эндокринной патологии на территории Российской Федерации с различным уровнем и спектром загрязнения среды обитания // Здоровье населения и среда обитания — 2013 — № 5 (290) с. 7–12
4. Система поддержки принятия решений. Эндокринология. Клинические протоколы лечения / Анциферов М.Б., Духарева О.В., Шестакова М.В. [и др.] М., 2021 — 80 с.
5. К.П. Афонина, М.А. Дымочка, О.Г. Струкова [и др.] Основные тенденции развития в Российской Федерации системы комплексной реабилитации и абилитации инвалидов // Материалы III Межрегиональной конференции «Состояние и перспективы развития системы комплексной реабилитации и абилитации инвалидов и детей-инвалидов в Российской Федерации» — М., ФГБУ ФБ МСЭ Минтруда России — 2022 — с. 7–19.
6. Пузин С.Н., Шургая М.А., Меметов С.С. [и др.] Инвалидность в XXI веке. Состояние проблемы медико-социальной реабилитации абилитации в современной России // Медико-социальная экспертиза и реабилитация. М, 2018; Т. 21. (1-2) с. 10–17
7. Пузин С.Н., Дымочка М.А., Бойцов С.А. [и др.] Эпидемиологическая картина инвалидности у различных демографических контингентов населения в Российской Федерации в аспекте социальной политики государства // Медико-социальная экспертиза и реабилитация. М, 2018; Т. 21. (1-2). с. 50–54
8. Барина Г.В. Инвалидность как социальное явление современной России / Г.В. Барин. — Саратов: Наука, 2015. — 189 с.
9. Дымочка М.А. Показатели инвалидности у взрослого населения Российской Федерации за период 2017-2019 гг. (информационно-аналитический материал) / М.А. Дымочка, Е.С. Красновская, Н.Б. Веригина / Медико-социальные проблемы инвалидности. — 2020. — № 2. — с. 7–26.
10. Цаликова А.А. Анализ заболеваемости болезнями эндокринной системы в Российской Федерации в 2013-2014 гг. // А.А. Цаликова // Инновационная наука. — 2016. Т8 (3). — С. 133–135.

© Асриян Артем Юрьевич (asriyan1996@icloud.com); Сокуров Андрей Владимирович (ansokurov@yandex.ru);
Запарий Наталья Сергеевна (zapariy_N@fbmse.ru); Поляков Михаил Игоревич (misha.polyakov.01@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЖЕВАНИЯ ПРИ ПОСТТРАВМАТИЧЕСКИХ ДЕФЕКТАХ ЗУБНЫХ РЯДОВ

THE CURRENT STATE OF THE PROBLEM OF RESTORING CHEWING EFFICIENCY IN POST-TRAUMATIC DEFECTS OF THE DENTAL ARCHES

V. Vishnevetskaya

Summary. This article presents the results of a study dedicated to evaluating methods for restoring chewing efficiency in patients with post-traumatic defects of the dental arches. The relevance of the work is driven by the significant impact that the loss of masticatory units has on quality of life and the functional status of the maxillofacial system, including the risk of temporomandibular joint dysfunction. The aim of the study was to identify factors influencing the success of surgical and prosthetic treatment in various locations and extents of traumatic defects. A patient group with post-traumatic defects was formed based on comprehensive examinations (medical history, clinical examination, radiography, orthopantomography, functional diagnostics). Modern surgical techniques for bone tissue restoration (osteoplasty, autotransplantation) and combined prosthetic solutions involving dental implants of various designs were used. The choice of method was based on the defect's topography, bone tissue volume, and soft tissue condition. Outcome assessment included dynamic monitoring of implant osseointegration, analysis of masticatory pressure distribution, and chewing efficiency indicators using dispersion and correlation statistical analysis.

Results demonstrated statistically significant differences in the restoration of chewing efficiency and implant stabilization depending on defect location. The highest values were recorded for molar-zone defects (chewing efficiency 14.52 ± 1.03 units, implant stabilization 0.85 ± 0.05), intermediate values in the premolar zone (12.38 ± 0.76 ; 0.82 ± 0.07), and the lowest for extensive multiple defects (11.87 ± 0.91 ; 0.78 ± 0.04). A six-month follow-up also revealed higher occlusal load (25.92 ± 1.36 N/cm²) and muscle tone (48.27 ± 1.96 units) in the molar-defect group compared to other groups. A strong correlation was found between the nature of the defect, functional chewing parameters, and long-term stability of the constructions.

Conclusions emphasize the necessity of a strictly individualized approach to treatment planning, taking into account defect location and volume, anatomical features, masticatory load, and temporomandibular joint condition. The combined application of surgical and prosthetic methods ensures reliable functional restoration. Future prospects involve integrating functional diagnostics, 3D planning, and innovative biomaterials to optimize prognosis and rehabilitation timelines.

Keywords: chewing efficiency, dental implants, post-traumatic defects, maxillofacial rehabilitation, functional diagnostics.

Вишневецкая Виктория Александровна

Аспирант,

Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова

vishnevika@yandex.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования, посвященного оценке методов восстановления жевательной эффективности у пациентов с посттравматическими дефектами зубных рядов. Актуальность работы обусловлена значительным влиянием утраты жевательных единиц на качество жизни и функциональное состояние зубочелюстной системы, включая риски дисфункции височно-нижнечелюстного сустава. Целью исследования явилось определение факторов, влияющих на успешность хирургического и ортопедического лечения при различных локализациях и объемах травматических дефектов.

Для проведения исследования сформирована группа пациентов с посттравматическими дефектами, отобранных на основе комплексного обследования (анамнез, клинический осмотр, рентгенография, ортопантомография, функциональная диагностика). Применялись современные хирургические методики восстановления костной ткани (остеопластика, аутотрансплантация) и комбинированные ортопедические решения с установкой дентальных имплантатов различных модификаций. Выбор метода основывался на топографии дефекта, объеме костной ткани и состоянии мягких тканей. Оценка результатов включала динамическое наблюдение за приживлением имплантатов, анализ распределения жевательного давления и показателей жевательной эффективности с использованием дисперсионного и корреляционного статистического анализа.

Результаты продемонстрировали статистически значимые различия в восстановлении жевательной эффективности и стабилизации имплантатов в зависимости от локализации дефекта. Наивысшие показатели зафиксированы при дефектах в молярной зоне (жевательная эффективность $14,52 \pm 1,03$ усл. ед., стабилизация имплантатов $0,85 \pm 0,05$), промежуточные — в премолярной зоне ($12,38 \pm 0,76$; $0,82 \pm 0,07$), а наиболее низкие — при обширных множественных дефектах ($11,87 \pm 0,91$; $0,78 \pm 0,04$). Анализ через 6 месяцев выявил также более высокую окклюзионную нагрузку ($25,92 \pm 1,36$ Н/см²) и мышечный тонус ($48,27 \pm 1,96$ усл. ед.) в группе с молярными дефектами по сравнению с другими группами. Установлена тесная корреляция между характером дефекта, функциональными параметрами жевания и долгосрочной стабильностью конструкций.

Выводы подчеркивают необходимость строго индивидуального подхода к планированию лечения с учетом локализации и объема посттравматического дефекта, анатомических особенностей, жевательной нагрузки и состояния височно-нижнечелюстного сустава. Комплексное применение хирургических и ортопедических методов обеспечивает достоверное восстановление функции. Перспективы связываются с интеграцией функциональной диагностики, 3D-планирования и инновационных биоматериалов для оптимизации прогноза и сроков реабилитации.

Ключевые слова: жевательная эффективность, дентальные имплантаты, посттравматические дефекты, челюстно-лицевая реабилитация, функциональная диагностика.

Введение

Проблема восполнения утраченных зубов в случаях посттравматических дефектов зубных рядов по-прежнему остается одной из наиболее актуальных в современной стоматологической практике, поскольку утрата жевательных единиц может существенно влиять на общее состояние организма и качество жизни пациента [14, с. 102]. Исследования показывают, что нарушение целостности зубных рядов ведет к изменению жевательной эффективности, перераспределению жевательного давления и возможному развитию неблагоприятных функциональных последствий с вовлечением височно-нижнечелюстного сустава и жевательных мышц [3, с. 107]. Своевременное хирургическое, ортопедическое и ортодонтическое лечение таких пациентов приобретает первостепенное значение для снижения риска прогрессирования осложнений и сохранения костной ткани в области пораженного участка. Развитие новых технологий позволяет специалистам применять комплексные подходы, включающие не только установку имплантатов, но и восстановление мягкотканых структур при наличии выраженных травматических дефектов [7, с. 73]. Это делает возможным более точное восстановление анатомических, эстетических и функциональных параметров, что способствует повышению жевательной эффективности и улучшению общего состояния пациента. Оптимальная интеграция имплантатов, использование остеопластических материалов, а также совершенствование методик репозиции тканей формируют перспективное направление хирургической стоматологии, направленное на улучшение прогноза лечения после травм челюстно-лицевой области.

Несмотря на успешное сочетание классических методов имплантации и современных цифровых систем планирования, решение задач по восполнению зубного ряда в посттравматических случаях по-прежнему осложняется рядом факторов, среди которых можно назвать состояние окружающих тканей, наличие рубцовых изменений, а также степень сохранности опорно-удерживающего аппарата [11]. При этом комплексное диагностическое исследование с использованием рентгенографии и компьютерной томографии обеспечивает возможность более точного определения степени дефекта и планирования объема вмешательства [2, с. 37]. Однако, согласно ряду клинических наблюдений, повышение функциональной эффективности в процессе жевания достигается не только путем механического восполнения зубного ряда, но и благодаря учету физиологических закономерностей распределения жевательного давления в процессе адаптации протезных конструкций. Это обуславливает необходимость междисциплинарного подхода, в котором взаимодействуют специалисты различных направлений: стоматологи-хирурги, ортопеды, ортодонты и врачи функциональной

диагностики. Оптимизация методов лечения и прогнозирования отдаленных результатов требует дальнейших исследований, направленных на углубленное изучение процессов регенерации тканей и восстановления естественных биомеханических характеристик жевательного аппарата, что позволит повысить качество жизни и реабилитации пациентов после травм челюстно-лицевой области.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования была сформирована группа пациентов, перенесших травматические повреждения челюстно-лицевой области с нарушением зубных рядов различной степени тяжести [9, с. 47]. Отбор участников основывался на комплексном подходе, включая тщательный анализ анамнеза, клинического состояния, данных рентгенографии и ортопантомографии, а также результаты объективных методов функциональной диагностики. Исключались пациенты с острыми воспалительными процессами, системными заболеваниями, способными значительно изменить регенеративный потенциал тканей, и отсутствием возможности регулярного врачебного контроля в послеоперационном периоде. Все пациенты, включенные в исследование, прошли единый алгоритм обследования, который включал осмотр стоматолога-хирурга, ортопеда и анализ гнатодинамических показателей в целях последующего восстановления жевательной эффективности. Данный комплекс мероприятий позволил достоверно определить наличие и характер дефектов, а также разработать протокол лечения, наиболее целесообразный для каждого конкретного случая. Согласие на участие в исследовании было получено после детального информирования пациентов о предполагаемых взаимосвязях травматических изменений и способах их коррекции.

В ходе выполнения данного исследования применялись современные хирургические методы восстановления костной ткани, а также комбинированные ортопедические решения, включающие установку имплантатов различных модификаций [15, с. 7]. Методика оперативного вмешательства выбиралась с учетом топографических и морфологических особенностей травматического дефекта, объема доступной костной ткани и состояния окружающих мягких тканей. Для обеспечения биологической стабильности применялись остеопластические материалы с подтвержденной биосовместимостью, а также при необходимости производился аутотрансплантат из донорских зон с минимальными рисками осложнений [1, с. 16]. После установки имплантатов пациенты наблюдались в динамике для объективного контроля стадии приживления, а на основании комплексной функциональной диагностики проводилась оценка распределения жевательного давления и показателей жевательной эффективности. Полученные результаты

анализировались статистически с использованием методов дисперсионного и корреляционного анализа, что позволяет выявить закономерности и факторы, влияющие на успешность долгосрочной стабилизации протезных конструкций в посттравматических случаях. Это позволило обобщить полученные данные и сформировать научно обоснованные выводы о факторах, определяющих эффективность не только первичного, но и отдаленного восстановительного лечения.

Результаты и обсуждение

В процессе анализа данных, полученных от пациентов с посттравматическими дефектами зубных рядов, особое внимание уделялось степени восстановления функциональной жевательной эффективности и изменениям в височно-нижнечелюстном суставе. Актуальность данной проблемы связана с тем, что неправильное распределение жевательной нагрузки, возникающее при неверной адаптации протезных конструкций, способно приводить к дальнейшей деформации зубных рядов и дисфункциям височно-нижнечелюстного сустава [6, с. 30]. Проведенные наблюдения подтверждают, что своевременное выявление нарушений и их коррекция напрямую влияют на результаты реабилитации, качество жизни и социальную адаптацию пациентов. Кроме того, анализ литературы указывает на необходимость комплексного использования цифровых технологий и высокоточных методов диагностики для оптимизации параметров протезирования и сокращения сроков лечения [5, с. 1].

Однако, несмотря на современные возможности визуализации и инженерии, клиническая практика показывает, что степень регенерации костной ткани и интеграции имплантатов в условиях травматических дефектов может отличаться от планируемой, что обуславливается индивидуальными реакциями организма и изменениями биомеханической картины зубочелюстной системы [8, с. 255]. Для объективной оценки эффективности лечения необходимо учитывать такие показатели, как распределение окклюзионных усилий, суммарная мощность жевательной мускулатуры и показатели устойчивости дентальных имплантатов, что отражается в динамике функционального состояния и успешности протезирования в целом. Сосредоточенность на данных аспектах делает очевидным, что внедрение новых решений требует тщательного научного анализа, результаты которого представлены ниже (табл. 1).

Данные, представленные в таблице, свидетельствуют о статистически значимых различиях в уровнях жевательной эффективности и стабилизации имплантатов в зависимости от локализации и обширности травматических дефектов. Так, пациенты с дефектами в молярной зоне показали более высокие средние значения, что

Таблица 1.
Средние показатели жевательной эффективности и стабилизации имплантатов у пациентов с посттравматическими дефектами ($M \pm m$)

Группа пациентов	Жевательная эффективность (условные ед.)	Стабилизация имплантатов (коэффициент)
1. Дефекты в премолярной зоне	$12,38 \pm 0,76$	$0,82 \pm 0,07$
2. Дефекты в молярной зоне	$14,52 \pm 1,03$	$0,85 \pm 0,05$
3. Обширные множественные дефекты	$11,87 \pm 0,91$	$0,78 \pm 0,04$

указывает на лучшее восстановление функционального потенциала и устойчивость конструкций при более выраженном объеме жевательной нагрузки. При этом у пациентов с обширными множественными дефектами жевательная эффективность и показатели стабилизации несколько снижены, что может быть объяснено сложностью лечения и большими объемами реабилитируемых тканей.

Важным моментом является то, что наблюдаемые различия статистически достоверны и подтверждаются результатами дисперсионного анализа, что указывает на необходимость индивидуального подхода к выбору стратегии хирургического и ортопедического лечения. Более высокие значения стабилизации имплантатов в молярной зоне отражают оптимальное сочетание механических свойств костной ткани и интенсивности жевательных нагрузок, тогда как при множественных дефектах необходимо учитывать возможность неоднородного распределения давления. Следовательно, комплексная оценка локализации травматических повреждений, биомеханики жевания и морфофункционального состояния костных структур позволяет уточнить прогноз и скорректировать протоколы, направленные на улучшение долгосрочных результатов.

Анализ изменения биомеханической картины жевания в послеоперационном периоде требует дополнительного уточнения факторов, связанных с расположением дефекта и анатомическими особенностями челюстей [13, с. 282]. Комплексная методология, включающая рентгенографические методики, компьютерную томографию и функциональные пробы, обеспечивает более детальную картину компенсационных механизмов и степени нагрузки на дентальную систему. Кроме того, в литературе указывается, что системный подход включает оценку влияния мягкотканых структур и мышечного тонуса на итоговую функциональную эффективность [10, с. 134]. Сумма этих данных дает возможность планировать как объем хирургического вмешательства,

так и особенности конструкции будущего протеза или имплантата (табл. 2).

Таблица 2.

Динамика изменений окклюзионных параметров и мышечного тонуса через 6 месяцев после лечения ($M \pm m$)

Группа пациентов	Окклюзионная нагрузка (H/cm^2)	Мышечный тонус (единицы услов.)
1. Дефекты в премолярной зоне	$23,74 \pm 1,18$	$46,81 \pm 2,05$
2. Дефекты в молярной зоне	$25,92 \pm 1,36$	$48,27 \pm 1,96$
3. Множественные посттравматические дефекты	$21,55 \pm 1,47$	$44,09 \pm 2,31$

Представленные в таблице результаты показывают, что более высокие показатели окклюзионной нагрузки отмечаются у пациентов с дефектами в молярной зоне, что подтверждает их решающую роль в формировании основной жевательной силы. При этом мышечный тонус в данной группе пациентов также несколько выше, что может отражать активизацию компенсаторных механизмов для поддержания эффективности жевания в условиях существенной нагрузки. Множественные посттравматические дефекты, в свою очередь, сопровождаются относительно меньшими значениями по обоим показателям, что свидетельствует о необходимости большего времени для полной адаптации и формирования стабильных жевательных паттернов.

Полученные данные имеют высокую статистическую значимость, что подтверждается результатами корреляционного анализа, демонстрирующего тесную связь между функциональными параметрами жевания и характером посттравматического дефекта. Фактиче-

ски, оптимизация восстановительных методов должна учитывать как локальные, так и системные факторы, включая степень вовлечения височно-нижнечелюстного сустава и состояние мышечно-связочного аппарата. Все это формирует необходимость применения индивидуализированных протоколов лечения, которые, помимо выбора репаративного материала и типа протезной конструкции, учитывают особенности каждого пациента и позволяют более точно прогнозировать исходы реабилитации.

Выводы

Комплексное обследование пациентов с посттравматическими дефектами зубных рядов и выбор адекватного хирургического и ортопедического лечения позволяют добиться достоверного восстановления жевательной эффективности и стабилизации имплантатов [4, с. 10]. Анализ полученных данных показывает, что локализация дефекта и объем разрушения костных структур существенно влияют на результат лечения и требуют индивидуального подхода с учетом анатомических особенностей, степени жевательной нагрузки и функционального состояния височно-нижнечелюстного сустава.

Разработка новых реабилитационных методов, основанных на комплексном использовании передовых технологий диагностики и 3D-планирования, способна повысить прогнозируемость результатов и сократить период адаптации к протезам. Перспективным направлением дальнейших исследований является интеграция данных функционального анализа, генетических и морфологических характеристик, а также внедрение инновационных биоматериалов, обеспечивающих наиболее благоприятные условия для регенерации костной ткани и восстановления естественной биомеханики жевательного аппарата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арутюнов С.Д., Карапетян К.Л. Замещение концевых дефектов зубных рядов несъемными конструкциями протезов с опорой на ZX-27 // Зубной техник. 2007. № 3. С. 14–19.
2. Арутюнов С.Д., Лебеденко И.Ю., Отырба Р.Д., Мальгинов Н.Н., Шарабидзе А.Р. Современные конструкционные материалы и новые технологии, используемые в реконструкции разрушенных зубов и замещении дефектов зубных рядов // В сборнике: Современные проблемы стоматологии. Сборник тезисов научных трудов: к 70-летию В.Н. Копейкина. Москва, 1999. С. 36–39.
3. Брынцев А.С., Данилина Т.Ф. Повышение эффективности непосредственного протезирования при лечении пациентов с включенными дефектами зубных рядов // В сборнике: Актуальные вопросы современной стоматологии. Материалы конференции, посвященной 75-летию Волгоградского Государственного медицинского университета, 45-летию кафедры терапевтической стоматологии и 40-летию кафедры ортопедической стоматологии / Под общ. ред. В.И. Петрова; редкол.: М.Е. Стаценко (отв. ред.), С.В. Поройский, В.Ф. Михальченко, В.И. Шемонаев, А.Г. Петрухин (отв. секр.). 2010. С. 105–108.
4. Вартанян В.С. Особенности восстановительного лечения детей с дефектами зубных рядов: автореферат дис. ... канд. мед. наук / Кубанский государственный медицинский университет. Краснодар, 1996. 10 с.
5. Васильева Т.А. Совершенствование контроля восстановления жевательной эффективности на этапах ортопедического лечения несъемными зубными протезами: дис. ... канд. мед. наук / Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко. Воронеж, 2021. 1 с.
6. Глухова Ю.М., Андрейченко В.А. Обзор и оценка эффективности современных способов восстановления окклюзионных поверхностей зубных рядов // В сборнике: Актуальные проблемы стоматологии детского возраста и ортодонтии. Сборник научных статей IX региональной научно-практической конференции с международным участием по детской стоматологии / Под ред. А.А. Антоновой. 2019. С. 26–31.

7. Деминов А.А., Барановская М.А., Пергатый Н.А., Чижов Ю.В., Казанцева Т.В. Замещение дефектов зубных рядов в боковых отделах несъемными протезами на мини имплантатах // В сборнике: Стоматологическая весна в Белгороде — 2022. Сборник трудов Международной научно-практической конференции в рамках международного стоматологического фестиваля «Площадка безопасности стоматологического пациента», посвященного 100-летию Московского государственного медико-стоматологического университета им. А.И. Евдокимова. Белгород, 2022. С. 72–74.
8. Жиров А.И., Самойленко З.С., Потиев Д.В., Жирова В.Г. Современные представления о распространенности, причинах и методах лечения дефектов зубных рядов // В книге: Сборник материалов II Студенческой научно-теоретической конференции «Актуальная медицина». Симферополь, 2019. С. 254–257.
9. Кулаков О.Б., Супрунов С.Н. Замещение одиночных дефектов зубных рядов при помощи остеоинтегрированных имплантатов. Хирургические и ортопедические аспекты // Институт стоматологии. 2006. № 3 (32). С. 46–48.
10. Мамедов Э.С., Войтяцкая И.В., Голинский Ю.Г. Клинический анализ изменений зубочелюстного аппарата у стоматологических больных с нарушениями ВНЧС, сопровождающихся дефектами зубных рядов // В сборнике: Стоматология славянских государств. Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции, посвященной 30-летию компании «ВладМиВа» / Под ред. А.В. Цимбалистова, Н.А. Авхачевой, Г.Г. Пахлева. Белгород, 2022. С. 133–136.
11. Пчелин И.Ю., Тимачева Т.Б., Шемонаев В.И. Протезирование встречных концевых дефектов зубных рядов. Волгоград, 2013.
12. Скрыль А.В., Бештокова Ф.Х. Восстановление разрушенной коронковой части многокорневых зубов с временными ортопедическими конструкциями и материалами // Кубанский научный медицинский вестник. 2009. № 3 (108). С. 122–127.
13. Скрыль А.В., Никифорова В.А. Принципы восстановления дефектов коронки зуба // В сборнике: Актуальные вопросы клинической стоматологии. Сборник научных работ. 2014. С. 280–284.
14. Юшманова Т.Н., Ипатов О.Н., Спиридонова Е.А., Григорьева Н.И. Современные возможности эстетических реставраций частичных дефектов зубных рядов // В сборнике: Основные стоматологические заболевания, их лечение и профилактика на Европейском Севере / Министерство здравоохранения Российской Федерации, Архангельская государственная медицинская академия, Северный научный центр РАМН, Департамент здравоохранения администрации Архангельской области, Ассоциация стоматологов Архангельской области. Архангельск, 2000. С. 100–103.
15. Якушечкина Е.П. Повышение эффективности восстановления контактного пункта жевательной группы зубов: дис. ... канд. мед. наук / Центральный научно-исследовательский институт стоматологии. Москва, 2003. 7 с.

© Вишневецкая Виктория Александровна (vishnevika@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ФАКТОРОВ РИСКА НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ХИРУРГИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ ЯЗВЕННОЙ БОЛЕЗНИ ДВЕНАДЦАТИПЕРСТНОЙ КИШКИ

Горпинич Александр Борисович

доктор медицинских наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Государственный университет
просвещения», г. Москва,
doc.goralex@mail.ru

POSSIBILITIES OF PREDICTING RISK FACTORS OF UNSATISFACTORY RESULTS OF SURGICAL TREATMENT OF DUODENAL ULCER

A. Gorpinich

Summary. The choice of the method of surgical intervention has a significant impact on the results of surgical treatment of duodenal ulcer. It can be assumed that the degree of reliability of the decision made, when choosing an individual type of surgery, will depend on the completeness of the consideration of the factors. The aim of the study was to study the possibility of predicting risk factors of unsatisfactory results of surgical treatment of duodenal ulcer. The prognostic value of various clinical manifestations of duodenal ulcer and intraoperative anatomical changes in 99 patients with duodenal ulcer was studied. Based on the prognostic value of each factor, the second stage of this study was the construction of decision rules for determining the individual choice of the type of surgery. In this case, the problem was solved separately for each type of surgery: gastric resection, trunk vagotomy with gastroduodenostomy according to Zhabula, selective proximal vagotomy. The principles of mathematical justification of possible risk factors for unsatisfactory results of various surgical interventions for duodenal ulcer presented in the article and the decision rules applied, as well as the previously developed differentiated clinical indications made it possible to avoid the failure of the duodenal stump (within three years) and reduce postoperative mortality from 4.5 % to 1.5 %.

Keywords: prognosis, surgical treatment, duodenal ulcer.

Аннотация. Выбор метода оперативного вмешательства оказывает существенное влияние на результаты хирургического лечения язвенной болезни двенадцатиперстной кишки. Можно предположить, что степень достоверности принимаемого решения, при выборе индивидуального вида операции, будет зависеть от полноты учета действующих факторов. Целью исследования явилось изучение возможности прогнозирования факторов риска неудовлетворительных результатов хирургического лечения язвенной болезни двенадцатиперстной кишки. Проведено изучение прогностического значения разнообразных клинических проявлений язвенной болезни двенадцатиперстной кишки и интраоперационных анатомических изменений у 99 больных с дуоденальной язвой.

Исходя из прогностической ценности каждого фактора, вторым этапом данного исследования явилось построение решающих правил для определения индивидуального выбора вида операции. При этом задача решалась отдельно для каждого вида операции: резекция желудка, стволовая ваготомия с гастродуоденостомией по Жабуде, селективная проксимальная ваготомия. Представленные в статье принципы математического обоснования возможных факторов риска неудовлетворительных результатов различных хирургических вмешательств при дуоденальной язве и примененные решающие правила, а также разработанные ранее дифференцированные клинические показания позволили избежать несостоятельности культи двенадцатиперстной кишки (в течение трех лет) и снизить послеоперационную летальность с 4,5 % до 1,5 %.

Ключевые слова: прогнозирование, хирургическое лечение, язвенная болезнь двенадцатиперстной кишки.

Введение

Известно, что фактором, оказывающим существенное влияние на результаты хирургического лечения язвенной болезни двенадцатиперстной кишки, является выбор метода оперативного вмешательства [1, 2, 3].

Применяемые в медицинской практике схемы оценки рисков неудовлетворительных результатов оперативного лечения хирургических заболеваний и высокая эффективность математического моделирования и прогнозирования уже с использованием нейронных сетей, искусственного интеллекта способствуют продвижению данного направления в практическом здравоохранении.

Выбор тех или иных математических методов при описании и исследовании объектов медицины зависит от индивидуальных знаний специалиста и от особенностей решаемых задач [4].

Можно предположить, что степень достоверности принимаемого решения, при выборе индивидуального вида операции, будет зависеть от полноты учета действующих факторов.

Известно, что большое количество показателей является одновременно преимуществом (высокая информативность) и недостатком, поскольку значительно усложняет их оценку [5].

Одним из наиболее перспективных направлений оптимизации анализа медицинских данных, является создание математических моделей прогнозирования [6, 7, 8]. При этом, создание математических моделей использует принципы анализа «больших данных» (Big Data), что в наибольшей степени соответствует требованиям, предъявляемым к анализу медицинских данных [9, 10].

Математическое моделирование представляет собой систему математических выражений, описывающих свойства, взаимосвязи, структурные и функциональные параметры объектов моделирования [7, 11, 12].

Метод дискриминантного анализа — это статистический метод, предназначенный для изучения отличий между двумя или большим количеством групп объектов с использованием данных о разнообразии нескольких признаков, отличающих эти объекты друг от друга [13, 14, 15]. Так, в работе П.М. Косенко с соавторами в 2020 году описан способ анализа медицинских данных путем создания математических моделей прогнозирования пилородуоденального стеноза на основе дискриминантного анализа. Моделирование проводилось на основании данных обследования 88 больных с язвенным пилородуоденальным стенозом двенадцатиперстной кишки. Были разработаны две математические модели нарушения эвакуаторной функции желудка у больных с пилородуоденальным стенозом. На основе предложенных прогностических моделей были созданы компьютерные программы автоматизированной диагностики пилородуоденального стеноза и программа определения степени нарушения эвакуаторной функции, которая имела следующие показатели: стимулированная суммарная электрическая активность ЖКТ, стимулированный ритм желудка, базальный ритм двенадцатиперстной кишки, базальный ритм толстой кишки, базальная и стимулированная электрическая активность подвздошной кишки. Включение в модель всех электрофизиологических показателей позволило учесть изменения моторики всех отделов ЖКТ, а не только желудка и двенадцатиперстной кишки. Созданные модели позволяют диагностировать пилородуоденальный стеноз и степень нарушения эвакуаторной функции желудка у больных с пилородуоденальным стенозом с точностью 96,2 и 100 % соответственно [5].

Цель исследования

Изучить возможности прогнозирования факторов риска неудовлетворительных результатов хирургического лечения язвенной болезни двенадцатиперстной кишки.

Материал и методы исследования

Проведено исследование по изучению клинических и интраоперационных факторов риска развития неудов-

летворительных результатов оперативного лечения дуоденальной язвы.

В процессе сбора анамнеза и уточнения жалоб осуществлялось целенаправленное определение различных факторов риска развития рецидивов язвенной болезни и формирования послеоперационных патологических симптомокомплексов после плановых хирургических операций. Для этого мы применяли разработанную анкету первичной клинической информации и данных интраоперационной анатомической ситуации больного дуоденальной язвой.

Анкета исходной клинической информации и данных интраоперационной анатомической ситуации больного язвенной болезнью двенадцатиперстной кишки

1. Ф.И.О.
2. Адрес
3. И.Б. №
4. Диагноз
5. Пол: М. Ж.
6. Возраст: до 20; 20-29; 30-39; 40-49; 50 и старше.
7. Дата поступления:
— операции:
— выписки:
8. Профессия: а) физический труд; б) умственный труд
9. Наличие язвенной болезни у родственников: а) да, б) нет
10. Курение: а) да, б) нет
11. Алкоголь: а) да, б) нет
12. Длительность язвенного анамнеза:
а) до 3 лет, б) 3–9 лет, в) 10 и более
13. Осложнения в анамнезе: а) перфорация, б) кровотечение
14. Степень кровотечения: а) легкая, б) средняя, в) тяжелая, г) рецидивирующее
15. Консервативное лечение: а) эффективно, б) без эффекта
16. Сочетанные осложнения в анамнезе: а) да, б) нет
17. Течение: а) легкой степени, б) средней тяжести, в) тяжелое
18. Количество дней нетрудоспособности в году:
а) до 20, б) 20-29, в) 30-39, г) 40 и выше
19. ЖКБ: а) да, б) нет
20. Панкреатит: а) да, б) нет
21. Сахарный диабет: а) да, б) нет
22. Сердечно-сосудистая недостаточность: а) да, б) нет
23. Дыхательная недостаточность: а) да, б) нет
24. Болевой синдром: а) да, б) нет
25. Иррадиация болей в спину: а) да, б) нет
26. Питание: а) нормального, б) повышенного, в) пониженного
27. Конституция: а) нормостеник, б) гиперстеник, в) астеник

28. Тип секреции: а) нормальный, б) гипореактивный, в) пангипохлоргидрический, г) гиперреактивный, д) гиперпариетальный, е) пангиперхлоргидритический
29. Тип моторики (ЭГГ): а) нормокинетический, б) гипокинетический, в) гиперкинетический, г) раздраженный
30. Дуоденоманометрия: а) нормальное, б) низкое, в) высокое
31. Гастроманометрия: а) нормальное, б) низкое, в) высокое
32. Наличие симптома «ниши» по Р-логическим данным: а) да, б) нет
33. Степень стеноза (Р-логически): а) компенсированный, б) субкомпенсированный, в) декомпенсированный, г) рубцовая деформация
34. Тонус желудка (Р-логически): а) нормотоничен, б) гипотоничен, в) гипертоничен, г) раздраженный, д) атоничен
35. Уровень стояния дуоденоюнального перехода (рентген.): а) обычный, б) высокий
36. Дуоденогастральный рефлюкс (рентген.): а) да, б) нет
37. Дуоденостаз (рентген.): а) да, б) нет
38. Эндоскопические данные: а) язва передней стенки, б) язва задней стенки, в) множественные язвы, г) язва медиальной стенки, д) язву увидеть нельзя, е) «целующиеся» язвы и постлуковичная язва
39. Степень стеноза (энд.): а) компенсированный, б) субкомпенсированный, в) декомпенсированный, г) рубцовая деформация
40. Рефлюкс-эзофагит (энд.): а) да, б) нет
41. Недостаточность кардии (энд.): а) I степени, б) II степени, в) III степени
42. Гастрит (энд.): а) атрофический, б) гипертрофический
43. Размеры язвы (энд.): а) до 2 см, б) больше 2 см, в) больше 3 см
44. Проба Фишера (демпинг-реакция): а) положительная б) отрицательная
45. Тяжесть демпинг-реакции: а) легкая, б) средней тяжести, в) тяжелая
46. Стадия развития стеноза (энд.): а) воспалительная, рубцово-язвенная, в) рубцовая
47. Уровень гастрина крови: а) высокий, б) низкий, г) нормальный
48. Пенетрация язвы (интраоперац.): а) в головку поджелудочной железы, б) в печеночnodвенадцатиперстную связку, в) прочие
49. Перипроцесс в пилородуоденальной зоне (интраоперац.): а) выраженный, б) нет
50. Размеры желудка (интраоперац.): а) обычные, б) несколько увеличен, в) выраженная эктазия
51. Стенки желудка (интраоперац.): а) нормальные, б) гипертрофированы, истончены
52. Малый сальник (интраоперац.): а) обычный, б) истончен, в) «жирный», г) рубцово изменен, д) воспалительно инфильтрирован
53. Тип строения блуждающих нервов (интраоперац.): а) рассыпной, б) магистральный
54. Толщина стволов вагуса (интраоперац.): а) до 1,5 мм, до 2,5 мм, в) 2,5мм и более
55. Состояние двенадцатиперстной кишки (интраоперац.): а) обычная, б) расширена до 5 см, в) расширена свыше 5 см, г) сужена
56. Угол Гиса: а) острый, б) тупой, в) прямой
57. Желудочно-диафрагмальная связка (интраоперац.): а) выражена, б) не выражена
58. Название операции:
59. Оценка результатов операции по шкале Visick: а) отличный, б) хороший, в) удовлетворительный, г) неудовлетворительный

Результаты исследования и их обсуждение

Как следует из приведенной анкеты, важное значение уделялось общеклиническим характеристикам (пол, возраст, профессия, история болезни, отражающая течение заболевания, наличие осложнений, эффект предшествующего лечения), а также данным объективного исследования. Выявлены возможные внутриоперационные факторы риска при ревизии органов брюшной полости.

Прогностическое значение разнообразных клинических проявлений язвенной болезни двенадцатиперстной кишки и интраоперационных анатомических изменений изучено у 99 больных с этой патологией. Селективная проксимальная ваготомия (СПВ) с дренирующей операцией выполнена у 21 пациента, у 29 — стволовая ваготомия с гастродуоденостомией по Жабуле, 49 больным произведена — резекция желудка.

Прогностическая ценность выявлялась путем расчета модифицированного критерия Стьюдента. Изучение отдаленных результатов хирургического лечения язвенной болезни двенадцатиперстной кишки в сроки от 3 месяцев до 14 лет осуществлялось методом анкетирования, стационарного и амбулаторного обследования и оценивалось по модифицированной шкале Visick. В каждой группе больные были подразделены на подгруппы. В первую были включены пациенты с отличными и хорошими результатами оперативного лечения, во вторую — с удовлетворительными и неудовлетворительными.

В результате анализа информативности 29 клинических признаков, в группе пациентов, перенесших СПВ, прогностически неблагоприятными (факторы риска неблагоприятного отдаленного исхода СПВ) оказались локализация язвы ($t = -4,66$), тип секреции ($t = 3,63$), симптом

«ниши» ($t = 2,83$), степень стеноза ($t = -2,65$), пенетрация язвы в печеночно-дуоденальную связку ($t = -2,65$), пенетрация в поджелудочную железу ($t = -1,87$), сочетанные осложнения в анамнезе ($t = -1,00$) и др. Исследование связи исхода с другими показателями выявило значимую ($P \geq 95\%$) корреляцию исхода с недостаточностью кардии ($r = 0,7559$). Увеличение степени недостаточности кардии ухудшает результаты хирургического лечения.

Из 27 проанализированных клинических признаков, в группе больных, которым была выполнена стволовая ваготомия с гастродуоденостомией по Жабуле, наиболее прогностически неблагоприятными оказались исхудание ($t = 3,01$), сочетанные осложнения в анамнезе ($t = -2,49$), симптом «ниши» ($t = -2,31$), пенетрация язвы в поджелудочную железу ($t = 2,03$), пол ($t = 1,82$), болевой синдром ($t = 1,82$) и др. При изучении связи между исходом и другими признаками выявлена значимая ($P \geq 95\%$) корреляция исхода с возрастом ($r = -0,3879$). Результат хирургического лечения улучшался с увеличением возраста пациента.

У больных, которым была выполнена резекция желудка, анализировали 32 признака. К наиболее прогностически неблагоприятным относились снижение тонуса желудка ($t = 5,57$), курение ($t = 3,87$), наличие болевого синдрома ($t = 2,08$), перипроцесс в пилорoduоденальной зоне ($t = 1,79$), размеры желудка ($t = -1,69$), состояние двенадцатиперстной кишки ($t = 1,51$) и др. Была выявлена значимая ($P \geq 95\%$) корреляция между исходом и полом ($r = 0,3429$). Более высокая вероятность неудовлетворительного исхода наблюдалась у женщин.

На основании прогностической ценности каждого фактора вторым этапом данного исследования стало построение решающих правил для индивидуального выбора вида операции. При этом задача решалась отдельно для каждого вида операции: резекция желудка, стволовая ваготомия с гастродуоденостомией по Жабуле, селективная проксимальная ваготомия. Вычисления проводились с использованием пакетов прикладных программ обработки биомедицинской информации. Использование пошагового дискриминантного анализа позволило построить диагностические правила не по всему набору изученных признаков, а используя только наиболее «информативные» из них.

Дискриминантный анализ позволяет оценить диагностическую информативность отдельных признаков. В клинических исследованиях дискриминантный анализ

используется для построения решающего правила диагностики на основе данных «обучающей» выборки, то есть отнесения пациента, обладающего набором признаков, к одному из заранее заданных классов. На практике нередко приходится выбирать из всего набора признаков некоторое подмножество этих признаков, по которым можно построить наилучшее разделение классов, то есть в процессе создания определяющего правила происходит выделение «информативных» и «неинформативных» для диагностики признаков, а также сокращение числа признаков для построения определяющего правила без заметного снижения качества диагностики.

Классификация состоит в отнесении больного к той группе, для которой значение линейной дискриминантной функции максимально.

На печать выводятся:

1. Среднее значение M каждой группы отдельно и вместе по всем признакам.
2. Среднее квадратическое отклонение по каждому признаку (средний разброс значений каждого признака).
3. Средние (средн. квадр. отклонение $= \frac{M}{\sigma^2}$).
4. F иск. — статистика и степени свободы (численность больных) для каждого признака, на каждом шаге.
5. F вкл. — статистика для определения различия между парами групп.
6. Дискриминантные функции.
7. Матрицы классификации и процент верной классификации.
8. Апостериорные вероятности для каждой группы.

Для каждой операции построены по два диагностических правила (для благоприятного и неблагоприятного отдаленного исхода) с использованием признаков, измеренных до и во время операции.

Заключение

Представленные в статье принципы математического обоснования возможных факторов риска неудовлетворительных результатов различных хирургических вмешательств при дуоденальной язве и примененные решающие правила, а также разработанные ранее дифференцированные клинические показания позволили избежать несостоятельности культи двенадцатиперстной кишки (в течение трех лет) и снизить послеоперационную летальность с 4,5 % до 1,5 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кадыров Д.М., Кодиров Ф.Д., Сафаров Д.Б., Амонов У.М., Табаров З.В., Сайдалиев Ш.Ш. Селективная проксимальная ваготомия и дуоденопластика в хирургии рубцово-язвенных дуоденостенозов // *Здравоохранение Таджикистана*. 2019. №3. С.5–14. EDN: PDRTAF
2. Кодиров Ф.Д., Сайдалиев Ш.Ш., Кадыров Д.М., Табаров З.В. Хирургическая тактика при сочетании рубцово — язвенного дуоденостеноза с пенетрацией язвы // *Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение биологических и медицинских наук*. 2019. №4 (207). С. 78–88. EDN: GCXLCD
3. Соломонова Г.А. Применение селективной проксимальной ваготомии при язве двенадцатиперстной кишки, осложненной кровотечением и пенетрацией // *Медицинский журнал*. 2013. №3 (45). С.21–26. EDN: RSKAGN
4. Алиева Э.А., Исмаилова Ж.К., Берикова Э.А., Арингазина А.М. Математическое моделирование в здравоохранении // *Фтизиопульмонология*. 2017. № 1 (29). С. 18–25. EDN: UVLPX
5. Косенко П.М., Вавринчук С.А., Попов А.И., Бояринцев Н.И., Сунозова Г.Д. Математическое моделирование в хирургии пилородуоденального стеноза // *Дальневосточный медицинский журнал*. 2020. №3. С. 105–110. <http://dx.doi.org/10.35177/1994-5191-2020-3-105-110>
6. Затолокина М.А., Польской В.С., Зуева С.В., Ласкова А.В., Мезенцева Ю.И., Шеховцова А.С., Асеева С.А., Боева А.О., Сирдюк И.В., Сергеева В.Н., Орлова И.А., Пинжуро О.С. Математическое моделирование и прогнозирование — как методы научного познания в медицине и биологии (обзор литературы) // *Международный журнал экспериментального образования*. — 2015. — № 12-4. — С. 539–543; URL: <http://www.expeducation.ru/ru/article/view?id=9220> (дата обращения: 07.07.2020).
7. Цуканов А.В., Иванов И.С., Горюшкин Е.И., Пономарева И.В. Методы прогнозирования и моделирования в хирургии // *Современные проблемы науки и образования*. 2023. №4. С. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.17513/spno.32747>
8. Крылов А.П. Математическое моделирование в современной медицине: области, подходы, проблемы // *Терапевт*. 2020. №9. С.75–79. DOI: 10.33920/MED-12-2009-08
9. Цветкова А.Б. Применение «больших данных» в работе медицинских учреждений // *Маркетинг MBA. Маркетинговое управление предприятием*. — 2019. — Т. 10, № 4. — С. 464–477. EDN: DCCEMJ
10. Fatt, Quek & Ramadas, Amutha. (2018). The Usefulness and Challenges of Big Data in Healthcare // *Journal of Healthcare Communications*. 03. 10.4172/2472 — 1654.100131
11. Вильдеман А.В., Ташинов А.А., Бронников В.А. Многомерный метод индивидуального прогнозирования индекса моторики // *Информационные технологии и вычислительные системы*. — 2010. — № 3. — С. 79–85. EDN: OWVKMZ
12. Валитов Д.Р., Кубряк А.И., Беляева М.Б. Сравнительный анализ MATLAB и Mathcad в контексте математического моделирования // *Научное обозрение. Технические науки*. 2024. № 3. С. 5–9; URL: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1468> (дата обращения: 29.05.2025). DOI: <https://doi.org/10.17513/srts.1468>
13. Битюков В.К., Моторин М.Л., Саввина Е.А. Формирование классов объектов методом дискриминантного анализа // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2014. №1 (59). С. 73–78. EDN: SDHAZB
14. Первун О.Е. Реализация метода дискриминантного анализа для классификации объектов в R // *Информационно-компьютерные технологии в экономике, образовании и социальной сфере*. 2020. № 3 (29) С.69–75. EDN: MRFTIW
15. Н.В. Протопопова, Л.И. Колесникова, А.Ю. Марьян, И.М. Михалевич, Н.А. Курашева, Н.В. Королева Дискриминантный анализ как метод определения гестационного процесса у женщин, употребляющих алкоголь в пренатальном периоде, и состояния здоровья их новорожденных // *Бюллетень ВСНЦ СО РАМН*. 2015. №5 (105). С.29–34. EDN: VHVCBH

© Горпинич Александр Борисович (doc.goralex@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

КЛИНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЭНТЕРАЛЬНОГО ЗОНДОВОГО ПИТАНИЯ

CLINICAL RATIONALE FOR THE USE OF ENTERAL TUBE FEEDING DEVICE

R. Idrisov
S. Kapralov
M. Polidanov
A. Kashikhin
R. Petrunkin
K. Volkov

Summary. The aim of the study is clinical substantiation of a device for enteral probe feeding. The study was carried out on the basis of the surgical department of the S.R. Mirotvortsev University Clinical Hospital No. 1. The device for enteral tube feeding contains a container for enteral feeding with a lid. The lid is equipped with three ports. To the first port, inside the container, there is attached a mechanism for mixing enteral probe feeding, and on the outside, there is a compressor. To the second port, on the outer side, is connected a sensor for changing the pressure in the container and in the gastrointestinal tract, connected to a data analysis unit and an outlet valve designed to control the pressure, and made with an opening and closing mechanism. To the third port, inside the vessel, is attached a mechanism for feeding enteral probe feeding, and on the outside of the port is a nasointestinal probe attached to the patient's probe. The developed device reduces traumatization and provides the least number of consequences associated with the technical aspects of intubation, as well as provides full control of enteral tube feeding. Besides, the developed device expands the arsenal of existing devices of similar purpose, it is compact and easy to handle.

Keywords: abdominal surgery, enteral nutrition, nasointestinal tube, device for enteral tube feeding, clinical justification.

Идрисов Рейзудин Имамудинович

Ассистент, Саратовский государственный
медицинский университет им. В.И. Разумовского

Капралов Сергей Владимирович

д.м.н., доцент, Саратовский государственный
медицинский университет им. В.И. Разумовского
sergejkapralov@yandex.ru

Полиданов Максим Андреевич

специалист научно-исследовательского отдела,
ассистент, Университет «Реавиз», г. Санкт-Петербург
maksim.polidanov@yandex.ru

Кашихин Андрей Андреевич

Университет «Реавиз», г. Санкт-Петербург

Петрунькин Родион Павлович

Университет «Реавиз», г. Санкт-Петербург

Волков Кирилл Андреевич

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский
университет им. В.И. Разумовского» Минздрава России

Аннотация. Целью исследования является клиническое обоснование устройства для энтерального зондового питания. Исследование выполнено на базе хирургического отделения Университетской клинической больницы № 1 имени С.Р. Миротворцева. Устройство для проведения энтерального зондового питания содержит емкость для энтерального питания с крышкой. Крышка оснащена тремя портами. К первому порту, внутри емкости, присоединен механизм перемешивания энтерального зондового питания, а с наружной стороны — компрессор. Ко второму порту, с наружной стороны, присоединен датчик для изменения давления в емкости и в желудочно-кишечном тракте, соединенный с блоком анализа данных и выпускным клапаном, предназначенным для контроля давления, и выполненным с механизмом открывания и закрывания. К третьему порту, внутри емкости, присоединен механизм подачи энтерального зондового питания, а с наружной стороны порта — назоинтестинальный зонд, присоединяемый к зонду пациента. Разработанное устройство позволяет снизить травматичность и обеспечить наименьшее количество последствий, связанных с техническими аспектами интубации, а также обеспечивает полный контроль подачи энтерального зондового питания. К тому же, разработанное устройство расширяет арсенал существующих устройств подобного назначения, оно компактно и просто в обращении.

Ключевые слова: абдоминальная хирургия, энтеральное питание, назоинтестинальный зонд, устройство для энтерального зондового питания, клиническое обоснование.

Введение

Из уровня техники известно устройство для энтерального введения жидкости [1], содержащее емкость для питательной смеси, нагреватель, блок перемешивания, соединенные с емкостью насос и зонд, вводимый пациенту, блок программирования подачи питательной смеси со счетчиком объема и индикатором, датчиком температуры нагрева смеси в виде реостата, блок управления нагревателем и приводами устройства перемешивания и насоса с кнопками их включения и отключения.

Однако данное устройство имеет сложную конструкцию, а именно механизм перемешивания смеси за счет механического блока, не обеспечивает измерение давления в кишечнике для оценки перистальтики кишечника для прекращения введения питательной смеси при низких ее значениях (60–70 миллибар), а только при опустошении емкости со смесью. Не оснащен клапаном сброса давления при высоких его значениях, не обеспечивает автоматического контроля подачи смеси и ее уровня емкости, автоматического поддержания заданной температуры нагрева питательной смеси в зависимости от температуры окружающей среды, автоматической сигнализации об опорожнении последней и прекращении подачи смеси, из-за чего не исключены ее перегрев и перегрев и длительные перерывы подачи, снижающие лечебный эффект энтерального питания.

Однако данное устройство имеет механизм перемешивания смеси за счет подачи компрессором воздуха в емкость, обеспечивая измерение давления в кишечнике для оценки перистальтики кишечника и прекращения введения питательной смеси при высоких ее значениях (30 миллибар). При значениях 5–6 миллибар, вновь иницируется работа компрессора, и возобновляется подача питательной смеси в кишечник.

Известен насос для энтерального питания KellyMed KL-5021A, включающий корпус, снабженный перекрываемым крышкой окном для установки на подставку кассеты с емкостями для смесей для энтерального питания и окном, выполненным на его лицевой панели и предназначенным для проведения трубки, капельницу для соединения с зондом для энтерального зондового питания или дозатором, цилиндрические нагревательные элементы, установленные внутри корпуса в нижней его части у боковых стенок и огибаемые воздуховодами, соединенными с емкостями для смесей для энтерального зондового питания, при этом нагревательные элементы отделены от стенок корпуса защитными кожухами, компрессор с возможностью подачи воздуха, соединенный с огибающими нагревательные элементы воздуховодами, соединенными также с емкостями для смесей для энтерального зондового питания, при этом в пробках

упомянутых емкостей установлен клапан для сброса избыточного давления в виде инъекционной иглы, верхний конец которой размещен выше уровня жидкости, и капельницы, и фильтра, установленного между компрессором и воздуховодами.

Однако данное устройство не оснащено механизмами для постоянного перемешивания питательной смеси, для контролируемого зондового питания, имеет сложный и малополезный механизм нагревания, усложняющий конструкцию, имеет 2 отсека, усложняющие взаимодействие механизмов подачи питательной смеси.

Известен прибор для энтерального зондового питания «КЭП-1» [2], включающий роликовый насос с системой регулирования расхода питательной смеси и резервуара емкостью 2,5 литра с мешалкой, который сразу заполняется суточным количеством смеси, допускаемый темп введения смеси от 40 до 600 мл в час.

Известен также прибор «Питон-101», представляющий собой перистальтический насос с возможностью введения смеси с различной скоростью и насос «Kangaroo K-324» с темпом введения смеси от 1 до 300 мл в час.

Известно устройство для энтерального зондового питания [3], которое состоит из теплонепроницаемого корпуса, внутри которого расположены цилиндрические нагревательные элементы, отделенные от стенок корпуса защитными кожухами, воздуховоды, огибающие их и соединенные с емкостью для энтерального питания. По воздуховодам с помощью компрессора закачивается воздух и, проходя по ним, подогревается до оптимальной температуры, после чего подается в емкости для энтерального питания, содержащие капельницу с роликовым зажимом и клапан для сброса избыточного давления, где происходит равномерное взбалтывание смеси. Затем гомогенная смесь подается через зонд или на дозатор, представляющий собой механический насос, подающий питательную смесь через равные промежутки времени и с постоянной скоростью.

Однако известные выше устройства не в полной мере отвечают предъявляемым к ним требованиям и имеют следующие недостатки: они не обеспечивают гомогенности питательной смеси, постоянного температурного режима, плавности ее дозирования, автоматической подготовки смеси для введения ее через зонд больному, стерильности, насыщения смеси воздухом.

Известно устройство для энтерального зондового питания [4], содержащее емкость с питанием, дозатор, зонд и таймер. Устройство снабжено двумя емкостями-контейнерами, в одной из которых установлен охлаждающий элемент, а в другой — каталитический нагре-

ватель, и системой энтерального питания, связанной с двумя перистальтическими насосами с роторами, один из которых соединен с емкостью-контейнером, а другой одним концом с дисплеем с автоматическим таймером, другим концом — с емкостью-контейнером с каталитическим нагревателем, при этом второй перистальтический насос соединен с емкостью-контейнером с каталитическим нагревателем, а другим концом — с зондом пациента.

Однако устройство не способно контролировать подачу энтерального питания. Оно лишено механизма перемешивания питательной смеси, имеет сложный в исполнении механизм нагрева и охлаждения смеси, посредством применения ротора, что также усложняет конструкцию. В основе подачи питания лежит работа таймера, что не оценивает состояние перистальтики, а только лишь время подачи в смеси в определенном объеме.

В связи с вышесказанным, целью исследования является клиническое обоснование устройства для энтерального зондового питания.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено на базе хирургического отделения Университетской клинической больницы № 1 имени С.Р. Миротворцева. Устройство для проведения энтерального зондового питания содержит емкость для энтерального питания с крышкой. Крышка оснащена тремя портами. К первому порту, внутри емкости, присоединен механизм перемешивания энтерального зондового питания, а с наружной стороны — компрессор. Ко второму порту, с наружной стороны, присоединен датчик для изменения давления в емкости и в желудочно-кишечном тракте, соединенный с блоком анализа данных и выпускным клапаном, предназначенным для контроля давления, и выполненным с механизмом открывания и закрывания. К третьему порту, внутри емкости, присоединен механизм подачи энтерального зондового питания, а с наружной стороны порта — назоинтестинальный зонд, присоединяемый к зонду пациента (рисунки 1, 2).

Устройство испытали на базе клинической больницы им. С.Р. Миротворцева СГМУ. Было госпитализировано 130 пациентов с тяжелой хирургической патологией: перитонитом, острой кишечной непроходимостью, острым панкреатитом, раком пищевода, раком желудка, раком поджелудочной железы и синдромом энтеральной недостаточности. Для проведения исследования суточный нутриционный комплекс олигомерных сухих смесей энтерального питания [5,6], вводили в двенадцатиперстную кишку или начальные отделы тонкой кишки с по-

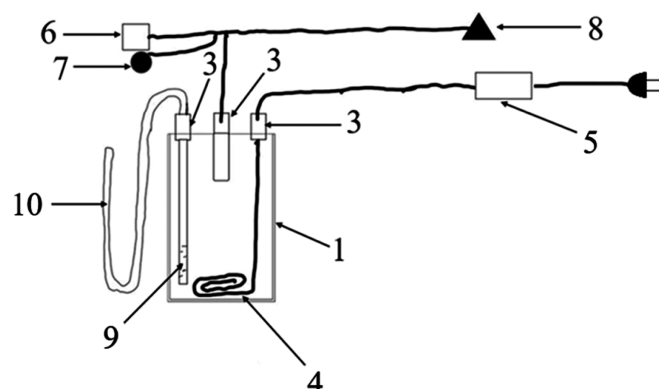


Рис. 1. Устройство для энтерального зондового питания

Примечание: цифрой 1 на рисунке обозначена — емкость; цифрой 2 — крышка емкости; цифрой 3 — порт; цифрой 4 — механизм перемешивания энтерального зондового питания; цифрой 5 — компрессор; цифрой 6 — датчик для изменения давления; цифрой 7 — блок анализа данных; цифрой 8 — выпускной клапан; цифрой 9 — механизм подачи энтерального зондового питания; цифрой 10 — назоинтестинальный зонд.

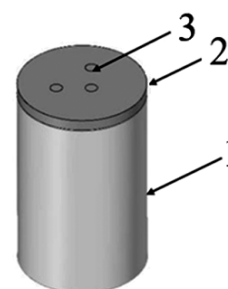


Рис. 2. Емкость для энтерального питания с крышкой

Примечание: цифрой 1 на рисунке обозначена — емкость; цифрой 2 — крышка емкости; цифрой 3 — порт

мощью зондов из пищевого силикона, установленных ретроградно (при резекциях желудка, отделов тонкого кишечника). Для этого, к концу назогастральной трубки фиксировали зонд из пищевого силикона, выводили его через нос и фиксируют к коже носовой перегородке, для исключения перемещения внутри кишечника. Дистальный конец зонда заводили за анастомоз, тем самым разгружая область анастомоза. Учитывая мягкость и за счет своей эластичности, последний может находиться в кишечнике длительное время, не боясь возникновения пролежней и острых язв, установленных назогастроэнтерально или назоинтестинально. Для исследовательской группы в послеоперационном периоде к наружному концу зонда из пищевого силикона подключали заявляемое устройство, выполненное с обратной связью, состоящее из емкости, в которой поддерживается гомогенное состояние питания, компрессора, который подает последнее (питание) в назоинтестинальный зонд, клапана, который стравливает избыточный воздух и датчика контроля для мониторингирования при возникновении

признаков неусваиваемости пищи, который уменьшает подачу питания в кишечник и отключает компрессор при сохранении признаков пареза. В то же время при разрешении последнего включает подачу питания под контролем внутрикишечного давления.

Результаты исследования

Устройство работает следующим образом. В емкость наливают питательную смесь и закрывают крышкой. Объем емкости 1 литр. К концу зонда пациента присоединяют назоинтестинальный зонд. Вилку компрессора включают в сеть. Компрессор подает воздух в механизм перемешивания энтерального зондового питания, воздух выходит в емкость и «проталкивает» питательную смесь. Механизм подачи энтерального зондового питания забирает смесь из емкости и через зонд подает пациенту в ЖКТ.

Через первый порт подается воздух внутрь емкости, посредством чего достигается перемешивание питательной смеси. Через второй порт, контролируется давление внутри системы (в емкости и в ЖКТ), излишнее давление сбрасывается через клапан. Через третий порт происходит подача питательной смеси в назоинтестинальный зонд.

Блок анализа данных выключает компрессор при превышении давления в зонде. Датчик считывает давление и передает показания на блок, в случае фиксации прибором избыточного давления (25 миллибар), прибор подает «команду» на компрессор и последний уменьшает нагрузку. При показателях давления внутри кишечника 30 миллибар блок подает команду на отключение компрессора. Также блок позволяет ввести статистику и при значениях 5–6 миллибар, дает команду на включение компрессора, тем самым возобновляя подачу питательной смеси в кишечник, т.е., блок следит за скоростью подачи питательной смеси в зависимости от показаний датчика, фиксирует и сохраняет статистику. При этом, емкость заполняют несколько раз в сутки. Устройство включают один раз, оно работает до полного опустошения емкости и позволяет измерять кишечное давление и давление подачи питания на вводе в зонд.

Заключение

Таким образом, разработанное устройство [7] позволяет снизить травматичность и обеспечить наименьшее количество последствий, связанных с техническими аспектами интубации, а также обеспечивает полный контроль подачи энтерального зондового питания. К тому же, разработанное устройство расширяет арсенал существующих устройств подобного назначения, оно компактно и просто в обращении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент FR2267802, МПК А61J15/00, А61M31/00, опубл. 14.11.1975
2. Хорошилов И.Е. Руководство по парентеральному и энтеральному питанию. СПб. Нордмед-издат. 2000; 162–163.
3. Патент RU 2254117, МПК А61J1/00, опубл. 20.06.2005. Снеговой А.В., Сельчук В.Ю., Салтанов А.И. Устройство для энтерального зондового питания.
4. Патент RU 125848, МПК А61J15/00, опубл. 20.03.2013. Идиева У.К., Кутуков В.В. Устройство для энтерального зондового питания.
5. Идрисов Р.И., Симакова И.В., Капралов С.В., Полиданов М.А., Стрижевская В.Н., Кривошеев С.И., Симакова М.А., Бучарская А.Б., Волков К.А., Пашутина В.Д., Егорова Л.В., Высоцкий Л.И., Абрамов А.М. Возможность применения энтерального зондового питания при тяжелой хирургической патологии. Пермский медицинский журнал. 2024; 41 (5): 88–102.
6. Идрисов Р.И., Симакова И.В., Капралов С.В., Полиданов М.А., Стрижевская В.Н., Бучарская А.Б. Возможность применения новых смесей для энтерального зондового питания в комплексной терапии тяжелых хирургических пациентов. Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. 2024; 12: 200–205.
7. Заявка на патент РФ на полезную модель № 2025105283 от 07.03.2025. Идрисов Р.И., Греков В.В., Капралов С.В., Полиданов М.А., Кашихин А.А., Волков К.А., Петрунькин Р.П., Симакова М.А., Симакова И.В. Устройство для энтерального зондового питания.

© Идрисов Рейзудин Имамудинович; Капралов Сергей Владимирович (sergejkapralov@yandex.ru);

Полиданов Максим Андреевич (maksim.polidanoff@yandex.ru); Кашихин Андрей Андреевич;

Петрунькин Родион Павлович; Волков Кирилл Андреевич

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОСОБЕННОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ОСТРОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ПОЧЕК ПРИ ТЯЖЕЛОЙ ТРОПИЧЕСКОЙ МАЛЯРИИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕНИН

CLINICAL CHARACTERISTICS OF ACUTE KIDNEY INJURY IN SEVERE TROPICAL MALARIA CASES IN THE REPUBLIC OF BENIN

L. Yaya
A. Martynov

Summary. Severe tropical malaria remains one of the leading causes of mortality in endemic regions. One of the most serious complications is acute kidney injury (AKI), which develops in 20–40 % of patients with severe disease. The pathogenesis is based on mechanisms including intravascular hemolysis, endothelial dysfunction, impaired microcirculation, hypovolemia and hyperactivation of the immune response. A study conducted in the Republic of Benin showed that men aged 20–40 years are most susceptible to severe malaria. The most common clinical manifestations were jaundice (30.15 %), impaired general condition (21.32 %) and hemoglobinuria (21.32 %). AKI was observed in 45 patients, 29 patients required renal replacement therapy. Mortality was 12.5 %. The mainstay of treatment was antimalarial therapy (artesunate), supportive care (infusions, antibiotics, dialysis) and symptomatic treatment. The findings highlight the need for a comprehensive approach to the diagnosis and treatment of severe malaria to reduce mortality and improve outcomes.

Keywords: Severe malaria, *Plasmodium falciparum*, acute kidney injury, intravascular hemolysis, immune response, Republic of Benin, malaria treatment.

Йайа Латифату

Аспирант, ФГАОУ ВО «Российский университет
дружбы народов имени Патриса Лумумбы»,
104225061@pfur.ru

Мартынов Алексей Юрьевич

кандидат медицинских наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Российский университет
дружбы народов имени Патриса Лумумбы»,
martynov-ayu@rudn.ru

Аннотация. Тяжелая тропическая малярия остается одной из ведущих причин смертности в эндемичных регионах. Одним из наиболее серьезных осложнений является острое повреждение почек (ОПП), которое развивается у 20–40 % пациентов с тяжелым течением заболевания. В основе патогенеза лежат механизмы, включающие внутрисудистый гемолиз, эндотелиальную дисфункцию, нарушение микроциркуляции, гиповолемию и гиперактивацию иммунного ответа. Исследование, проведенное в Республике Бенин, показало, что мужчины в возрасте 20–40 лет наиболее подвержены тяжелой форме малярии. Наиболее частыми клиническими проявлениями стали желтушность (30,15 %), нарушение общего состояния (21,32 %) и гемоглобинурия (21,32 %). ОПП наблюдалось у 45 пациентов, 29 пациентам потребовалось проведение заместительной почечной терапии. Летальность составила 12,5 %. Основой лечения являлась антималярийная терапия (артезулат), поддерживающая терапия (инфузии, антибиотики, диализ) и симптоматическое лечение. Полученные данные подчеркивают необходимость комплексного подхода к диагностике и лечению тяжелой малярии для снижения смертности и улучшения исходов.

Ключевые слова: тяжелая малярия, *Plasmodium falciparum*, острое почечное повреждение, внутрисудистый гемолиз, иммунный ответ, Республика Бенин, лечение малярии.

Введение

В 2023 году общее количество случаев малярии в мире составило 263 млн. (в 2022 году — 252 млн) и эта болезнь унесла жизни 597 тыс. человек (в 2022 году — 600 тыс.) [26]. Несмотря на небольшое снижение смертности, малярия остается одной из ведущих причин летальных исходов среди инфекционных заболеваний, особенно в эндемичных регионах. На Африканский регион приходится 95 % случаев заболевания [26, 27]. Одним из серьезных осложнений тропической малярии является острое повреждение почек (ОПП), которое может значительно ухудшить прогноз пациентов [3]. В тяжелых случаях ОПП приводит к необходимости проведения заместительной почечной терапии и увеличению риска летального исхода [13].

По данным различных исследований, частота развития ОПП при тропической малярии составляет от 1 % до 60 % в зависимости от региона, иммунного статуса пациента, наличия сопутствующих заболеваний и своевременности лечения [5].

Этиология и патогенез тяжелой тропической малярии

Малярия вызывается четырьмя основными видами рода *Plasmodium*: *Plasmodium vivax*, *P. falciparum*, *P. malariae* и *P. ovale*. Клиническая картина заболевания при всех этих инфекциях включает периодические приступы лихорадки, озноб, дрожь, потливость, боли в теле, головную боль, тошноту, общую слабость и протрацию [23]. Однако наиболее тяжелые, угрожающие жизни

осложнения, такие как церебральная малярия, тяжелая анемия, ацидоз, респираторный дистресс, желтуха, острое повреждение почек (ОПП) и острый респираторный дистресс-синдром (ОРДС), преимущественно ассоциированы с инфекцией *P. falciparum* [5].

В последние годы появились сообщения о развитии тяжелых осложнений при заражении *P. vivax*, включая острые повреждения почек. Кроме того, зарегистрированы случаи опасных для жизни осложнений малярии, вызванной *P. knowlesi*, у людей [21]. Тем не менее, поражение почек наиболее часто наблюдается при инфекциях, вызванных *P. falciparum* и *P. malariae*, причем нефропатия, связанная с *P. malariae*, преимущественно встречалась в Африке, особенно до 1980 года [18].

При тяжелом течении малярии происходит выраженное нарушение микроциркуляции. Было предложено несколько гипотез, включая механическую обструкцию эритроцитами, секвестрацию паразитов, эндотелиальную дисфункцию, окислительный стресс, иммуноопосредованную патологию клубочков в почках, потерю жидкости, изменений в почечной микроциркуляции [6]. Одним из признаков малярийной инфекции является внутрисосудистый гемолиз, в первую очередь инфицированных плазмодием эритроцитов (pRBC), что приводит к высвобождению бесклеточного гема, а также молекул как хозяина, так и паразита, которые потенциально вызывают воспалительные реакции [19]. Некоторая степень внутрисосудистого гемолиза наблюдается у всех видов паразитов, но наиболее обширный гемолиз наблюдается при заражении *P. falciparum*, как следствие более высокой плотности паразитов, обычно встречающейся в крови у этого вида паразитов [7]. Особая вирулентность *P. falciparum* также объясняется экспрессией белков паразита на поверхности pRBC, что позволяет им прикрепляться к эндотелию кровеносных сосудов посредством связывания с эндотелиальными рецепторами [16]. Секвестрированные pRBC минуют утилизацию в селезенке, способствуя высокой паразитарной нагрузке, закупоривают мелкие кровеносные сосуды, что приводит к тканевой гипоксии, и активируют сосудистые эндотелиальные клетки [19]. Активация эндотелия, вероятно, является центральным патологическим событием, приводящим к нарушению его барьерной функции, дисрегуляции кровотока и каскадов коагуляции, а также секреции провоспалительных цитокинов, что еще больше усиливает воспалительную реакцию хозяина [4].

Иммунный ответ играет ключевую роль в патогенезе тяжелой малярии, причем чрезмерная провоспалительная реакция способствует прогрессированию заболевания. Внутрисосудистый гемолиз инфицированных (pRBC) и неинфицированных эритроцитов (RBC) приводит к высвобождению молекул, действующих как молекулярные паттерны, ассоциированные с патогеном

(PAMP), и повреждением (DAMP). Эти структуры активируют рецепторы распознавания образов (PRR), включая толл-подобные (TLR) и NOD-подобные рецепторы (NLR), что приводит к запуску иммунных и воспалительных реакций [8].

PAMP активирует TLR и индуцирует продукцию провоспалительных цитокинов, фактор некроза опухоли (TNF), а также молекул клеточной адгезии (VCAM-1). Другой значимый PAMP — гемозоин, образуемый паразитом при детоксикации гема в эритроцитах. Он стимулирует выработку TNF и IL-1 β моноцитами и макрофагами, а в комплексе с нуклеиновыми кислотами *Plasmodium* активирует инфламмосомы (например, NLRP3, AIM2), усиливая воспаление. Ключевыми DAMP, выделяемыми при гемолизе, являются внеклеточный гемоглобин и гем, способствующие гиперовоспалению. Хотя PRR-активация необходима для защиты от паразита, ее чрезмерная стимуляция при малярии приводит к системному воспалению и повреждению органов [14].

Исследования на мышах, инфицированных *P. berghei* ANKA, показали инфильтрацию макрофагов в клубочках почек и усиленную экспрессию провоспалительных цитокинов (TNF, IL-6). TNF и IL-6 способствуют воспалительной реакции, активируя эндотелий и повышая его проницаемость. Активация эндотелия сопровождается экспрессией молекул клеточной адгезии (VCAM-1, ICAM-1, E-селектин), что способствует секвестрации pRBC и инфильтрации лейкоцитов в почки, усугубляя ОПП. Исследования подтверждают связь маркеров эндотелиальной активации и микрососудистой обструкции с малярийной ОПП как у детей, так и у взрослых [2].

Внутрисосудистый гемолиз при малярии способствует активации системы комплемента, усугубляя повреждение почек. Высвобождение гемоглобина и его продуктов активирует альтернативный путь комплемента, что приводит к опсонизации эритроцитов (как инфицированных, так и неинфицированных) и усилению гемолиза. В мышинных моделях ишемии/реперфузии активация этого пути коррелировала с повреждением канальцев и ухудшением функции почек, тогда как его ингибирование снижало степень поражения. Нейтрофилы, активированные провоспалительными цитокинами (например, TNF), дополнительно усиливают активацию комплемента, создавая порочный круг воспаления и повреждения почек [25].

Гиповолемия при тяжелой малярии способствует снижению клубочковой фильтрации, гипоперфузии почек и активации воспалительных процессов, что играет ключевую роль в развитии ОПП. Значительная гиповолемия является распространенным явлением при тяжелой малярии, часто приводя к гипоперфузии почек, снижению СКФ, секреции вазоактивных медиаторов и актива-

ции воспалительных процессов, все из которых могут способствовать развитию повреждения почек [9]. Гиповолемия приводит к снижению перфузии почек и активации ренин-ангиотензин-альдостероновой системы. Активация пути ангиотензина II (Ang II)/AT1 способствует воспалению и инфильтрации иммунных клеток в почечную ткань, усугубляя повреждение. Блокада этого пути приводила к значительному снижению воспалительной реакции и защите почек, что подчеркивает его роль в патогенезе малярийной ОПП [22].

Обширный внутрисосудистый гемолиз сопровождается высвобождением внеклеточного гемоглобина и гема, обладающих высокой токсичностью. Их негативное воздействие обусловлено, прежде всего, индуцированием окислительного стресса и активацией иммунного ответа через DAMP-сигналы, что усиливает воспалительную реакцию. Организм обладает механизмами очистки от этих молекул, но при массивном гемолизе, как в случае тяжелой малярии, эти системы быстро истощаются. Почки, являясь основным путем выведения гема и гемоглобина, особенно уязвимы к их повреждающему воздействию [24].

Как инфекционные, так и неинфекционные причины массивного гемолиза связаны с развитием ОПП. Повышенные уровни внеклеточного гемоглобина и маркеров перекисного окисления липидов чаще наблюдаются у пациентов с тяжелой малярией и ОПП. Клинические исследования показали, что применение ацетаминофена, ингибирующего опосредованное гемопротеинами перекисное окисление липидов, снижает риск ОПП, особенно у пациентов с выраженным гемолизом [20].

Клинические проявления ОПП при малярии

Острое повреждение почек представляет собой быстрое и значительное ухудшение функции почек и является одним из наиболее серьезных осложнений тяжелой инфекции *Plasmodium falciparum*. Данное состояние ассоциируется с высокой смертностью пациентов. В настоящее время классификация KDIGO (Kidney Disease: Improving Global Outcomes) определяет ОПП на основании следующих критериев: увеличение уровня сывороточного креатинина не менее чем на 0,3 мг/л в течение 48 часов; увеличение сывороточного креатинина как минимум в 1,5 раза от исходного значения в течение предыдущих 7 дней; снижение диуреза менее 0,5 мл/кг/ч в течение 6 часов [15].

До внедрения консенсусных критериев KDIGO распространенность ОПП при малярии была недооценена как среди взрослых, так и среди детей [17]. Однако современные исследования, использующие данную классификацию, показали, что частота развития ОПП варьирует от 20 % до 40 % среди пациентов с тяжелой

малярией, а в некоторых исследованиях сообщается о показателях, достигающих 59 % у детей [1]. Несмотря на сопоставимую частоту ОПП среди взрослых и детей с тяжелой малярией общее бремя заболевания выше среди детей, поскольку в эндемичных регионах подавляющее большинство случаев тяжелой малярии регистрируется в детской популяции.

Критически важным является тот факт, что почечное повреждение признано независимым предиктором смертности у детей с тяжелым течением малярии. Однако остается неясным, в какой степени ОПП напрямую способствует летальному исходу. Кроме того, долгосрочные клинические наблюдения показывают, что у 5 % пациентов с малярийным ОПП развивается хроническая болезнь почек, что подчеркивает значимость данного осложнения и необходимость своевременного выявления и лечения [10].

Лечение малярии в Республике Бенин

Эпидемиологическая характеристика тяжелой тропической малярии в Республике Бенин демонстрирует значительную распространенность. Из общего числа поступивших в стационар 541 пациента, тяжелая форма малярии была диагностирована в 136 случаях, что составляет 25,1 %, что свидетельствует о высокой доле осложненных форм инфекции, требующих интенсивной медицинской помощи.

Гендерное распределение показывает, что мужчины страдают тяжелой формой малярии значительно чаще, чем женщины. Среди заболевших 97 пациентов (71,3 %) были мужчинами, в то время как женщины составили 28,7 % (39 случаев). Возможно, мужчины в трудоспособном возрасте, чаще заняты в сельском хозяйстве, строительстве и других видах деятельности, предполагающих длительное пребывание на открытом воздухе.

Средний возраст пациентов с тяжелой малярией составил $36,01 \pm 15,2$ года, что говорит о преимущественном поражении лиц трудоспособного возраста. Возрастное распределение пациентов с тяжелой тропической малярией в Республике Бенин демонстрирует, что наибольшее количество случаев приходится на группы 20–30 лет (35 случаев) и 30–40 лет (36 случаев). Возможно, это связано с повышенной мобильностью, профессиональной деятельностью, а также большей вероятностью контакта с малярийными комарами в условиях активного образа жизни. В то же время, значительная доля пациентов — 24 случая — приходится на молодых людей в возрасте до 20 лет. В таблице 1 показаны факторы риска, зарегистрированные у пациентов с тяжелым течением малярии.

Наиболее распространенным фактором риска оказалась лихорадочная реакция, зарегистрированная

Таблица 1.
Факторы риска развития тяжелой малярии

Факторы риска	n	(%)
Лихорадочная реакция	51	37.5
Фитотерапия	32	23.53
НПВП	12	8.82
Хирургический анамнез	10	7.35
Алкоголь	28	20.59
Артериальная гипертензия	25	18.38
Сахарный диабет	6	4.41
ВИЧ-инфекции	2	1.47
Гемоглобинопатия	5	3.68

у 51 пациента (37,5 %). Это является предсказуемым результатом, так как продолжительная лихорадка — один из ключевых симптомов малярии и показатель высокой паразитемии. Выраженность лихорадки указывать на продолжительный системный воспалительный ответ или осложненное течение заболевания. Фитотерапия была отмечена у 32 пациентов (23,5 %), что может говорить о высокой распространенности использования народных методов лечения. Самостоятельный прием растительных препаратов затрудняет диагностику и может быть причиной отсрочки лечения противомалярийными препаратами.

Прием нестероидных противовоспалительных препаратов был зафиксирован у 12 пациентов (8,8 %). Данный фактор отмечен в связи с возможными побочными эффектами НПВП, нефротоксичностью и гастроинтестинальными осложнениями, которые могут усугубить течение инфекции. Хирургический анамнез отмечался у 10 пациентов (7,3 %), что свидетельствует о наличии сопутствующих заболеваний у пациентов. Алкоголь как фактор риска развития тяжелой малярии был зарегистрирован у 28 пациентов (20,6 %). Употребление алкоголя нарушает нормальные метаболические процессы, что повышает риск более тяжелого течения инфекционного заболевания. Кроме того, у лиц с зарегистрированной артериальной гипертензией и сахарным диабетом была выше вероятность развития тяжелого течения заболевания. ВИЧ-инфекция была диагностирована у 2 пациентов (1,5 %), что указывает на редкое, но значимое сочетание малярии и иммунодефицитного состояния.

В целом, анализ факторов риска показывает, что наиболее значимыми предрасполагающими состояниями к тяжелой форме малярии являются лихорадочная реакция, фитотерапия, употребление алкоголя и наличие сопутствующих заболеваний, таких как артериальная гипертензия и сахарный диабет.

В таблице 2 представлены клинические признаки тяжелой малярии, зарегистрированные у нашего пула пациентов.

Таблица 2.
Клинические признаки тяжелой малярии

Клинические признаки тяжелой малярии	N	%
Нарушение общего состояния	29	21.32
Желтушность	41	30.15
Отек легких	5	3.68
Прострации	5	3.68
Гемоглобинурия	29	21.32
Судороги	25	18.38
Метаболический ацидоз	2	1.47
Всего	136	100.00

Наиболее часто встречаемым клиническим признаком тяжелой малярии является желтушность, зарегистрированная практически у трети пациентов. Симптом, как правило, обусловлен массивным гемолизом эритроцитов, характерным для тяжелых форм малярии, и возможным поражением печени. Нарушение общего состояния, проявляющееся в выраженной слабости, астении и общей интоксикации, отмечено у более чем 21 % больных. С такой же частотой выявлена гемоглобинурия, что свидетельствует о выраженном внутрисосудистом гемолизе, который может являться причиной острой почечной недостаточности.

Достаточно часто среди неврологических проявлений отмечались судороги, зафиксированные у 18,4 % пациентов; у 3,68 % больных регистрировали прострацию. Оба симптома могут быть связаны с церебральной формой малярии, тяжелой гипоксией или метаболическими нарушениями. Отек легких в результате острого респираторного дистресс-синдрома или сердечной недостаточностью зарегистрирован у 5 пациентов.

Таким образом, наиболее распространенными клиническими проявлениями тяжелой малярии являются желтушность, нарушения общего состояния и гемоглобинурия, что свидетельствует о выраженном гемолизе и токсическом поражении организма. Неврологические симптомы, такие как судороги и прострация, встречаются реже, но указывают на вовлечение центральной нервной системы. Эти данные подчеркивают важность ранней диагностики и своевременной интенсивной терапии тяжелой малярии для предотвращения летальных исходов. В таблице 3 показаны отдельные лабораторные показатели группы пациентов с тяжелым течением малярии.

Таблица 3.

Лабораторные показатели

Лабораторные показатели	N	%
Повышение креатинина	62	45.59
Гемоглобин < 50 г/л	17	12.50
Повышение АСАТ	104	76.47
Повышение АлАТ	8	5.88
Всего	136	100

Наиболее частым лабораторным отклонением является повышение уровня аспартатаминотрансферазы (АСАТ), выявленное у 76,47 % пациентов. Данный показатель свидетельствует о выраженном цитолизе клеток печени, что может быть обусловлено гипоксическим повреждением гепатоцитов, массивным гемолизом или вовлечением других тканей в патологический процесс. В отличие от АСАТ, повышение аланинаминотрансферазы (АлАТ) встречается значительно реже (5,88 %), что свидетельствует о преимущественном поражении печени не гепатоцеллюлярного, а гемолитического характера.

Повышение уровня креатинина, регистрировалось практически у половины пациентов, что является подтверждением частого развития ОПП при тяжелой малярии.

Тяжелая анемия (гемоглобин <50 г/л) зарегистрирована у 12,50 % пациентов, что указывает на выраженный гемолиз эритроцитов. Анемия является одним из значимых осложнений тяжелой малярии и требует своевременной коррекции.

В таблице 4 показаны результаты анализа по выявлению связей между клиническими признаками и лабораторными показателями.

Для выявления значимости различий между пациентами с различными клиническими проявлениями тяжелой малярии по лабораторным показателям проведен статистический анализ. В качестве статистического ме-

тода использовался t-тест для независимых выборок, результаты которого представлены в таблице 5.

Таблица 5.

Результаты статистического анализа

Клинический признак	Биологический показатель	t-статистика	P
Нарушение общего состояния	Гемоглобин	1.335558	0.187316
Желтушность	Гемоглобин	-0.31171	0.756462
Судороги	Гемоглобин	1.347902	0.183039
Нарушение общего состояния	Тромбоциты	-1.31572	0.193475
Желтушность	Тромбоциты	-2.70634	0.010333
Судороги	Тромбоциты	0.080909	0.935819
Нарушение общего состояния	Лейкоциты	2.097007	0.040538
Желтушность	Лейкоциты	1.766708	0.082687
Судороги	Лейкоциты	1.942846	0.057938

По результатам статистического анализа выявлено, что желтушность статистически значимо связана с более низким уровнем тромбоцитов ($p = 0.010$). Это может свидетельствовать о роли тромбоцитопении в патогенезе данного состояния, вследствие дисфункции печени, усиленного гемолиза и нарушений свертываемости крови. В то же время различия в уровнях гемоглобина и тромбоцитов у пациентов с нарушением общего состояния и судорогами не достигли статистической значимости.

Таким образом, полученные результаты подчеркивают необходимость дальнейшего изучения связи между клиническими проявлениями тяжелой малярии и биохимическими показателями крови.

Лечение тяжелой малярии проводилось в соответствии с международными рекомендациями, включающими обязательное применение инъекционного артемизината (100 % пациентов) как основного противома-

Таблица 4.

Связь клинических признаков и лабораторных показателей

Показатель	Гемоглобин		Тромбоциты		Лейкоциты	
	Да	Нет	Да	Нет	Да	Нет
Нарушение общего состояния	10,85±2,29	9,92±3,05	100531,91±49230,77	117928,57±53114,05	12054,04±4879,87	9640,71±3990,01
Желтушность	10,51±2,94	1072±2,23	81408,09±24183,28	117564,10±69062,53	12430,91±4192,56	10334,10±4967,95
Судороги	11,38±2,18	10,56±2,52	105333,33±35742,24	104436,36±49087,09	13535,00±7236,86	10532,73±4389,30

лярийного препарата. Дополнительно использовались комбинированные схемы с пероральными препаратами на основе артемизинина: артемизинин + люмефантрин (86 %), диgidроартемизинин + пиперахин (22 %), артемизинин + амодиахин (28 %).

Помимо специфической антималярийной терапии, пациентам проводилось симптоматическое и поддерживающее лечение. Для коррекции нарушений водно-электролитного баланса и детоксикации применялся раствор натрия хлорида (93 %), Рингера-лактата (18 %), глюкозы (30 %). У пациентов с тяжелой анемией выполнялось переливание крови (51 %), а при наличии судорожного синдрома назначались противосудорожные препараты, преимущественно диазепам (14 %). Учитывая риск присоединения бактериальной инфекции, в 52 % случаев использовалась антибиотикотерапия. В особо тяжелых случаях с развитием острой почечной недостаточности потребовался диализ (29 %), а для купирования воспалительной реакции применялись кортикостероиды (47 %).

Результаты лечения показали, что из 136 пациентов выздоровели 119 человек (87,5 %), скончались 17 пациентов (12,5 %).

В таблице 6 приведены отдельные лабораторные показатели группы выживших и умерших пациентов.

Таблица 6.

Лабораторные показатели в группах выживших и умерших пациентов

Показатели	Выжившие	Летальный исход
Тромбоцитопения (мм ³)	68206,60	47222,12
Гемоглобины $\leq 11,9$ (г/дл) ≥ 12	9,69 12,9	8,17 12,06
Лейкоциты (мм ³)	15089,3	13402,7

Судя по таблице, можно сказать, что выраженная тромбоцитопения была ассоциирована с повышенным риском летального исхода, кроме того, анемия также может быть значимым фактором риска, поскольку средний уровень гемоглобина у выздоровевших пациентов составил 9,69 г/дл, тогда как в группе с летальным исходом — 8,17 г/дл.

Тем не менее, статистически значимых различий между лабораторными показателями у выздоровевших и умерших пациентов не было выявлено ($p > 0.05$). Это может свидетельствовать как о высокой вариабельности данных, так и о том, что другие факторы также оказывают решающее влияние на исход заболевания. Несмотря на отсутствие достоверности, с клинической точки зрения, более низкие уровни тромбоцитов и гемоглобина в группе умерших пациентов могут показывать их возможную роль как неблагоприятных прогностических

факторов, хотя для окончательных выводов требуется более крупная выборка.

Заключение

Тяжелая тропическая малярия остается одной из наиболее серьезных инфекционных патологий, особенно в эндемичных регионах. В 2023 году количество случаев малярии в мире достигло 263 млн, с высоким уровнем смертности, особенно среди пациентов с осложненным течением заболевания. Среди наиболее значимых осложнений — острое повреждение почек (ОПП), которое может развиваться у 20–40 % пациентов.

Патогенез тяжелой малярии связан с комплексными механизмами, включая внутрисосудистый гемолиз, эндотелиальную дисфункцию, нарушение микроциркуляции, активацию иммунного ответа и провоспалительных цитокинов. Внутрисосудистый гемолиз приводит к высвобождению гема и активации системы комплемента, что усугубляет воспаление и повреждение почек. Гиповолемия и активация ренин-ангиотензин-альдостероновой системы дополнительно способствуют снижению почечной перфузии и развитию ОПП.

Анализ клинических проявлений тяжелой малярии в Республике Бенин показал, что заболевание чаще встречается у мужчин (71,3 %) и в трудоспособном возрасте (20–40 лет). Наиболее частыми клиническими симптомами стали желтушность (30,15 %), нарушение общего состояния (21,32 %) и гемоглобинурия (21,32 %). Практически у половины пациентов в том или ином виде наблюдалась острая почечная недостаточность (45,59 %), у 12,5 % регистрировалась анемия. В 29 % случаев возникновение ОПП потребовало проведения заместительной почечной терапии.

Лечение тяжелой малярии в Республике Бенин соответствовало международным рекомендациям. В ряде случаев потребовалось переливание крови (51 %), антибиотикотерапия (52 %) и проведение диализа (29 %). Несмотря на комплексный подход, летальность составила 12,5 %, что подчеркивает необходимость дальнейшего совершенствования методов диагностики и лечения.

Таким образом, тяжелая малярия представляет собой мультифакторное заболевание с высоким риском летального исхода, особенно при развитии ОПП. Результаты исследования подчеркивают необходимость комплексного подхода к диагностике и лечению, включая раннее выявление осложнений, мониторинг биомаркеров, своевременное начало антималярийной терапии и поддержку жизненно важных функций. Улучшение стратегии лечения тяжелой малярии, в том числе оптимизация гидратационной и антицитокиновой терапии, может способствовать снижению смертности и улучшению прогноза пациентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Afolayan FM, Adedoyin OT, Abdulkadir MB, Ibrahim OR, Biliaminu SA, Mokuolu OA, et al. Acute Kidney Injuries in Children With Severe Malaria: A Comparative Study of Diagnostic Criteria Based on Serum Cystatin C and Creatinine Levels. *Sultan Qaboos Univ Med J* (2020) 20(4):e312–7. 10.18295/squmj.2020.20.04.006
2. Barber BE, Grigg MJ, Piera KA, William T, Cooper DJ, Plewes K, et al. Intravascular Haemolysis in Severe Plasmodium Knowlesi Malaria: Association With Endothelial Activation, Microvascular Dysfunction, and Acute Kidney Injury. *Emerg Microbes Infect* (2018) 7(1):106. 10.1038/s41426-018-0105-2
3. Brown DD, Solomon S, Lerner D, Del Rio M. Malaria and acute kidney injury. *Pediatr Nephrol*. 2020 Apr;35(4):603–608. doi: 10.1007/s00467-018-4191-0. Epub 2019 Jan 31. PMID: 30706124.
4. Coban C, Lee MSJ, Ishii KJ. Tissue-Specific Immunopathology During Malaria Infection. *Nat Rev Immunol* (2018) 18(4):266–78. 10.1038/nri.2017.138
5. Das BS. Renal failure in malaria. *J Vector Borne Dis*. 2008 Jun;45(2):83–97. PMID: 18592837.
6. Eiam-Ong S, Sitprija V. Falciparum malaria and the kidney: a model of inflammation. *Am J Kidney Dis*. 1998 Sep;32(3):361–75. doi: 10.1053/ajkd.1998.v32.pm9740151. PMID: 9740151.
7. Geleta G, Ketema T. Severe Malaria Associated With Plasmodium Falciparum and P. Vivax Among Children in Pawe Hospital, Northwest Ethiopia. *Malar Res Treat* (2016) 2016:1240962. 10.1155/2016/1240962
8. Gowda DC, Wu X. Parasite Recognition and Signaling Mechanisms in Innate Immune Responses to Malaria. *Front Immunol* (2018) 9:3006. 10.3389/fimmu.2018.03006
9. Hanson J, Anstey NM, Bihari D, White NJ, Day NP, Dondorp AM. The Fluid Management of Adults With Severe Malaria. *Crit Care* (2014) 18(6):642. 10.1186/s13054-014-0642-6
10. Kanodia KV, Shah PR, Vanikar AV, Kasat P, Gumber M, Trivedi HL. Malaria Induced Acute Renal Failure: A Single Center Experience. *Saudi J Kidney Dis Transpl* (2010) 21(6):1088–91.
11. Katsoulis O, Georgiadou A, Cunningham AJ. Immunopathology of Acute Kidney Injury in Severe Malaria. *Front Immunol*. 2021 Apr 23;12:651739. doi: 10.3389/fimmu.2021.651739. PMID: 33968051; PMCID: PMC8102819.
12. Kesteman T, Randrianarivelosoa M, Rogier C. The protective effectiveness of control interventions for malaria prevention: a systematic review of the literature. *F1000Res*. 2017 Nov 1;6:1932. doi: 10.12688/f1000research.12952.1. PMID: 29259767; PMCID: PMC5721947.
13. Koopmans LC, van Wolfswinkel ME, Hesselink DA, Hoorn EJ, Koelewijn R, van Hellemond JJ, van Genderen PJ. Acute kidney injury in imported Plasmodium falciparum malaria. *Malar J*. 2015 Dec 24;14:523. doi: 10.1186/s12936-015-1057-9. PMID: 26702815; PMCID: PMC4690233.
14. Krishnegowda G, Hajjar AM, Zhu J, Douglass EJ, Uematsu S, Akira S, et al. Induction of Proinflammatory Responses in Macrophages by the Glycosylphosphatidylinositols of Plasmodium Falciparum: Cell Signaling Receptors, Glycosylphosphatidylinositol (GPI) Structural Requirement, and Regulation of GPI Activity. *J Biol Chem* (2005) 280(9):8606–16. 10.1074/jbc.M413541200
15. Makris K, Spanou L. Acute Kidney Injury: Definition, Pathophysiology and Clinical Phenotypes. *Clin Biochem Rev* (2016) 37(2):85–98
16. Moxon CA, Gibbins MP, McGuinness D, Milner DA, Jr, Marti M. New Insights Into Malaria Pathogenesis. *Annu Rev Pathol* (2020) 15:315–43. 10.1146/annurev-pathmechdis-012419-032640
17. Oshomah-Bello EO, Esezobor CI, Solarin AU, Njokanma FO. Acute Kidney Injury in Children With Severe Malaria Is Common and Associated With Adverse Hospital Outcomes. *J Trop Pediatr* (2020) 66(2):218–25. 10.1093/tropej/fmz057
18. Ozen M, Gungor S, Atambay M, Daldal N. Cerebral malaria owing to Plasmodium vivax: case report. *Ann Trop Paediatr*. 2006 Jun;26(2):141–4. doi: 10.1179/146532806X107494. PMID: 16709334.
19. Phillips MA, Burrows JN, Manyando C, van Huijsdijnen RH, Van Voorhis WC, Wells TNC. Malaria. *Nat Rev Dis Primers* (2017) 3:17050. 10.1038/nrdp.2017.50z
20. Plewes K, Kingston HWF, Ghose A, Wattanakul T, Hassan MMU, Haider MS, et al. Acetaminophen as a Renoprotective Adjunctive Treatment in Patients With Severe and Moderately Severe Falciparum Malaria: A Randomized, Controlled, Open-Label Trial. *Clin Infect Dis* (2018) 67(7):991–9. 10.1093/cid/ciy213
21. Sharma R, Sharma H, Jones S, Borghini-Fuhrer I, Domingo GJ, Gibson RA, Rolfe K, Tan L, Fița IG, Chen C, Bird P, Pingle A, Duparc S. Optimal balance of benefit versus risk for tafenoquine in the treatment of Plasmodium vivax malaria. *Malar J*. 2024 May 13;23(1):145. doi: 10.1186/s12936-024-04924-z. PMID: 38741094; PMCID: PMC11092214.
22. Silva LS, Peruchetti DB, Silva-Aguiar RP, Abreu TP, Dal-Cheri BKA, Takiya CM, et al. The Angiotensin II/AT1 Receptor Pathway Mediates Malaria-Induced Acute Kidney Injury. *PloS One* (2018) 13(9):e0203836. 10.1371/journal.pone.0203836
23. Sluydts V, Heng S, Coosemans M, Van Roey K, Gryseels C, Canier L, Kim S, Khim N, Siv S, Mean V, Uk S, Grietens KP, Tho S, Menard D, Durnez L. Spatial clustering and risk factors of malaria infections in Ratanakiri Province, Cambodia. *Malar J*. 2014 Sep 30;13:387. doi: 10.1186/1475-2875-13-387. PMID: 25269827; PMCID: PMC4190307.
24. Van Avondt K, Nur E, Zeerleder S. Mechanisms of Haemolysis-Induced Kidney Injury. *Nat Rev Nephrol* (2019) 15(11):671–92. 10.1038/s41581-019-0181-0
25. Wang H, Wang C, Zhao MH, Chen M. Neutrophil Extracellular Traps can Activate Alternative Complement Pathways. *Clin Exp Immunol* (2015) 181(3):518–27. 10.1111/cei.12654
26. World malaria report 2024: addressing inequity in the global malaria response. ISBN 978-92-4-010445-7 (print version). World Health Organization 2024.
27. Морозов Н.А. Тропическая малярия: ошибки в диагностике, сложности в лечении / Н.А. Морозов, М.Д. Орлов, Т.О. Мазурина, М.В. Редозубов // Медицинская наука и образование Урала. — 2024. — Т. 25, № 4(120). — С. 118–123. — DOI 10.36361/18148999_2024_25_4_118. — EDN MAFZBJ.

ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ ПЕРИТОНИТА ОТ АНТИЧНОСТИ ДО НАШИХ ДНЕЙ

HISTORY OF THE STUDY OF PERITONITIS FROM ANTIQUITY TO THE PRESENT DAY

**S. Kapralov
V. Klimashevich
A. Danilov
M. Polidanov
K. Volkov
V. Maslyakov**

Summary. Any injury or inflammation in the abdominal cavity causes an inflammatory response of the peritoneum, but the understanding and treatment of peritonitis has improved greatly due to advances in anatomy, microbiology and surgery. Yet, there is still much that is unclear: how best to operate, what role anaerobic bacteria play, and how the body's immune response can be managed. New research in these areas could revolutionize the treatment of peritonitis and reduce peritonitis-related mortality. The aim of this study is therefore to trace the evolution of the understanding and treatment of peritonitis from ancient to modern times.

Keywords: peritonitis, antiquity, modern methods of study, history of the study of peritonitis.

Капралов Сергей Владимирович

д.м.н., доцент, Саратовский государственный
медицинский университет им. В.И. Разумовского
sergejkapralov@yandex.ru

Климашевич Владимир Юрьевич

к.м.н., доцент, Саратовский государственный
медицинский университет им. В.И. Разумовского
v.klimashevitch@yandex.ru

Данилов Андрей Дмитриевич

Ассистент, Саратовский государственный
медицинский университет им. В.И. Разумовского
surgery1994@mail.ru

Полиданов Максим Андреевич

специалист научно-исследовательского отдела,
ассистент, Университет «Реавиз», г. Санкт-Петербург
maksim.polidanoff@yandex.ru

Волков Кирилл Андреевич

Лаборант, Саратовский национальный
исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского;
Саратовский государственный медицинский
университет им. В.И. Разумовского
KvoLee@yandex.ru

Масляков Владимир Владимирович

д.м.н., профессор, Саратовский государственный
медицинский университет им. В.И. Разумовского

Аннотация. Любое повреждение или воспаление в брюшной полости вызывает воспалительную реакцию брюшины, однако, понимание и лечение перитонита значительно улучшились благодаря достижениям в анатомии, микробиологии и хирургии. Но, тем не менее, ещё много неясного: как лучше оперировать, какую роль играют анаэробные бактерии, и как можно управлять иммунным ответом организма. Новые исследования в этих областях могут революционизировать лечение перитонита и снизить смертность от него. В связи с этим, цель данного исследования: проследить эволюцию понимания и лечения перитонита с древних времен до современности.

Ключевые слова: перитонит, античность, современные методы изучения, история изучения перитонита.

Введение

Брюшина представляет собой тонкую серозную оболочку, которая выстилает внутреннюю поверхность брюшной полости. Она обволакивает большинство органов этой области у человека и состоит из мезотелиального слоя, под которым находится тонкая прослойка соединительной ткани. Анатомия брюшины отличается сложностью и включает два основных листка: пари-

тальный и висцеральный. Эта структура обеспечивает поддержку органов брюшной полости, а также служит путем для прохождения кровеносных и лимфатических сосудов, а также нервных волокон.

Площадь брюшины составляет примерно 20 000 квадратных сантиметров. Она делится на два листка: париетальный, который прилегает к стенкам брюшной полости и таза, и висцеральный, окутывающий внутренние

органы. В зависимости от расположения относительно брюшины органы классифицируются как интраперитонеальные, если оболочка окружает их со всех четырех сторон (например, тонкая кишка), мезоперитонеальные, когда орган покрыт с трех сторон (как в случае с печенью), и экстраперитонеальные, если орган находится за пределами брюшины (например, почки или поджелудочная железа).

Как известно, брюшина непременно отвечает воспалением на любой патологический процесс, индуцированный инфекционно-воспалительной или травматической деструкцией органов живота и таза.

В связи с этим, целью исследования стало исследование истории изучения перитонита от античности до наших дней.

Материалы и методы

Изучены результаты научных исследований, которые были посвящены исследованию истории изучения перитонита от античности до наших дней. Для анализа использовались различные базы данных, такие как Scopus, Web of Science, MedLine, Science Direct, PubMed и eLIBRARY.ru. Поиск осуществлялся, по ключевым словам, связанным с перитонитом, включающими историю его изучения от античности до наших дней. В итоге было отобрано 31 статья на английском и русском языках, а первая публикация посвященной данной проблеме уходит в 1926 год. Методы исследования включали аналитический анализ и обобщение данных.

Результаты

Античность и Средневековье. Изучение перитонита и его осложнений имеет долгую историю, которая тесно связана с развитием хирургии, микробиологии и реаниматологии. Первые упоминания о перитоните как о медицинском состоянии можно найти в работах Гиппократов, который описывал признаки «воспаления брюшины» и отмечал их связь с плохим исходом. Тем не менее до XIX века подход к лечению перитонита оставался преимущественно симптоматическим, а смертность от этого заболевания достигала 90 %.

В античной медицине перитонит не рассматривался как самостоятельная патология. В те дни существовало явное различие между практическими умениями хирургов и их знаниями о биологических основах заболеваний. Например, трепанация проводилась с большим мастерством, но опиралась на неверные теоретические представления. В Древнем Египте, Месопотамии и Индии хирургические вмешательства в брюшную полость сводились лишь к зашиванию кишечных ран [1].

Гиппократ впервые дал клиническое описание перитонита: «У больного заостренный нос, впалые виски, тусклые глаза, кожа лоснится. Он избегает движений, дышит поверхностно. Живот тверд, отсутствуют перистальтические шумы, пульс частый и слабый. Если в правом подреберье прощупывается твердая болезненная масса, это плохой знак». Несмотря на то, что это описание удивительно точно соответствует современным представлениям о перитоните и синдроме системного воспалительного ответа (SIRS), Гиппократ применял его исключительно для предсказания летального исхода, а не для разработки лечения: «Если конечности холодные, а живот твердый и сухой, это предсказывает скорую смерть».

Медицина Средневековья опиралась на гуморальную теорию, разработанную Гиппократом и развитую Галеном во II веке нашей эры. Гален систематизировал медицинские знания своего времени, и его работы на протяжении многих веков оставались фундаментом медицинской науки. Главным ограничением этой теории было отсутствие понимания патологии отдельных органов, что тормозило развитие хирургических методов лечения заболеваний желудочно-кишечного тракта вплоть до периода Французской революции.

Ни византийская, ни арабская, ни европейская медицина Средневековья не смогли существенно продвинуть изучение брюшной полости. Хирурги того времени также придерживались гуморальной концепции заболеваний. Например, Амбруаз Паре, выдающийся французский хирург и один из пионеров военно-полевой хирургии, в своих трудах ссылаясь на Гиппократа 300 раз, а на Галена — 553 раза, что подчеркивает влияние этих идей на его практику [2].

XVIII–XIX века: зарождение научного подхода. В XVIII веке систематического подхода к абдоминальной хирургии и терапии перитонита еще не сформировалось, однако начали появляться отдельные сообщения о хирургических вмешательствах в брюшную полость. Среди них стоит отметить гастротомию для удаления инородных тел и резекцию кишечника при гангренозных поражениях. Чаще всего пациентам выполняли энтеростомию, но в 1727 году Рамдор впервые применил кишечный анастомоз с использованием техники инвагинации. Спустя два десятилетия, в 1747 году, Дюверже предложил использовать трахею животного как стент для последующего ушивания стенки кишечника. В 1743 году Жан Луи Пети провел дренирование эмпиемы желчного пузыря через подреберный экстраперитонеальный доступ, а также были зафиксированы многочисленные попытки дренировать абсцессы в брюшной полости. В 1776 году Герлейн осуществил экспериментальное промывание брюшной полости у собак с искусственно спровоцированным желчным перитонитом [3].

Эмпирическая хирургия XVIII века заложила основу для первой успешной плановой лапаротомии, выполненной Эфраимом Макдауэллом, учеником Джона Ханта, в 1809 году. Он удалил кисту яичника, что стало важным событием в развитии хирургии [4]. Прогресс того времени не был случайным — он опирался на ключевые достижения фундаментальной науки, изменившие клиническую медицину.

Первым шагом стало развитие экспериментальной физиологии и медицины благодаря работам Франсуа Маженди и Клода Бернара. Они внедрили принципы, заимствованные из физики и химии, которые в конце XVIII — начале XIX века значительно опережали медицинские знания. Клод Бернар чётко выразил эту мысль: «Научная медицина основана на совокупности данных, полученных в ходе экспериментов» [5].

Второй важный вклад внёс Рудольф Вирхов, разработавший клеточную теорию. Он опроверг идею о том, что клетки возникают из аморфной субстанции, доказав, что новая клетка может появиться только из уже существующей. Эта теория стала первой универсальной концепцией болезней со времён Гиппократов и дала начало современной патологии органов [6].

Третьим прорывом стало появление микробной теории инфекционных заболеваний, связанное с именами Луи Пастера и Роберта Коха. В 1863 году Пастер в статье «Исследования по гниению» описал процесс «ферментации», вызываемый микроорганизмами [7]. Позже Кох доказал, что многие болезни провоцируются микробами, а патологические изменения при инфекциях обусловлены токсинами, которые те выделяют. Эти выводы он изложил в работе «Об этиологии инфекционных ран» 1878 года [8].

Игнац Земмельвейс и Джозеф Листер предугадали значение микробной теории для хирургии. В 1861 году Земмельвейс в монографии «Этиология, понятие и профилактика родильной горячки» обосновал принципы асептики [9]. В 1867 году Листер опубликовал работу «О антисептическом принципе в хирургии» [10]. Хотя их идеи изначально не получили признания, после распространения трудов Пастера антисептика и асептика значительно снизили частоту инфекционных осложнений.

Четвёртым достижением стало развитие систематического физикального обследования и установление связи между клиническими проявлениями и патологическими изменениями. Этот подход зародился в Парижской клинической школе в первой половине XIX века. Изначально хирурги подчёркивали важность такой корреляции, но вскоре её переняли и терапевты. Тогда же в медицину начали внедрять числовые и статистические методы [11].

Пятым значимым шагом стало введение общей анестезии: эфир применили Уэллс и Мортон в 1846 году, а хлороформ — Симпсон в 1847 году [12]. Анестезия сделала операции более гуманными и создала условия для проведения сложных и длительных вмешательств в брюшной полости.

Одновременно с развитием клинической абдоминальной хирургии начались экспериментальные исследования физиологии и патофизиологии брюшной полости. В 1863 году Фридрих фон Реклингхаузен впервые исследовал процессы переноса растворённых веществ и частиц через брюшинную мембрану [13]. В 1876 году Вегенер представил Немецкому хирургическому обществу результаты своих экспериментов. Он установил, что площадь брюшины примерно соответствует площади поверхности тела, показал, что длительное вскрытие брюшной полости вызывает гипотермию, которую он считал причиной многих необъяснимых смертельных исходов, а также описал механизмы переноса растворённых веществ через брюшину и поглощения частиц через диафрагмальную часть брюшины. Кроме того, он обнаружил приток фагоцитирующих клеток, хотя их роль ещё не была ясна, и доказал, что брюшина может справляться с большим количеством бактерий без развития воспаления [14]. Позже, в 1897 году, Дарем подробно изучил процессы устранения бактерий из брюшной полости и клеточную реакцию на их присутствие [15].

В последующие годы понимание процессов, происходящих в брюшной полости при перитоните, значительно углубилось. К началу XX века исследователи подробно изучили анатомическое деление пространств брюшной полости и их значение в распространении инфекции, а также гистологические особенности строения брюшины [16].

Интересно, что строгое соблюдение постулатов Коха мешало осознанию перитонита как полимикробного процесса. Лишь в 1893 году Вейон и Зубер впервые показали, что развитие перитонита связано с несколькими видами микроорганизмов, причём анаэробные бактерии играют в этом центральную роль. Они также выявили взаимодействие между различными группами микробов [17].

Параллельно возникла идея, что системные проявления инфекции при перитоните вызывает не сама кишечная палочка (*E. coli*), а продуцируемый ею токсин [18–19]. В 1907 году Павловский описал явление транслокации бактерий из кишечника в мезентериальные лимфатические узлы, что стало важным шагом в понимании патогенеза [20].

XX век: современные подходы. Впервые состав бактерий, вызывающих перитонит, был точно определён

Вайнбергом в 1922 году [21]. Его выводы многократно подтверждались последующими исследованиями, и с тех пор принципиальных изменений в этих данных не произошло. В 1932 году Мелени с помощью экспериментов установил, что при перитоните наблюдается синергизм между *E. coli*, *Clostridium welchii* и *Streptococcus viridans*. К этому моменту были окончательно определены основные анатомические, гистологические, микробиологические, патофизиологические и иммунологические характеристики внутрибрюшных инфекций [22].

В конце XIX века началось выполнение операций, направленных на ликвидацию очагов инфекции. В 1880 году Микулич-Радецкий успешно провёл операцию пациенту с перфорацией язвы желудка, а через четыре года вывел наружу повреждённую сигмовидную кишку. В 1881 году впервые была выполнена холецистэктомия при перфоративном холецистите, а в 1885 году зашита брюшнотифозная язва с перфорацией.

Всё больше известных хирургов того времени, включая Микулича, поддерживали идею оперативного лечения перитонита. Тем не менее единого подхода к тому, считать ли перитонит безусловным показанием к операции, не существовало. Примерно в 1890 году во Франции и Германии была предложена классификация перитонита для уточнения показаний к хирургическому вмешательству, однако она не получила широкого одобрения.

Развитие хирургии аппендицита ярко иллюстрирует трудности, с которыми сталкивались сторонники ранних операций. Первое описание симптомов аппендицита сделал Франк в 1792 году. В первой половине XIX века Дюпюитрен связал подвздошные абсцессы с кишечником, но выступал против оперативного вмешательства на ранних стадиях [23]. Только в 1889 году МакБерни разработал стандартную технику операции и начал активно продвигать её раннее применение. Николай Маркианович Волкович разработал доступ при аппендэктомии в 1898 году. Впоследствии хирургическое лечение аппендицита стало общепринятым стандартом.

Для других видов перитонита вопрос о целесообразности операций оставался спорным. Лишь в 1911 году сформировалось общее мнение, что перфорация полых органов, желчного пузыря, а также абсцессы печени и селезёнки требуют хирургического вмешательства. При этом обсуждались и дополнительные аспекты терапии: удаление фибринозных отложений, методы устранения экссудата (промывание или высушивание салфетками) и необходимость установки дренажа.

В XX веке некоторые хирурги предлагали не закрывать брюшную полость полностью или оставлять её частично открытой у пациентов с перитонитом [24]. Такой подход обосновывался ускоренным восстановлением

перистальтики, более эффективным дренажом и упрощённым доступом для повторных операций при необходимости.

Несмотря на значительные достижения, смертность при перитоните, не связанном с аппендицитом, оставалась выше 50 %. Однако внедрение раннего оперативного вмешательства и следование определённым терапевтическим принципам привело к улучшению выживаемости пациентов [25]. В 1926 году Киршнер обобщил ключевые принципы лечения перитонита, которые сохраняют свою актуальность и в наши дни:

1. При остром диффузном перитоните операция проводится незамедлительно, если отсутствуют абсолютные противопоказания;
2. Хирургическое вмешательство и анестезия должны быть максимально щадящими для пациента;
3. Разрез выполняется непосредственно над источником инфекции; при неизвестном очаге предпочтительна срединная лапаротомия;
4. Главная задача операции — ликвидация источника инфекции наиболее простым и эффективным способом;
5. Экссудат и некротизированные ткани удаляются путём промывания физиологическим раствором; использование медикаментов в брюшной полости не рекомендовано;
6. Механическое освобождение кишечника и создание первичной стомы следует избегать;
7. Дренажирование свободной брюшной полости не проводится; дренажи устанавливаются только при недостаточной уверенности в контроле очага инфекции [26].

Применение этих правил позволило снизить смертность от перфоративного аппендицита с 83 % до 21 %, от перфорации желудка и двенадцатиперстной кишки — с 100 % до 24 %, а при перитоните, вызванном поражением тонкой или толстой кишки, — с 100 % до 50 % [27].

Современные подходы и будущие направления. В последующие десятилетия основные хирургические подходы к лечению перитонита оставались неизменными, а заметного снижения смертности не происходило. Появление антибиотиков вызвало ожидания кардинального улучшения прогноза, но эти надежды не оправдались. Более того, излишняя вера в эффективность антибиотикотерапии снизила интерес к дальнейшему изучению перитонита, так как её считали универсальным решением. В результате на первых порах не уделялось внимания разработке целенаправленной антибактериальной терапии, несмотря на уже известные данные о бактериологии заболевания. Ситуация начала меняться лишь в 1960-х годах с развитием современной интенсивной терапии, что улучшило исходы при внутрибрюшных инфекциях.

Возобновление интереса к перитониту произошло в конце 1960-х — начале 1970-х годов, что способствовало значительному прогрессу. Были подтверждены и дополнены выводы Вайнберга и Мелени о синергизме бактерий. Хотя роль анаэробных микроорганизмов остаётся недостаточно изученной, детально исследовалось воздействие эндотоксинов грамотрицательных бактерий. Именно у больных с перитонитом впервые описали синдром системного воспалительного ответа (SIRS) и полиорганную недостаточность (MOF) [28]. Также углубились знания о реакции брюшины на бактериальную инфекцию, включая процессы абсорбции бактерий и фагоцитоза.

Появились новые системы оценки рисков для пациентов с перитонитом, основанные на физиологических параметрах, а также на результатах интраоперационных патологоанатомических и бактериологических исследований [29]. Принципы антибактериального лечения внутрибрюшных инфекций теперь опираются на ясное представление об их микробиологической природе.

Улучшение понимания биологических аспектов перитонита привело к созданию новых хирургических методов, таких как непрерывный перитонеальный лаваж и открытое ведение брюшной полости. Среди них особую популярность приобрёл метод этапного восстанов-

ления брюшной полости (Stage Abdominal Repair, STAR) [30]. Однако эти инновации остаются предметом споров, так как пока неясно, какие группы пациентов получают от них наибольшую пользу.

Попытки повлиять на каскад медиаторов при системном сепсисе и SIRS пока не увенчались успехом, но исследования более сложных способов модуляции иммунного ответа продолжаются и могут дать результаты в будущем [31].

Хотя результаты лечения перитонита всё ещё далеки от идеальных, прогресс последнего столетия позволил снизить смертность с почти 100 % до уровня ниже 20 %.

Заключение

История изучения перитонита демонстрирует, как развитие медицинской науки, включая анатомию, микробиологию и хирургию, позволило значительно улучшить понимание и лечение этого заболевания. Однако многие вопросы остаются нерешёнными, включая оптимальные методы хирургического вмешательства, роль анаэробных микроорганизмов и возможности модуляции иммунного ответа. Дальнейшие исследования в этих направлениях могут привести к новым прорывам в лечении перитонита и снижению смертности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sigrist H.E. A History of Medicine. Volume I: Primitive and Archaic Medicine. New York, Oxford University Press. 1951; 10–15
2. Wegener G. Chirurgische Bemerkungen über die Peritonealhöhle mit besonderer Berücksichtigung der Ovariectomie. Langenbecks Arch Klin Chir. 1876; 20: 51–145
3. Körte W. Die Chirurgie des Peritoneums. In: Küttner H (Hrsg): Neue Deutsche Chirurgie. Bd. 39. Stuttgart, Enke. 1927; 20–31
4. McDowell E. Three cases of extirpation of the diseased ovary. Eclat Report. 1817; 7: 242–244
5. Cranefield PF. Claude Bernard's revised Edition of his «Introduction à l'étude de la médecine expérimentale». New York, Science History Publications. 1976; 110–115
6. Virchow R. Die Cellularpathologie und ihre Begründung auf physiologische und pathologische Gewebelehre. Vorlesungen gegeben während der Monate März und April 1858 im pathologischen Institut zu Berlin mit einem Vorwort von Heinz Goerke. Repro. Nachdr. d. Ausgabe Berlin. Hildesheim, Ohms. 1966; 35–43
7. Pasteur L. Recherche sur la putréfaction. Compt Rend Acad Sc. 1863; 56: 1189–1194
8. Koch R. Über die Ätiologie der Wundinfektionskrankheit, Leipzig. Vogel. 1878; 13–23
9. Semmelweis I.P. Die Ätiologie, der Begriff und die Prophylaxe des Kindbettfiebers. Eingeleitet von P. Zweifel. Leipzig. 1912; 56–59
10. Lister JJ. On the Antiseptic Principle in the Practice of Surgery. Lancet. 1867; 2: 353–356
11. Bouvenot G, Delfoy C.H. Geschichte der großen physiologischen Konzepte. In: Toellner R (Hrsg): Illustrierte Geschichte der Medizin, Bd. V. Vaduz, Andreas und Andreas. 1992; 112–134
12. Bigelow H.J. Insensibility during surgical operations produced by inhalation. Boston Med Surg J. 1846; 35:309–317
13. von Recklinghausen F., Zur Fettresorption. Arch Pathol Anat Physiol. 1863; 26: 172–208
14. Wegener G. Chirurgische Bemerkungen über die Peritonealhöhle mit besonderer Berücksichtigung der Ovariectomie. Langenbecks Arch Klin Chir. 1876; 20: 51–145
15. Durham H.E. The mechanism of reaction to peritoneal infection. J Pathol Bacteriol. 1897; 4: 338–382
16. Weil S. Die akute freie Peritonitis. Erg Chir Orthop. 1911; 2: 278–357
17. Veillon A, Zuber A. Recherches sur quelques microbes strictement anaérobies et leur rôle en pathologie. Arch de méd exper et d'anat path. 1898; 10: 517–529
18. Murphy JB. Treatment of Perforative Peritonitis. Ann Surg. 1908; 47: 870–872
19. Noetzel W. Zur Peritonitisbehandlung nach Rehn. Arch Klin Chir. 1910; 114: 381–402
20. Pawlowsky A.D. Das Schicksal einiger pathogener (hauptsächlich pyogener) Mikroben bei ihrem Eindringen in den Tierorganismus von den Gelenken, der Pleura, dem Auge, der Mundhöhle, dem Darmkanale und der Vagina aus. Zschr f Hygiene u Infekt Krankh. 1907; 62: 433–451
21. Weinberg M, Prévot AR, Davesne J, Renard C. Recherches sur la bactériologie et la sérothérapie des appendicites aiguës. Ann Int Pasteur. 1928; 42:1167–1241
22. Meleney F.L, Otpj J, Harvey H.D, Zaytseff-Jern H. Peritonitis: II. Synergism of bacteria commonly found in peritoneal exudates. Arch Surg. 1932; 25: 709–721

23. Hillemand P. Geschichte der Magen-Darm-Heilkunde. In: Toellner R (Hrsg): Illustrierte Geschichte der Medizin. Bd IV, Vaduz, Andreas und Andreas. 1992; 18–19
24. Bode F. Eine neue Methode der Peritonitisbehandlung und -drainage bei diffuser Peritonitis Zbl Chir. 1900; 27: 33–35;
25. Körte W. Die Chirurgie des Peritoneums. In: Küttner H (Hrsg): Neue Deutsche Chirurgie. Bd. 39. Stuttgart, Enke. 1927; 43–46
26. Wolff H. Zur Geschichte der Peritonitisbehandlung. Zentralbl Chir. 2002; 127 (1):62–67
27. Kirschner M. Die Behandlung der akuten eitrigen freien Bauchfellentzündung. Langenbecks Arch Chir. 1926; 142: 253–311
28. Deitch E.A. Multiple Organ Failure. Ann Surg. 1992; 216: 117–134
29. Knaus W.A, Draper E.A, Wagner D.P, Zimmerman J.E., Apache I.I. A severity of disease classification system. Crit Care Med. 1985; 13: 818–829
30. Поленок, П.В., Костырной А.В. Этапное хирургическое лечение ургентной абдоминальной патологии. Крымский журнал экспериментальной и клинической медицины. 2015; 3 (19): 46–50
31. Deitch E.A. Multiple Organ Failure. Ann Surg. 1992; 216: 117–134

© Капралов Сергей Владимирович (sergejkapralov@yandex.ru); Климашевич Владимир Юрьевич (v.klimashevitch@yandex.ru);
Данилов Андрей Дмитриевич (surgery1994@mail.ru); Полиданов Максим Андреевич (maksim.polidanoff@yandex.ru);
Волков Кирилл Андреевич (KvoLee@yandex.ru); Масляков Владимир Владимирович
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ НЕПОЛНОЙ СЕРЕБРЯНОЙ СОЛИ ПОЛИАКРИЛОВОЙ КИСЛОТЫ В ЛЕЧЕНИИ ГНОЙНЫХ РАН НА ЛАБОРАТОРНЫХ ЖИВОТНЫХ

EXPERIMENTAL RATIONALE FOR THE USE OF INCOMPLETE SILVER SALT OF POLYACRYLIC ACID IN THE TREATMENT OF PURULENT WOUNDS IN LABORATORY ANIMALS

**A. Netskina
O. Zaitsev
V. Lesovik
A. Dumachev
D. Serpukhin**

Summary. Objective: To evaluate the effect of incomplete silver salt of polyacrylic acid on the healing dynamics of purulent wounds.

Methods: The study involved 70 male Soviet chinchilla rabbits (7–8 months old, 2000–3000 g). A purulent wound model was induced using a 4 % fecal emulsion, followed by abscess opening. The animals were randomized into a control and an experimental group (n=35 each). The experimental group was treated with the incomplete silver salt of polyacrylic acid. Macroscopic appearance, wound area (Kundin's formula), and exudate pH were evaluated on days 1, 5, 10, and 15.

Results: By day 10, 92 % of animals in the experimental group showed complete wound closure ($p<0.05$). Wound area reduction and pH normalization occurred significantly faster than in the control group, where healing occurred by day 15.

Conclusion: The agent shows strong antiseptic, reparative, and hemostatic effects, is simple to use, does not require precise dosing, and has potential for clinical application.

Keywords: purulent wound, silver, polyacrylic acid, healing, experiment.

Нецкина Анастасия Алексеевна

Ассистент, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Минздрава России
netskina.n05@yandex.ru

Зайцев Олег Владимирович

Доктор медицинских наук, профессор, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Минздрава России
ozaitsev@yandex.ru

Лесовик Василина Сергеевна

Кандидат медицинских наук, врач-хирург, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Минздрава России
lesovik_vs@kb85.ru

Думачев Александр Владимирович

ФГБОУ ВО «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Минздрава России
netskina.n05@yandex.ru

Серпухин Денис Дмитриевич

ФГБОУ ВО «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Минздрава России
netskina.n05@yandex.ru

Аннотация. Цель исследования: Изучение влияния неполной серебряной соли полиакриловой кислоты на течение гнойного раневого процесса.

Методы: В исследование были включены 70 самцов кроликов породы советская шиншилла (7–8 месяцев, 2000–3000 г). Модель гнойной раны воспроизводили введением 4 % каловой эмульсии с последующим вскрытием очага. Животные были разделены на контрольную и основную группы (n=35). В основной группе использовали препарат на основе неполной серебряной соли полиакриловой кислоты. Оценивали макроскопическую картину, площадь раны (формула Кундина), pH отделяемого на 1, 5, 10 и 15 сутки. **Результаты:** У животных основной группы к 10-м суткам наблюдалось полное заживление ран у 92 % ($p<0.05$). Площадь раны уменьшалась быстрее, наблюдалась нормализация pH до физиологических значений. В контрольной группе заживление происходило к 15-м суткам.

Заключение: Препарат демонстрирует выраженные антисептические, репаративные и гемостатические свойства, прост в применении, не требует точного дозирования и перспективен для внедрения в клиническую практику.

Ключевые слова: гнойная рана, серебро, полиакриловая кислота, заживление, эксперимент.

Введение

Наиболее значимой темой гнойной хирургии остаётся лечение хирургической инфекции, которые могут возникать после операций, травм или в результате осложнения инфицированных ран [8]. Гнойные инфекции часто требуют комплексного подхода к лечению, включая хирургическое вмешательство, антибиотикотерапию и уход за раной [7]. Это делает дальнейшее ведение пациентов трудоёмким процессом, требующим от медицинских специалистов высокой квалификации. Гнойная инфекция может привести к серьёзным осложнениям, таким как сепсис, что увеличивает риск летального исхода и требует дополнительных ресурсов для лечения [10, с. 357; 1, с. 101]. В отечественной литературе выделяется две патофизиологических группы факторов, оказывающих деструктивное влияние на регенерацию повреждённых тканей. К первой относят серьёзные системные расстройства (сахарный диабет, аутоиммунные заболевания, иммуноскомпрометированные пациенты с хроническими инфекционными заболеваниями, антибиотикорезистентность) и социальные факторы (хронический алкоголизм, наркомания, курение, условия проживания). Вторая группа включает в себя локальный статус (степень микробной контаминации, качество санации раневой поверхности, инородные тела, секвестры, наличие гематомы или серомы, местная ишемия, неадекватная иммобилизация, ятрогенные воздействия, технические погрешности выполненного хирургического вмешательства, лучевая нагрузка в области раны) [5, с. 432; 4, с. 92]. Вышеперечисленные факторы диктуют различные варианты заживления раны — первичное натяжение, формирование инфильтрата или нагноение.

Одним из эффективных и экономически доступных средств борьбы с гнойными осложнениями является неполная серебряная соль полиакриловой кислоты, которая обладает основным бактериостатическим действием, за счёт ионов серебра, и гемостатическим эффектом [6; 9]. Механизм действия этого препарат осуществляется несколькими последовательными этапами. В первую фазу молекулы полиакриловой кислоты образуют связь с белками плазмы крови, в частности с альбумином, образуя полиакриловую матричную структуру с содержанием молекул альбумина в ячейках полиакриловой матрицы [3, с. 60]. Бактерицидное действие оказывается за счёт послойной структуры на поверхности раны: полиакриловая матрица создаёт послойный каркас, а ионы серебра обеспечивают бактерицидный эффект. Полиакриловая матрица затем плазмолизирована, замещаясь фибрином.

Вещество имеет жидкую форму, что облегчает его нанесение на биологические ткани, а также не требует специальной подготовки и точного дозирования, что очень важно в urgentной хирургии [2, с. 339].

Цель исследования

Экспериментально оценить влияние неполной серебряной соли полиакриловой кислоты на течение гнойного раневого процесса у лабораторных животных.

Материалы и методы

Эксперимент проведён на 70 самцах кроликов породы советская шиншилла в возрасте 7–8 месяцев и массой 2000–3000 г. Животные содержались в условиях вивария ФГБОУ ВО «РязГМУ» Минздрава России с соблюдением санитарно-гигиенических норм.

Этические аспекты. Все процедуры соответствовали нормам Хельсинкской декларации (2000 г.) и были одобрены локальным этическим комитетом Рязанского государственного медицинского университета.

Моделирование гнойной раны. Подкожно в область холки вводили 2 мл 4 % каловой эмульсии. На 3-е сутки, после формирования флюктуации, абсцесс вскрывали под масочным наркозом (эфир/этанол 1:1), производили ревизию, удаляли некротизированные ткани и содержимое.

Формирование групп. Животные методом рандомизации были распределены на 2 группы по 35 особей:

- Контрольная группа — стандартная обработка (стерильная марлевая салфетка);
- Основная группа — нанесение неполной серебряной соли полиакриловой кислоты (1 %-ный раствор).

Критерии включения:

- Самцы возрастом 7–8 мес, масса 2–3 кг;
- Отсутствие признаков инфекций или воспаления;
- Устойчивое формирование гнойного очага на 3-и сутки после введения эмульсии.

Методы оценки:

- Визуальная макроскопическая оценка состояния раны (отёк, экссудация, грануляции);
- Планиметрия раневой площади по формуле Кундина ($S = L \times W \times 0,785$);
- pH отделяемого определяли индикаторными полосками Matwave (Россия);
- Исследования проводились на 1, 5, 10 и 15 суток.

Статистическая обработка: Анализ данных выполняли в Microsoft Excel и Statistica 6.0. Для оценки различий между группами применяли критерий Манна—Уитни. Статистически значимыми считались различия при $p < 0,05$. Результаты представлены в виде медианы и 25–75-го перцентиля.

Результаты и обсуждение

На 1-е сутки после вскрытия абсцесса в обеих группах регистрировались типичные признаки воспаления: выраженный отёк, гиперемия кожи, серозно-гнойное

отделяемое. Дно раны покрывали фибринозно-некротические массы.

На 5-е сутки у животных основной группы наблюдались начальные признаки заживления: появление гра-

Таблица 1.

Динамика площади и степени заживления ран у лабораторных животных в разные сроки ($M \pm SD$)

Группа	Показатель	1-е сутки	5-е сутки	10-е сутки	15-е сутки	Срок полного заживления
Основная	Площадь ран (см^2)	$6,9 \pm 2,3$	$4,8 \pm 2,1$	$2,7 \pm 3,1$	0,0	10-е сутки
	Уменьшение раны (%)	—	$37,48 \pm 0,01$	$84,5 \pm 0,22$	$100,0 \pm 0,11$	—
Контрольная	Площадь ран (см^2)	$6,8 \pm 2,1$	$5,9 \pm 2,2$	$4,1 \pm 1,6$	$1,7 \pm 2,8$	15-е сутки
	Уменьшение раны (%)	—	$23,7 \pm 0,21$	$56,2 \pm 0,17$	$87,4 \pm 0,14$	—

Примечание. Значения представлены как среднее \pm стандартное отклонение. Различия между группами на 10 и 15 сутки были статистически значимы ($p < 0,05$). Полное заживление — по критерию отсутствия отделяемого и полной эпителизации.

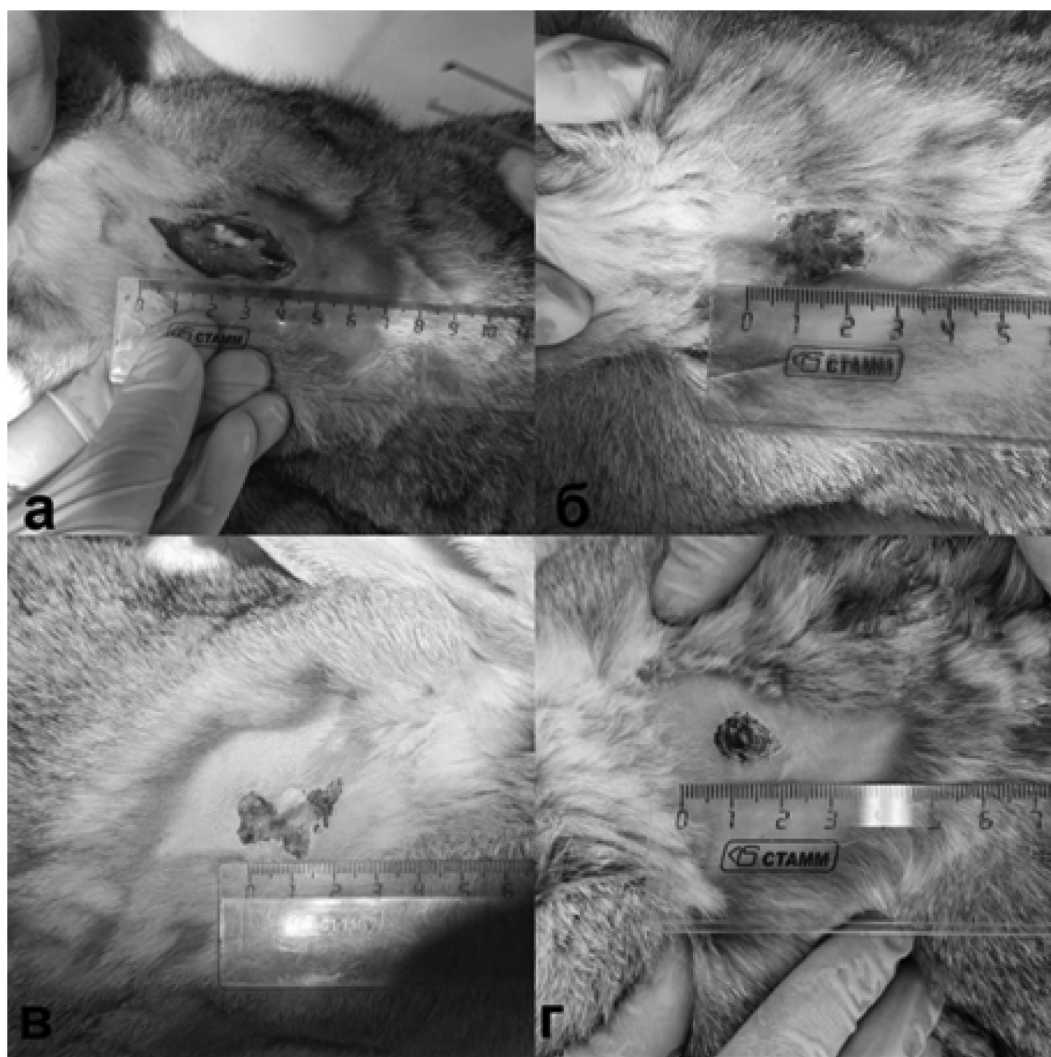


Рис. 1. Состояние раневой поверхности у подопытного кролика экспериментальной группы на 1-е сутки (а), 5-е сутки (б), 10-е сутки (в), 15-е сутки (г). Отмечается постепенное очищение раны, формирование грануляций и полная эпителизация к 15-м суткам

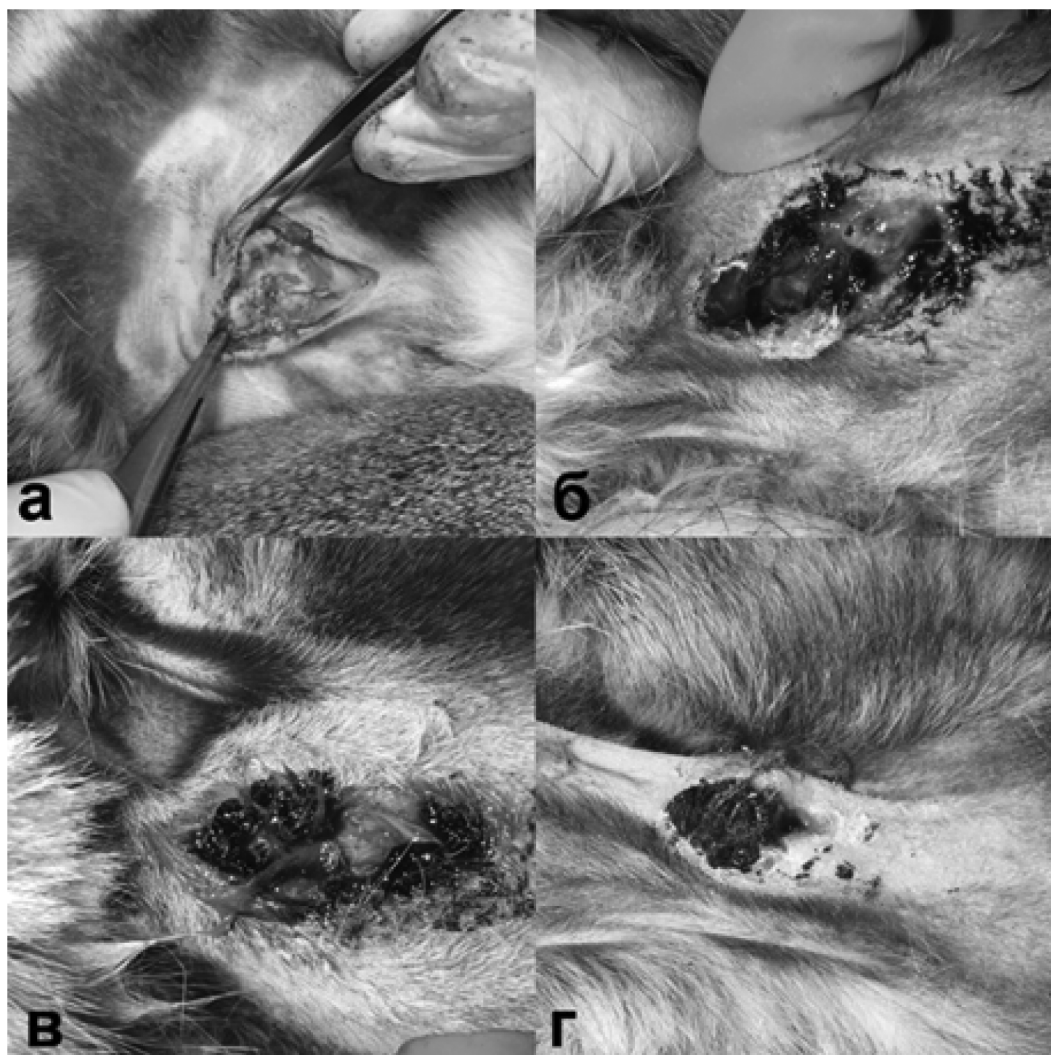


Рис. 2. Состояние раневой поверхности у подопытного кролика контрольной группы на 1-е сутки (а), 5-е сутки (б), 10-е сутки (в), 15-е сутки (г). Видна затяжная воспалительная реакция, сохранение некротических масс и неполная эпителизация к 15-м суткам

нуляционной ткани, уменьшение отделяемого, ослабление гиперемии. В контрольной группе воспалительный процесс сохранялся: обильный экссудат, рыхлая поверхность, отёчность краёв раны.

На 10-е сутки в основной группе у 92 % животных регистрировалось почти полное заживление раны ($p < 0,05$), формировалась зрелая грануляционная ткань, без отделяемого. В контрольной группе сохранялась инфильтрация, эпителизация была неполной.

На 15-е сутки в основной группе наблюдалась полная эпителизация. В контрольной — остаточная раневая поверхность в 12 % случаев.

На рисунке 1 и рисунке 2 представлены макрофотографии ран у животных экспериментальной и контрольной групп на 1, 5, 10 и 15 сутки наблюдения соответственно. Видно, что у животных, получавших препарат

на основе неполной серебряной соли полиакриловой кислоты, заживление шло быстрее и сопровождалось меньшей зоной некроза и воспаления.

Изменение pH отделяемого:

- 1-е сутки: обе группы — $6,3 \pm 0,1$
- 5-е сутки: основная — $6,6 \pm 0,2$; контрольная — $6,4 \pm 0,3$
- 10-е сутки: основная — $6,9 \pm 0,05$; контрольная — $6,5 \pm 0,2$
- 15-е сутки: основная — $7,0 \pm 0,06$; контрольная — $6,5 \pm 0,2$

Нормализация pH в основной группе свидетельствует о стабилизации среды и репарации. У животных без применения препарата сохранялось закисление среды, что может коррелировать с замедленным заживлением.

Заключение

Местное применение неполной серебряной соли полиакриловой кислоты у лабораторных животных достоверно ускоряет заживление гнойных ран. Препарат продемонстрировал выраженные антисептические, репаративные и гемостатические свойства. Его исполь-

зование сопровождалось нормализацией pH среды, сокращением площади повреждений и полной эпителизацией к 10-м суткам. Простота применения и отсутствие необходимости в точном дозировании позволяют рассматривать соединение как перспективное для внедрения в клиническую практику.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аль-Канани Э.С.Х., Солошенко А.В., Николаев С.Б. и др. Инфекционные осложнения после плановых операций в многопрофильном стационаре. Актуальные проблемы медицины. 2024;47(1):99–118.
2. Калинин Р.Е., Сучков И.А., Базаев С.Б., Крылов А.А. Локальные гемостатические средства в хирургической практике. Журнал им. Н.В. Склифосовского. Неотложная медицинская помощь. 2021;10(2):337–346.
3. Плоткин А.В., Покровский Е.Ж., Воронова Г.В. и др. Оценка эффективности гемостатического действия препарата «Гемоблок» при полостных и лапароскопических вмешательствах. Вестник современной клинической медицины. 2015;8(1):56–61.
4. Савельев В.С. и др. Хирургические инфекции кожи и мягких тканей. Российские национальные рекомендации. М.; 2009. 92 с.
5. Страчунский Л.С., Козлов С.Н. Современная антимикробная химиотерапия: руководство для врачей. М.: Боргес; 2002. 432 с.
6. Abzaeva KA, Sukhov BG, Khutsishvili SS, et al. Spontaneous Transformation of Biomedical Polymeric Silver Salt into a Nanocomposite: Physical-Chemical and Antimicrobial Properties Dramatically Depend on the Initial Preparation State. Int J Mol Sci. 2022;23(18):10963. <https://doi.org/10.3390/ijms231810963>
7. De Simone B, Sartelli M, Coccolini F, et al. Intraoperative surgical site infection control and prevention: a position paper and future addendum to WSES intra-abdominal infections guidelines. World J Emerg Surg. 2020;15:10. <https://doi.org/10.1186/s13017-020-0288-4>
8. Ding X, Tang Q, Xu Z, et al. Challenges and innovations in treating chronic and acute wound infections: from basic science to clinical practice. Burns Trauma. 2022;10:tkac014. <https://doi.org/10.1093/burnst/tkac014>
9. More PR, Pandit S, Filippis A, et al. Silver Nanoparticles: Bactericidal and Mechanistic Approach against Drug Resistant Pathogens. Microorganisms. 2023;11(2):369. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020369>
10. Rzepakowska A, Rytel A, Krawczyk P, et al. The Factors Contributing to Efficiency in Surgical Management of Purulent Infections of Deep Neck Spaces. Ear Nose Throat J. 2021;100(5):354–359. <https://doi.org/10.1177/0145561319877281>

© Нецкина Анастасия Алексеевна (netskina.n05@yandex.ru); Зайцев Олег Владимирович (ozaitsev@yandex.ru);
Лесовик Василина Сергеевна (lesovik_vs@kb85.ru); Думачев Александр Владимирович (netskina.n05@yandex.ru);
Серпухин Денис Дмитриевич (netskina.n05@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИММУНИТЕТ ПОСЛЕ ТРАНСПЛАНТАЦИИ ПОЧКИ: СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

IMMUNITY AFTER KIDNEY TRANSPLANTATION: MODERN CHALLENGES AND PROSPECTS

**E. Parabina
O. Fatenkov
A. Mironov
M. Myakotnykh
G. Svetlova**

Summary. Kidney transplantation remains the most effective method of treating end-stage chronic kidney disease (CKD), but the success of the procedure depends on the control of the recipient's immune response to the donor organ. Key aspects of transplant immunity are considered, including the mechanisms of hyperacute, acute and chronic rejection, as well as prospects for the induction of immunological tolerance. Particular attention is paid to immune dysregulation in patients with CKD, such as a combination of immunodeficiency, chronic inflammation, and imbalance of regulatory (Treg) and proinflammatory (Th17) T cells, which increases the risk of postoperative complications. Innovative approaches in diagnostics and therapy are discussed: the use of biomarkers (suPAR, exosomes), flow cytometry for monitoring the immune status, and genetic screening for personalizing doses of immunosuppressants. Cell therapy (Treg, mesenchymal stromal cells), the creation of bioengineered organs, and targeted drugs that block intracellular signaling pathways of immune activation are recognized as promising areas. The need for a transition to personalized medicine that combines precision diagnostics, minimizing the toxicity of therapy, and the development of long-term tolerance methods is emphasized. These strategies can significantly improve graft survival and the quality of life of patients, opening new horizons in transplantology.

Keywords: kidney transplantation, transplant immunity, immunosuppressive therapy, transplant rejection, immunological tolerance, chronic kidney disease, Treg/Th17 imbalance, personalized medicine, cell therapy, bioengineered organs, targeted immunosuppression, flow cytometry, genetic screening, uremic immune dysfunction.

Парабина Елена Валерьевна

кандидат медицинских наук, ассистент,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский
университет» Минздрава России
e.v.parabina@samsmu.ru

Фатенков Олег Вениаминович

доктор медицинских наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский
университет» Минздрава России
o.v.fatenkov@samsmu.ru

Миронов Алексей Александрович

кандидат медицинских наук,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский
университет» Минздрава России,
a.a.mironov@samsmu.ru

Мякотных Максим Николаевич

кандидат медицинских наук,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский
университет» Минздрава России
m.n.miakotnykh@samsmu.ru

Светлова Галина Николаевна

кандидат медицинских наук,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский
университет» Минздрава России
s.n.svetlova@samsmu.ru

Аннотация. Трансплантация почки остается наиболее эффективным методом лечения терминальной стадии хронической болезни почек (ХБП), однако успех процедуры зависит от контроля иммунного ответа реципиента, направленного на донорский орган. Рассмотрены ключевые аспекты трансплантационного иммунитета, включая механизмы гиперострого, острого и хронического отторжения, а также перспективы индукции иммунологической толерантности. Особое внимание уделено иммунной дисрегуляции у пациентов с ХБП, такой как комбинация иммунодефицита, хронического воспаления и дисбаланса регуляторных (Treg) и провоспалительных (Th17) Т-клеток, что повышает риски послеоперационных осложнений. Обсуждаются инновационные подходы в диагностике и терапии: использование биомаркеров (suPAR, экзосомы), проточной цитометрии для мониторинга иммунного статуса и генетического скрининга для персонализации доз иммуносупрессантов. Перспективными направлениями признаны клеточная терапия (Treg, мезенхимальные стромальные клетки), создание биоинженерных органов и таргетные препараты, блокирующие внутриклеточные сигнальные пути активации иммунитета. Подчеркнута необходимость перехода к персонализированной медицине, сочетающей прецизионную диагностику, минимизацию токсичности терапии и разработку методов долгосрочной толерантности. Эти стратегии способны значительно улучшить выживаемость трансплантатов и качество жизни пациентов, открывая новые горизонты в трансплантологии.

Ключевые слова: трансплантация почки, трансплантационный иммунитет, иммуносупрессивная терапия, отторжение трансплантата, иммунологическая толерантность, хроническая болезнь почек, Treg/Th17 дисбаланс, персонализированная медицина, клеточная терапия, биоинженерные органы, таргетная иммуносупрессия, проточная цитометрия, генетический скрининг, уремическая иммунная дисфункция.

Введение

Трансплантация органов является одной из самых эффективных методик лечения тяжелых заболеваний, спасающей миллионы жизней по всему миру. Однако успех этой процедуры часто зависит от сложного взаимодействия между иммунной системой донора и реципиента, известного как трансплантационный иммунитет.

Иммунитет представляет собой уникальную систему защиты организма, которая в нормальных условиях призвана защищать организм от инфекций и других вредных факторов. Однако при трансплантации органов эта система может стать препятствием для успешной адаптации нового органа. В данной статье мы рассмотрим основные аспекты трансплантационного иммунитета, его роль в отторжении трансплантированных органов, а также современные методы подавления иммунного ответа для обеспечения долгосрочной выживаемости после трансплантации.

Основы трансплантационного иммунитета касаются реакции организма на пересадку тканей или органов от донора. При трансплантации иммунная система воспринимает трансплантат как инородную ткань и начинает отторжение. В ответ на это, происходит активация иммунных клеток, таких как Т-лимфоциты, которые играют ключевую роль в отторжении трансплантата. Поэтому важным аспектом трансплантологии является управление иммунным ответом реципиента с целью минимизации отторжения и повышения выживаемости трансплантата.

Для управления иммунным ответом и минимизации отторжения трансплантата применяются различные стратегии иммунодепрессии. Одним из наиболее распространенных методов является применение иммунодепрессивных препаратов, таких как циклоспорин, такролимус, микофенолат мофетил и другие, которые подавляют активность иммунных клеток и уменьшают иммунный ответ организма на трансплантат. Также могут применяться антитела, направленные против определенных иммунных молекул, или техники индукции толерантности для достижения долгосрочного приживания трансплантата без отторжения. Каждый случай требует индивидуального подхода и тщательного мониторинга для достижения оптимальных результатов.

Трансплантация почки остается золотым стандартом лечения пациентов с терминальной стадией хронической болезни почек (ХБП), значительно повышая выживаемость и качество жизни. Однако успех этой процедуры напрямую зависит от способности контролировать иммунный ответ реципиента, направленный против донорского органа. Трансплантационный иммунитет —

сложный процесс, при котором иммунная система распознает чужеродные антигены трансплантата, запуская каскад реакций, способных привести к отторжению.

Несмотря на достижения в области иммуносупрессивной терапии, остро стоит проблема баланса между подавлением отторжения и сохранением защитных функций организма. Современные протоколы включают применение ингибиторов кальциневрина (такролимус, циклоспорин), антиметаболитов (микофенолат мофетил) и глюкокортикоидов, однако их длительное использование сопряжено с риском инфекций, злокачественных новообразований и метаболических нарушений.

Важным направлением исследований остается разработка стратегий индукции иммунологической толерантности, позволяющей минимизировать дозы препаратов или полностью отказаться от них. В этой статье рассматриваются механизмы трансплантационного иммунитета, особенности иммунной дисфункции у пациентов с ХБП, инновационные методы диагностики и терапии, а также перспективы персонализированного подхода в трансплантологии.

Виды иммунных реакций при трансплантации почки

При трансплантации почки возникают различные виды иммунных реакций, которые могут повлиять на успешность течения послеоперационного периода. Основные виды иммунных реакций при трансплантации почки включают:

1. Гиперострое отторжение. Редкое, но катастрофическое осложнение, возникающее в первые минуты-часы после трансплантации из-за наличия у реципиента преформированных антител против антигенов донора (например, HLA-антигенов). Механизм связан с активацией системы комплемента и тромбозом сосудов трансплантата.
2. Острое клеточное отторжение. Наиболее распространенная форма, развивающаяся в первые месяцы. Опосредована Т-лимфоцитами, распознающими донорские антигены, через прямой (взаимодействие с дендритными клетками донора) или непрямой (презентация антигенов собственными APC) путь. Характеризуется инфильтрацией почки цитотоксическими CD8+ Т-клетками и макрофагами.
3. Хроническое отторжение. Многофакторный процесс, приводящий к фиброзу и потере функции трансплантата. Включает гуморальные реакции (антитела против HLA), повторные эпизоды острого отторжения, ишемически-реперфузионное повреждение и токсичность иммуносупрессантов.
4. Толерантность. Идеальное состояние, при котором иммунная система реципиента «игнорирует»

трансплантат без необходимости пожизненной иммуносупрессии. Экспериментальные подходы включают трансплантацию гемопоэтических стволовых клеток донора и использование регуляторных Т-клеток (Treg).

Разработка новых методов и подходов к управлению иммунными реакциями при трансплантации является активной областью исследований в современной медицине. Важно также учитывать индивидуальные особенности пациента и трансплантата такие как генетическая совместимость, состояние иммунной системы, возможные противопоказания к операции, а также особенности послеоперационного ухода и реабилитации.

Разработка персонализированных подходов к управлению иммунными реакциями при трансплантации почки позволяет улучшить прогнозы для пациентов и повысить эффективность лечения.

Патогенез иммунных нарушений при терминальной хронической болезни почек

При терминальных стадиях хронической болезни почек (ХБП) иммунные нарушения играют значительную роль в развитии и прогрессировании заболевания. Уремия, сопровождающая (ХБП), вызывает глубокую иммунную дисрегуляцию, проявляющуюся иммунодефицитом, связанным со снижением функции нейтрофилов и дендритных клеток, лимфопенией (особенно CD4+ Т-клеток). Процесс усугубляется наличием хронического воспаления, обусловленного повышением уровней провоспалительных цитокинов (IL-6, TNF-α) из-за накопления уремических токсинов (п-крезол, индоксил сульфат). В свою очередь наблюдается дисбаланс из-за снижения количества регуляторных Т-клеток и преобладания провоспалительных Th17 (Treg/Th17), что повышает риск отторжения. В комплексе эти нарушения усложняют послеоперационное ведение, увеличивая частоту инфекций и замедляют приживление трансплантата. Вот почему так важно обеспечить иммунную поддержку и следить за состоянием иммунной системы у пациентов с уремией.

Понимание молекулярных механизмов иммунных нарушений позволяет разрабатывать инновационные методы диагностики, которые помогают выявлять пациентов с терминальными стадиями ХБП на ранних этапах и оптимизировать лечение для улучшения прогноза и качества жизни пациентов.

Инновационные иммунологические технологии

Инновационные иммунологические технологии играют ключевую роль в улучшении прогноза у пациентов с терминальными стадиями ХБП. С развитием новых методов диагностики, таких как мультиплексный

анализ иммунологических маркеров, стало возможно более точно определять состояние иммунной системы пациента и выявлять связь между иммунологическими параметрами и прогрессированием ХБП. Эти технологии позволяют предсказать риск осложнений, оценить эффективность терапии и персонализировать подход к лечению каждого пациента. Внедрение инновационных иммунологических методов диагностики в практику помогает значительно улучшить прогноз у пациентов с терминальными стадиями ХБП и повышает эффективность проводимых медицинских мероприятий.

Проточная цитометрия — это метод исследования, который позволяет анализировать и сортировать отдельные клетки в смеси клеток по их физическим и химическим характеристикам. В данном случае, проточная цитометрия может быть использована для анализа субпопуляций лимфоцитов, таких как регуляторные Т-лимфоциты (Treg) и Т-хелперы 17 (Th17), а также для изучения экспрессии маркеров активации, таких как CD38 и HLA-DR. Для анализа субпопуляций лимфоцитов, примерно маркировка клеток антителами, специфичными для поверхностных маркеров на этих клетках, позволяет их идентифицировать и анализировать. Например, Treg клетки могут быть маркированы с использованием антител против CD4, CD25 и других маркеров, а Th17 клетки — с использованием антител против CCR6 и других маркеров. Для анализа экспрессии маркеров активации, клетки могут быть окрашены антителами, направленными против маркеров активации, таких как CD38 и HLA-DR. Это позволяет оценить уровень активации клеток и их реакцию на внешние стимулы. Проточная цитометрия предоставляет возможность быстро и точно анализировать большие объемы клеточных данных, что делает ее ценным инструментом для исследования иммунных ответов и патологических процессов, связанных с иммунной системой.

Генетические и эпигенетические исследования, связанные с иммунным ответом, играют важную роль в понимании механизмов возникновения и развития различных заболеваний. Например, полиморфизмы генов, кодирующих рецепторы, включая TLR4 (Toll-подобный рецептор 4) и цитокин IL-10, могут повлиять на чувствительность к инфекциям и развитие воспалительных процессов. TLR4 является важным компонентом иммунной системы, отвечающим за распознавание патогенов. Полиморфизмы в гене TLR4 могут изменять функциональность рецептора и влиять на способность организма бороться с инфекциями. IL-10, в свою очередь, является цитокином, который регулирует воспалительные процессы. Полиморфизмы в гене IL-10 могут влиять на уровень этого цитокина и, таким образом, на развитие воспалительных заболеваний. В настоящее время проводится выявление полиморфизмов генов (например, CYP3A5), влияющих на метаболизм иммуносупрессантов, для персонализации доз.

Анализ микроРНК в экзосомах мочи позволяет неинвазивно оценивать состояние трансплантата. МикроРНК (малые РНК) также играют важную роль в регуляции генной экспрессии и иммунном ответе. Эпигенетические изменения, включая метилирование ДНК, могут влиять на экспрессию микроРНК и, следовательно, на функции иммунной системы.

В целом, изучение генетических и эпигенетических факторов, связанных с иммунным ответом, помогает понять более глубокие механизмы развития заболеваний и разработать индивидуализированные подходы к лечению и профилактике.

Новые биомаркеры иммунной дисфункции при ХБП

Иммунодиагностика играет ключевую роль в оценке состояния иммунной системы пациентов с терминальными стадиями ХБП. В последние годы появились новые биомаркеры, позволяющие более точно и своевременно выявлять иммунную дисфункцию у этой категории пациентов. Эти биомаркеры могут включать в себя уровни цитокинов, антител, маркеров воспаления и других субстанций, отражающих активность иммунной системы и ее реакцию на болезнь. Использование новых биомаркеров иммунной дисфункции при ХБП позволяет не только более точно диагностировать данный патологический процесс, но и прогнозировать его развитие, что имеет важное значение для лечебной тактики и повышения качества жизни пациентов.

Биомаркеры прецизионной медицины suPAR (расстворимый урокиназный рецептор) позволяют прогнозировать риск отторжения и прогрессирования фиброза. Данный маркер представляет собой белок, который участвует в различных биологических процессах, таких как воспаление, иммунный ответ, клеточная миграция и адгезия. Исследования показывают, что уровень suPAR может быть связан с прогрессированием ХБП и сердечной недостаточности. Например, повышенные уровни suPAR могут быть предиктором ухудшения функции почек у пациентов с ХБП. Также высокие уровни suPAR связаны с более высоким риском развития сердечной недостаточности и более тяжелым течением этого состояния. Однако необходимо учитывать, что эти связи требуют дальнейших исследований для подтверждения и понимания механизмов взаимодействия. Помимо этого, уровень suPAR может быть влиянием других факторов, таких как воспаление, стресс, инфекции и другие состояния, которые также могут влиять на прогрессирование ХБП и сердечной недостаточности.

Галексин-3, также известный как галактосидаза-связывающий белок-3 (galectin-3), является белком, который играет важную роль в различных биологических про-

цессах, включая воспаление, иммунитет, адгезию клеток, апоптоз и метастазирование опухолей. Галексин-3 имеет способность связываться с углеводами на поверхности клеток, что позволяет ему участвовать в регуляции клеточной сигнальной сети. Исследования показывают, что галексин-3 может играть как протективную, так и промотерскую роль в различных заболеваниях, таких как рак, болезни сердца, диабет и др. Поэтому галексин-3 является предметом активных исследований в медицине, включая поиск новых методов диагностики и лечения различных заболеваний.

PD-1 (программированная клеточная смерть 1) и TIM-3 (тимозин) — это клеточные маркеры, которые играют важную роль в регуляции иммунного ответа и могут быть связаны с истощением иммунитета. PD-1 является иммунорегуляторным рецептором, который экспрессируется на поверхности активированных Т-клеток. Взаимодействие PD-1 с его лигандами (PD-L1 и PD-L2) приводит к ингибированию активации Т-клеток, что может приводить к истощению иммунитета и подавлению иммунного ответа.

TIM-3, в свою очередь, является рецептором, экспрессируемым на активированных Т-клетках и других иммунных клетках. Взаимодействие TIM-3 с его лигандами также может способствовать истощению иммунитета и подавлению иммунного ответа.

Изучение этих клеточных маркеров и разработка терапий, направленных на их блокировку или модуляцию, являются активными областями исследований в иммунологии и онкологии, так как они могут играть роль в развитии рака и других иммунных нарушениях.

Перспективы развития трансплантационного иммунитета

В современной медицине большое внимание уделяется исследованиям в области трансплантационного иммунитета и его перспективам развития. Одной из главных целей является улучшение методов терапии, направленной против развития реакции отторжения для снижения риска при пересадке органов и тканей. В рамках развития трансплантационного иммунитета также исследуются новые подходы к модуляции иммунного ответа и поиску более эффективных способов поддержания долгосрочного функционирования трансплантатов. Важными направлениями работы являются исследования в области толерантности и иммунной регуляции, а также применение инновационных биомаркеров для контроля иммунного статуса пациентов после трансплантации. Кроме того, с развитием технологий генной инженерии и клеточной терапии открываются новые возможности для улучшения результатов трансплантации и обеспечения долгосрочного выжи-

вания трансплантатов. В целом, дальнейшее развитие трансплантационного иммунитета обещает улучшить результаты трансплантации и расширить возможности лечения пациентов с тяжелыми заболеваниями органов. Дальнейшее развитие трансплантационного иммунитета также может привести к снижению риска отторжения трансплантата и улучшению качества жизни пациентов после трансплантации. Исследования в области трансплантологии и иммунологии продолжают открывать новые перспективы и методы, которые позволяют более эффективно преодолевать иммунные барьеры и обеспечивать успешную адаптацию трансплантатов в организме получателя. Развитие новых технологий и подходов к трансплантации органов открывает перед медициной широкие горизонты и возможности для спасения жизней и улучшения здоровья людей. Благодаря непрерывному развитию в области трансплантации органов и иммунологии, исследователи и врачи работают над поиском новых способов подавления иммунного ответа организма на новый орган-донор. Одной из перспективных областей исследований является поиск методов замещения традиционных иммуносупрессивных препаратов, которые часто вызывают побочные эффекты и снижают общий уровень защиты организма. Возможность использования точечных терапий, направленных на конкретные компоненты иммунной системы, может значительно улучшить результаты трансплантации и повысить долгосрочные выживаемость пациентов. Такие инновационные методы представляют собой светлое будущее для пациентов, нуждающихся в трансплантации, и открывают новые горизонты в лечении органных заболеваний.

При трансплантации оценка иммунного ответа имеет ключевое значение для определения эффективности трансплантации и предотвращения отторжения органа. Некоторые из способов оценки иммунного ответа при трансплантации включают в себя:

1. Мониторинг уровня циркулирующих антител к донорскому органу (например, через тест на присутствие антител IgG и IgM).
2. Для оценки уровня циркулирующих противоорганных клеток, таких как CD4+ и CD8+ Т-клетки, проводят лабораторные анализы крови. Эти анализы обычно включают в себя иммуномаркировку клеток и их последующий анализ на присутствие различных клеточных маркеров, таких как CD4 и CD8. Количество CD4+ Т-клеток обычно используется для оценки статуса иммунной системы, особенно при ВИЧ-инфекции. Нормальный уровень CD4+ Т-клеток у взрослого человека составляет примерно 500–1500 клеток на микролитр крови. Уровень CD8+ Т-клеток также важен для оценки иммунного ответа и может изменяться в различных патологических состояниях. Для более точной интерпретации результатов анали-

зов на CD4+ и CD8+ Т-клетки следует обратиться к врачу или иммунологу, который сможет оценить их в контексте общего здоровья пациента и возможных патологий. Оценка уровня циркулирующих противоорганных клеток (например, через тесты на CD4+ и CD8+ Т-клетки).

3. Использование тестов на наличие определенных маркеров иммунного ответа, таких как маркеры активации Т-клеток (например, CD25).

Да, тесты на наличие определенных маркеров иммунного ответа, таких как CD25 (также известный как IL-2 receptor alpha chain), могут быть полезными инструментами для оценки активации Т-клеток. CD25 является маркером активации Т-клеток, поскольку его экспрессия увеличивается при стимуляции Т-клеток антигеном. Использование тестов на CD25 может помочь в исследованиях иммунного ответа, в диагностике иммунных заболеваний, а также в мониторинге эффективности иммунотерапии. Например, уровень CD25 может быть измерен для оценки активации Т-клеток при анализе иммунного ответа на инфекции, опухоли или аутоиммунные заболевания.

Таким образом, тесты на CD25 могут быть важным инструментом для изучения и мониторинга иммунного ответа, особенно в контексте исследований и клинической практики, связанных с активацией Т-клеток.

4. Оценка уровня цитокинов в сыворотке крови (например, интерферон-гамма, интерлейкины).
5. Биопсия ткани трансплантированного органа для оценки наличия воспаления и инфильтрации иммунных клеток.
6. Мониторинг функции трансплантированного органа и появления признаков отторжения.

Эти методы помогают оценить активность иммунной реакции и решить, нужны ли корректирующие меры для предотвращения отторжения трансплантированного органа.

Развитие новых технологий и методов трансплантации органов играет ключевую роль в повышении успешности процедуры и улучшении результатов для пациентов. Открытие точечных терапий, нацеленных на конкретные компоненты иммунной системы, обещает значительное снижение риска отторжения имплантированного органа и улучшение долгосрочных перспектив для больных. Благодаря непрерывному исследованию и совершенствованию таких инновационных подходов, медицина становится все более эффективной в борьбе с органными заболеваниями и спасении жизней пациентов, что делает перспективу трансплантации органов более оптимистичной. К такого рода перспективам мы бы отнесли клеточную терапию с использованием Treg

и мезенхимальных стромальных клеток для индукции толерантности. Новые возможности предоставляемые за счет использования биоинженерных органов. Трансплантация почек, выращенных из индуцированных плюрипотентных стволовых клеток реципиента. Внедрения в широкую клиническую практику таргетной иммуносупрессии путем использования ингибиторов киназ (такие как tofacitinib), блокирующих внутриклеточные сигнальные пути активации Т-клеток.

Заключение

Понимание иммунных механизмов после трансплантации почки и внедрение инновационных технологий открывают путь к персонализированной медицине. Совершенствование методов индукции толерантности и минимизация токсичности терапии остаются ключевыми задачами, решение которых позволит увеличить срок жизни трансплантатов и улучшить прогноз пациентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ватазин А.В., Зулькарнаев А.Б., Федулкина В.А., Крстич М. Основные межклеточные взаимодействия при активации Т-клеток в отторжении почечного трансплантата. Альманах клинической медицины №31.2014. С. 76–82.
2. Ильинский И.М., Зайденов В.А., Белецкая Л.В. и др. Гистологическое и иммуноморфологическое исследование пункционных биоптатов аллотрансплантационных трупных почек при острой реакции отторжения // Трансплантология и искусственные органы — 1996. — №3-4. — С.82–87.
3. Мойсюк Я.Г., Столяревич Е.С., Томилина Н.А. Болезни почечного трансплантата. / Нефрология: национальное руководство Под ред. Н.А.Мухина. — М: ГЭОТАР-Медиа, 2009. — С. 629–682.
4. Aiello FB, Calabrese F, Rigotti P. et al. Acute rejection and graft survival in renal transplanted patients with viral diseases // Mod Pathol. — 2004. — №2. — P.89–96
5. An GH, Yun J, Hong YA The effect of combination therapy with rituximab and intravenous immunoglobulin on the progression of chronic antibody mediated rejection in renal transplant recipients. J Immunol Res. 2014;2014:828732. doi: 10.1155/2014/828732. Epub 2014 Jan 29.
6. Blume O, Yost S, Kaplan B. Antibody-Mediated Rejection: Pathogenesis, Prevention, Treatment, and Outcomes. J Transplant. 2012; 2012: 201754. Published online. 2012 March 24.
7. Casadei D.H. et al. A randomized and prospective study comparing treatment with high-dose intravenous immunoglobulin with monoclonal antibodies for rescue of kidney grafts with steroid-resistant rejection // Transplantation. 2001. Vol. 71 (1). P. 53–58.
8. Djamali A, Kaufman D, Ellis T et al. Diagnosis and Management of AntibodyMediated Rejection: Current Status and Novel Approaches American Journal of Transplantation 2014; 14: 255–271
9. Haas M. C4d-negative antibody-mediated rejection in renal allografts: evidence for its existence and effect on graft survival. Clinical Nephrology. 2011;75(4):271–278.
10. Joseph JT, Kingsmore DB, Junor BJ. et al. The impact of late acute rejection after cadaveric kidney transplantation // Clin Transplant. — 2001. — №4. — P.221–227
11. Kedainis RL., Koch MJ., Brennan DC. and Liapis H. Focal C4d + in Renal Allografts is Associated with the Presence of Donor Specific Antibodies and Decreased Allograft Survival Am J Transplant. 2009 April; 9(4): 812–819.
12. Kieran N, Wang X, Perkins J et al Combination of Peritubular C4d and Transplant Glomerulopathy Predicts Late Renal Allograft Failure // J Am Soc Nephrol. 2009 October; 20(10): 2260–2268.
13. Lennertz A., Fertmann J., Thomae R. et al. Plasmapheresis in C4d-positive acute humoral rejection following kidney transplantation: a review of 4 cases // Ther. Apher. Dial. — 2003. — Vol.7, №6. — P. 529–535

© Парабина Елена Валерьевна (e.v.parabina@samsmu.ru); Фатенков Олег Вениаминович (o.v.fatenkov@samsmu.ru);
Миронов Алексей Александрович (a.a.mironov@samsmu.ru); Мякотных Максим Николаевич (m.n.miakotnykh@samsmu.ru);
Светлова Галина Николаевна (s.n.svetlova@samsmu.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРОФИЛАКТИКА ФЕНОМЕНА НЕВОССТАНОВЛЕННОГО КРОНАРНОГО КРОВОТОКА У ПАЦИЕНТОВ С ОСТРЫМ КРОНАРНЫМ СИНДРОМОМ С ПОДЪЕМОМ СЕГМЕНТА ST

PREVENTION OF THE PHENOMENON OF UNRESTORED CORONARY BLOOD FLOW IN PATIENTS WITH ACUTE CORONARY SYNDROME WITH ST SEGMENT ELEVATION

**G. Sazanov
A. Aydemirov
O. Sapelnikov**

Summary. The no-reflow phenomenon is the absence or significant reduction of coronary perfusion after successful removal of mechanical obstruction in the epicardial artery, which is manifested by a TIMI blood flow gradation of less than 3 points or a myocardial perfusion index of less than 2 points. Due to the high clinical significance of this problem, methods for preventing no-reflow are actively studied, including pharmacological and mechanical approaches, optimization of percutaneous coronary intervention technique, and patient risk stratification. Timely detection of patients at high risk of developing the no-reflow phenomenon and the use of preventive measures can significantly improve the treatment outcomes for patients with ST-segment elevation acute coronary syndrome (STEMI). Analysis of modern literature has shown that prevention of no-reflow phenomenon is a multifactorial problem requiring an integrated approach at all stages of managing patients with STEMI. The results of large registry studies made it possible to identify the main risk factors for the development of non-restored coronary blood flow. Independent predictors include age over 65 years, diabetes mellitus, arterial hypertension, time from the onset of symptoms to reperfusion of more than 6 hours, damage to the anterior descending artery, high thrombotic load according to the TIMI scale, initially reduced left ventricular ejection fraction of less than 40 % and elevated troponin levels.

The purpose of this review is to summarize and analyze the most known factors for preventing the phenomenon of non-restored coronary blood flow in patients with STEMI.

Keywords: no-reflow phenomenon, infarction-related coronary artery, acute myocardial infarction with ST-segment elevation.

Сазанов Григорий Вячеславович

врач по рентгенэндоваскулярной диагностике
и лечению отделения рентгенохирургических методов
диагностики и лечения ГБУЗ СК
«Ставропольская краевая клиническая больница»
mc_sagr@mail.ru

Айдемиров Артур Насирович

доктор медицинских наук, профессор, федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Ставропольский
государственный медицинский университет»
Министерства здравоохранения Российской Федерации;
ГБУЗ СК «Ставропольская краевая
клиническая больница»
aaidemirov@mail.ru

Сапелников Олег Валерьевич

д.м.н., г.н.с., лаборатория хирургических
и рентгенохирургических методов лечения нарушений
ритма сердца отдела сердечно-сосудистой хирургии,
ФГБУ «НМИЦК им. академика Е.И. Чазова»
Минздрава России, г. Москва
sapelnikovov@mail.ru

Аннотация. Феномен невосстановленного коронарного кровотока (no-reflow phenomenon) представляет собой отсутствие или значительное снижение коронарной перфузии после успешного устранения механической обструкции в эпикардиальной артерии, что проявляется градицией кровотока по шкале TIMI менее 3 баллов или индексом перфузии миокарда (MBG) менее 2 баллов. В связи с высокой клинической значимостью данной проблемы активно изучаются методы профилактики невосстановленного коронарного кровотока, включающие фармакологические и механические подходы, оптимизацию техники выполнения чрескожного коронарного вмешательства (ЧКВ) и стратификацию риска пациентов. Своевременное выявление больных высокого риска развития феномена no-reflow и применение превентивных мероприятий может существенно улучшить результаты лечения пациентов с острым коронарным синдромом с подъемом сегмента ST (ОКСnST).

Анализ современной литературы показал, что профилактика феномена невосстановленного коронарного кровотока представляет собой многофакторную проблему, требующую комплексного подхода на всех этапах ведения пациентов с ОКСnST. Результаты крупных регистровых исследований позволили выделить основные факторы риска развития невосстановленного коронарного кровотока. К независимым предикторам относятся возраст старше 65 лет, сахарный диабет, артериальная гипертензия, время от начала симптомов до реперфузии более 6 часов, поражение передней нисходящей артерии, высокая тромботическая нагрузка по шкале TIMI, исходно сниженная фракция выброса левого желудочка менее 40 % и повышенный уровень тропонина.

Целью данного обзора является обобщение и анализ наиболее известных факторов профилактики феномена невосстановленного коронарного кровотока у пациентов с ОКСnST.

Ключевые слова: феномен no-reflow, инфаркт-ответственная коронарная артерия, острый инфаркт миокарда с подъемом сегмента ST.

Введение

ОКСпСТ остается одной из ведущих причин смертности и инвалидизации во всем мире, несмотря на значительные достижения в области реперфузионной терапии [1, 2]. Основной целью лечения пациентов с ОКСпСТ является быстрое и полное восстановление коронарного кровотока в инфаркт-связанной артерии, что достигается посредством первичного ЧКВ или тромболитической терапии [3].

Однако успешная реканализация эпикардиальной коронарной артерии не всегда гарантирует адекватную перфузию миокарда на микроциркуляторном уровне. Феномен невосстановленного коронарного кровотока (no-reflow phenomenon) представляет собой отсутствие или значительное снижение коронарной перфузии после успешного устранения механической обструкции в эпикардиальной артерии, что проявляется грацией кровотока по шкале TIMI менее 3 баллов или MBG менее 2 баллов [4].

Данное осложнение наблюдается у 10–40 % пациентов, подвергшихся первичному ЧКВ, и ассоциируется с неблагоприятным прогнозом: увеличением размеров инфаркта миокарда, снижением фракции выброса левого желудочка, развитием сердечной недостаточности и повышением риска смерти в госпитальном и отдаленном периодах. Патофизиологические механизмы феномена no-reflow включают дистальную эмболизацию атеротромботическими массами, отек эндотелия и кардиомиоцитов, спазм микрососудов, а также реперфузионное повреждение тканей [5].

В связи с высокой клинической значимостью данной проблемы активно изучаются методы профилактики невосстановленного коронарного кровотока, включающие фармакологические и механические подходы, оптимизацию техники выполнения ЧКВ и стратификацию риска пациентов. Своевременное выявление больных высокого риска развития феномена no-reflow и применение превентивных мероприятий может существенно улучшить результаты лечения пациентов с ОКСпСТ.

Материалы и методы

Для подготовки данного обзора был проведен систематический поиск литературы в международных базах данных PubMed, Scopus, Web of Science и Cochrane Library за период с 2019 по 2024 год. Поисковая стратегия включала следующие ключевые термины и их комбинации: «no-reflow phenomenon», «STEMI», «primary PCI», «coronary flow», «microvascular obstruction», «prevention», «pharmacological therapy», «mechanical devices». Дополнительно проводился поиск в российских базах данных eLIBRARY и CyberLeninka с использованием соответствующих терминов на русском языке.

В анализ включались оригинальные исследования, систематические обзоры, мета-анализы, клинические рекомендации и экспертные консенсусы, посвященные вопросам профилактики феномена невосстановленного коронарного кровотока у пациентов с острым инфарктом миокарда с подъемом сегмента ST. Критериями включения служили публикации, не соответствующие тематике исследования, дублирующие материалы, а также работы с недостаточным уровнем доказательности.

Особое внимание уделялось рандомизированным контролируемым исследованиям, крупным регистровым исследованиям и мета-анализам, оценивающим эффективность различных методов профилактики феномена no-reflow. Анализировались как фармакологические подходы, включающие применение антиагрегантов, антикоагулянтов, вазодилататоров и кардиопротекторов, так и механические методы защиты от дистальной эмболизации и оптимизации техники чрескожного коронарного вмешательства.

При отборе источников учитывались актуальные клинические рекомендации Европейского общества кардиологов, Американской коллегии кардиологов, Американской ассоциации сердца, а также Российского кардиологического общества.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ современной литературы показал, что профилактика феномена невосстановленного коронарного кровотока представляет собой многофакторную проблему, требующую комплексного подхода на всех этапах ведения пациентов с ОКСпСТ [6, 7, 8].

Результаты крупных регистровых исследований позволили выделить основные факторы риска развития невосстановленного коронарного кровотока. К независимым предикторам относятся возраст старше 65 лет, сахарный диабет, артериальная гипертензия, время от начала симптомов до реперфузии более 6 часов, поражение передней нисходящей артерии, высокая тромботическая нагрузка по шкале TIMI, исходно сниженная фракция выброса левого желудочка менее 40 % и повышенный уровень тропонина. Интегральные шкалы риска, такие как SYNTAX score и шкала Mehran, продемонстрировали умеренную прогностическую ценность с площадью под ROC-кривой 0,65–0,72 [9, 10, 11].

Согласно анализу Carrick D. et al., современные интегральные шкалы оценки риска, включая SYNTAX score и шкалу Mehran, демонстрируют умеренную прогностическую ценность в предсказании развития феномена no-reflow с площадью под ROC-кривой в диапазоне 0,65–0,72. Это указывает на необходимость дальнейшего совершенствования алгоритмов стратификации риска и поиска новых предикторных факторов [12].

Важность точной стратификации риска подчеркивается тем, что развитие no-reflow ассоциируется с неблагоприятным прогнозом, включая увеличение госпитальной летальности, развитие сердечной недостаточности и повышение риска повторных кардиоваскулярных событий [13]. В связи с этим, идентификация пациентов высокого риска позволяет своевременно применить профилактические стратегии, включая модификацию техники вмешательства, использование дистальных протекционных устройств и фармакологическую профилактику микрососудистой дисфункции.

Исследования антиагрегантной терапии показали противоречивые результаты относительно влияния различных режимов на частоту развития феномена no-reflow. По данным Allencherril et al., исследования антиагрегантной терапии демонстрируют неоднозначные результаты в отношении профилактики феномена no-reflow [14]. Авторы отмечают, что полнотазовая аспиринотерапия сама по себе не предотвращает развитие феномена no-reflow несмотря на то, что большинство пациентов, подвергающихся реперфузии при остром инфаркте миокарда с подъемом сегмента ST, получают аспирин, но при этом демонстрируют высокую частоту развития no-reflow. Исследователи выдвигают гипотезу, что это связано с важностью отсроченного no-reflow в постинфарктном периоде. Интересно, что, если аденозин действует преимущественно через антиагрегантный механизм, возможно, его эффекты маскируются на фоне применения аспирина и нагрузочных доз ингибиторов P2Y₁₂ рецепторов.

Согласно данным исследований TRITON-TIMI 38 и других крупных клинических испытаний, различные антиагрегантные препараты показали разнонаправленные результаты. В частности, применение прасугрела по сравнению с клопидогрелом у пациентов с острыми коронарными синдромами не продемонстрировало значимого влияния на частоту развития no-reflow. Аналогично, исследования с кангрелором при чрескожных коронарных вмешательствах показали улучшение ангиографических показателей коронарного кровотока, но не клинических исходов у пациентов с острыми коронарными синдромами. Мета-анализ рандомизированных исследований подтвердил, что антиагрегантная терапия может улучшать постпроцедурный коронарный кровоток, однако это не всегда транслируется в улучшение клинических результатов, что подчеркивает сложность патофизиологических механизмов феномена no-reflow и необходимость комплексного подхода к его профилактике [15, 16].

Особенно многообещающими представляются результаты использования ингибиторов гликопротеиновых рецепторов IIb/IIIa для предотвращения феномена no-reflow. Исследование Wohrle et al. продемонстриро-

вало значительное снижение частоты развития феномена no-reflow при интракоронарном применении абциксимаба у пациентов с острым коронарным синдромом с 20,2 % до 10,2 % ($p < 0,008$) по сравнению с контрольной группой [17]. Аналогичные результаты были получены De Lemos et al., где у пациентов с исходным кровотоком TIMI 0 или 1 частота развития феномена no-reflow снизилась с 27,5 % до 11,8 % ($p < 0,002$). В исследовании ADMIRAL внутривенное введение абциксимаба ассоциировалось с более высокой частотой достижения кровотока TIMI 3 и 80 % снижением неблагоприятных сердечных событий по сравнению с контрольной группой [17].

Значительный интерес представляют результаты применения вазодилаторов для профилактики микроваскулярной обструкции. По данным мета-анализа Хуе-Мей Фенг et al. (13 РКИ), аденозин достоверно улучшал ST-разрешение (ОР 1,30; 95 % ДИ: 1,15–1,46; $p < 0,001$) и снижал риск основных неблагоприятных сердечно-сосудистых событий (ОР 0,63; 95 % ДИ: 0,46–0,85; $p = 0,003$) при внутрикоронарном введении [18].

Наиболее выраженный кардиопротективный эффект наблюдался у пациентов с временем ишемии ≥ 240 минут (ОР для MACE = 0,65; $p = 0,009$). Аденозин значительно снижал риск сердечной недостаточности (ОР 0,66; $p = 0,044$) и пиковый уровень КФК-MB.

Однако применение аденозина сопровождается повышенным риском преходящих побочных эффектов (артериальная гипотензия, АВ-блокады), что требует тщательного мониторинга [18].

Особенно интересными представляются результаты применения эпинефрина в качестве альтернативного подхода к профилактике феномена no-reflow. Исследование RESTORE, проведенное Navarese et al., продемонстрировало эффективность и безопасность интракоронарного введения эпинефрина у пациентов с рефрактерным феноменом no-reflow после первичного чрескожного коронарного вмешательства [19]. В данном наблюдательном исследовании интракоронарное введение эпинефрина ассоциировалось со значительным улучшением коронарного кровотока, при этом TIMI 3 кровоток достигался у 28,6 % пациентов, TIMI 2 у 64,3 %, TIMI 1 у 7,1 % и TIMI 0 у 0 % пациентов по сравнению с традиционными методами лечения, где соответствующие показатели составили 18,8 %, 12,5 %, 37,5 % и 31,3 % ($p = 0,004$ между группами). Дальнейшие данные исследования COAR, представленные Khan et al., подтвердили превосходство эпинефрина над аденозином в лечении феномена no-reflow, демонстрируя значительно большее улучшение кровотока с достижением TIMI III у 90,1 % против 78 % пациентов ($p = 0,019$) и улучшением скорректированного количества кадров TIMI [19].

Помимо фармакологических подходов, в клинической практике широко изучается применение механических методов профилактики no-reflow, включая устройства для аспирации тромба и системы дистальной защиты. Анализ эффективности устройств для аспирации тромба показал неоднозначные результаты. Крупное рандомизированное исследование TASTE не выявило значимого влияния рутинной аспирации тромба на клинические исходы, однако последующие субанализы продемонстрировали потенциальную пользу у пациентов с высокой тромботической нагрузкой [20]. Устройства дистальной защиты, несмотря на патофизиологическое обоснование, не показали клинической эффективности в профилактике феномена no-reflow согласно данным нескольких рандомизированных исследований.

Особый интерес представляет стратегия отсроченного стентирования, которая направлена на отложение имплантации стента на определенный временной интервал после достижения стабильного дистального кровотока. Патофизиологическое обоснование данного подхода заключается в том, что период отсрочки позволяет достичь постепенной резорбции тромба, улучшения кровотока по шкале TIMI, уменьшения вазоспазма и снижения перипроцедурных осложнений. В исследовании DEFER-STEMI отсроченное стентирование значительно снижало частоту slow-flow/no-reflow (5,9 % против 28,6 %, $p=0,005$), тогда как исследование DANAMI 3-DEFER не продемонстрировало клинических преимуществ при комбинированной конечной точке [21].

Контрастные результаты объясняются различиями в критериях отбора: DEFER-STEMI включало пациентов высокого риска, а DANAMI 3-DEFER — всех пациентов с первичным ЧКВ. Мета-анализ Cassese et al. подтвердил, что отсроченное стентирование улучшает ангиографические исходы, но не клинические результаты. Оптимальная продолжительность отсрочки остается дискуссионной: большинство исследований использовали 24–72 часа, хотя данные ОКТ показывают продолжающуюся резорбцию тромба до 30 дней (присутствие тромба снижается с 94,1 % до 32 %) [22].

Учитывая неоднозначные результаты отсроченного стентирования и необходимость активного вмешательства при высокой тромботической нагрузке во время первичного ЧКВ, особое внимание уделяется механическим методам удаления тромботических масс. В работе Д.С. Мазнева и соавт. подробно рассматривается применение мануальной тромбаспирации как основного механического метода защиты от феномена невосстановленного коронарного кровотока у пациентов с острым коронарным синдромом с подъемом сегмента ST. Механическая тромбэкстракция была разработана с целью предотвращения миграции тромботических масс в дистальное русло коронарной артерии во время баллонной

дилатации и стентирования. Согласно исследованию, включавшему анализ аспирационного материала у 1009 больных с инфарктом миокарда с подъемом сегмента ST, было установлено двукратное увеличение эффективности процедуры при использовании мануальной тромбаспирации по сравнению с традиционным чрескожным коронарным вмешательством [23].

Однако результаты многолетнего опыта применения мануальной тромбаспирации демонстрируют противоречивые данные относительно клинической эффективности данного метода. Мета-анализ Marmagkiolis K. и соавт., включивший результаты 11 рандомизированных клинических исследований с общим числом пациентов 20605, показал улучшение показателей миокардиальной перфузии и снижение сегмента ST более чем на 50 % при проведении мануальной тромбаспирации по сравнению с чрескожным коронарным вмешательством без тромбэкстракции [24]. Тем не менее, не наблюдалось статистически значимых различий в показателях смертности, частоте повторного инфаркта, необходимости повторной реваскуляризации и частоте инсультов через 30 дней наблюдения. Данные крупного национального регистра CathPCI Registry показали, что частота применения мануальной тромбаспирации достигла максимального значения 13,8 %, но затем снизилась более чем на 9 % и к середине 2016 года составила лишь 4,7 %, что отражает изменение отношения кардиологического сообщества к рутинному использованию данной методики в клинической практике [25].

Результаты исследований подчеркивают важность технических аспектов выполнения первичного ЧКВ для профилактики нарушений коронарной перфузии. Применение стентов с лекарственным покрытием второго и третьего поколения ассоциировалось с меньшей частотой развития феномена no-reflow по сравнению с голометаллическими стентами. Исследования COMFORTABLE AMI и EXAMINATION продемонстрировали, что стенты нового поколения с лекарственным покрытием более эффективны, чем голометаллические стенты при лечении острого инфаркта миокарда, благодаря меньшей потребности в повторных вмешательствах. Долгосрочное наблюдение в рамках исследования EXAMINATION подтвердило превосходство стентов с лекарственным покрытием над голометаллическими стентами как в отношении связанных с пациентом, так и связанных с устройством неблагоприятных сердечно-сосудистых событий [26].

В исследовании NORSTENT, включавшем 26 % пациентов с STEMI, стенты с лекарственным покрытием ассоциировались с более низкими показателями определенного тромбоза стента и повторной реваскуляризации. Стенты второго и третьего поколения с лекарственным покрытием включают более тонкие стойки, биосов-

местимые или биodeградируемые полимеры, а также улучшенную кинетику высвобождения лекарственного средства, что способствует более быстрой эндотелиализации и снижает риск очень позднего тромбоза стента. Крупные регистровые исследования и мета-анализы последовательно показывали низкие показатели тромбоза стента, неудачи целевого поражения и других неблагоприятных сердечных событий при использовании этих устройств, что подтверждает их благоприятный профиль безопасности в условиях STEMI и способствует профилактике микроваскулярных осложнений, включая феномен невосстановленного коронарного кровотока [27].

Перспективным направлением в профилактике феномена no-reflow является применение высокодозной статинотерапии в рамках предпроцедурной подготовки пациентов. Несмотря на то, что современные руководства уже рекомендуют прием высоких доз статинов до и после чрескожного коронарного вмешательства у пациентов с острым коронарным синдромом, связь между высокодозной статинотерапией и частотой возникновения феномена no-reflow долгое время оставалась неясной [28].

Для решения этого вопроса Sonia Anayat et al провели систематический обзор и метаанализ, целью которого стала оценка доказательств эффективности предпроцедурной терапии высокими дозами статинов для снижения частоты возникновения феномена no-reflow после чрескожного коронарного вмешательства [29]. В окончательный анализ Sonia Anayat et al включили 11 исследований с общей популяцией 4294 пациентов. Результаты метаанализа продемонстрировали, что использование высоких доз статинов перед чрескожным коронарным вмешательством значительно снизило частоту постпроцедурных событий no-reflow с отношением шансов 0,51 при 95 % доверительном интервале 0,35–0,74 и уровне значимости $p = 0,0005$. Особенно важными оказались результаты анализа подгруппы из семи исследований, включавших пациентов, которые ранее не получали статинотерапию. У этой категории больных высокоинтенсивное лечение статинами по сравнению с низкоинтенсивным лечением или плацебо показало значительное снижение общего количества событий no-reflow с отношением шансов 0,55 при 95 % доверительном интервале 0,34–0,88 и уровне значимости $p = 0,01$.

В контексте профилактики феномена невосстановленного коронарного кровотока у пациентов с острым коронарным синдромом с подъемом сегмента ST особый интерес представляет изучение кардиопротективных свойств ингибиторов натрий-глюкозного котранспортера 2 типа. Экспериментальные данные демонстрируют многообещающий потенциал данной группы препаратов в ограничении ишемически-реперфузионного повреждения миокарда.

Проведенный систематический анализ клинических исследований, включивший 1229 пациентов с сахарным диабетом и острым инфарктом миокарда, подвергшихся чрескожному коронарному вмешательству, выявил значимые преимущества применения ингибиторов SGLT-2. У 209 пациентов, получавших данную терапию, отмечались более благоприятные показатели кардиоспецифических биомаркеров, включая снижение концентрации тропонина и улучшение электрокардиографических параметров восстановления коронарного кровотока. Дополнительно наблюдались ограничение зоны некроза миокарда, снижение активности воспалительного процесса и улучшение сократительной функции левого желудочка на момент выписки. Полученные результаты согласуются с данными доклинических исследований и подтверждают перспективность использования ингибиторов SGLT-2 в качестве средства профилактики неблагоприятных последствий реперфузионной терапии, однако требуют дальнейшего изучения в рамках крупных рандомизированных клинических испытаний [30].

Отечественные исследователи также отмечают некоторую зависимость возникновения феномена невосстановленного коронарного кровотока от выполнения предилатации инфаркт-ответственной коронарной артерии, что было продемонстрировано в невязанных друг от друга работах исследователей [31,32]. Эти данные заслуживают внимания и требуют дальнейшего изучения.

Заключение

На основании представленных данных можно заключить, что профилактика феномена невосстановленного коронарного кровотока представляет собой многогранную клиническую задачу, требующую комплексного подхода с учетом индивидуальных факторов риска пациента. Фармакологические стратегии демонстрируют различную эффективность в зависимости от временных параметров ишемии и клинических характеристик больных, при этом аденозин показывает наиболее выраженные кардиопротективные эффекты у пациентов с длительным периодом ишемии, превышающим 240 минут. Применение ингибиторов гликопротеиновых рецепторов IIb/IIIa, особенно абциксимаба, продемонстрировало стабильные результаты в снижении частоты развития микрососудистой обструкции, тогда как эффективность антиагрегантной терапии остается противоречивой на фоне стандартного применения аспирина и ингибиторов P2Y₁₂ рецепторов.

Механические методы профилактики, включая аспирацию тромба и устройства дистальной защиты, не продемонстрировали убедительных клинических преимуществ в крупных рандомизированных исследованиях, несмотря на патофизиологическое обоснование

их применения. Стратегия отсроченного стентирования показывает улучшение ангиографических параметров, но не транслируется в значимое улучшение клинических исходов, что подчеркивает сложность патофизиологических механизмов феномена no-reflow. Современные интегральные шкалы риска обладают лишь умеренной прогностической ценностью, что указывает

на необходимость разработки более точных алгоритмов стратификации риска и поиска новых предикторных биомаркеров для оптимизации персонализированных стратегий профилактики микрососудистых осложнений у пациентов с острым коронарным синдромом с подъемом сегмента ST.

ЛИТЕРАТУРА

1. Паршикова, Е.Н. Смертность от всех причин у пациентов с инфарктом миокарда с подъемом сегмента ST в зависимости от типа реперфузионной терапии (данные Рязанской области, 2018–2020 гг.) / Е.Н. Паршикова, Е.В. Филиппов // Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова. — 2020. — Т. 28, № 4. — С. 479–487.
2. Akbar, H. Acute ST-Segment Elevation Myocardial Infarction (STEMI) / H. Akbar, S. Mountfort. — Текст: электронный // StatPearls [Internet]. — Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2025. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK532281/> (дата обращения: 06.10.2024).
3. Евразийские клинические рекомендации по диагностике и лечению острого коронарного синдрома с подъемом сегмента ST (ОКСпST) / И.И. Староверов, Р.М. Шахнович, М.Ю. Гиляров [и др.] // Евразийский кардиологический журнал. — 2020. — № 1. — С. 4–77.
4. Cobas Paz, R. No-reflow phenomenon in STEMI: beyond a good angiographic result / R. Cobas Paz, B. Caneiro Queija, A. Iñiguez Romo // Revista Española de Cardiología. — 2022. — Vol. 75, № 9. — P. 706–708.
5. Heart Failure After ST-Elevation Myocardial Infarction: Beyond Left Ventricular Adverse Remodeling / M.G. Del Buono, C.M. Garmendia, I.M. Seropian [et al.] // Current Problems in Cardiology. — 2023. — Vol. 48, Issue 8. — P. 101215. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpcardiol.2022.101215>.
6. Сазанов, Г.В. Эндоваскулярная профилактика развития дистальной эмболии в патогенезе развития феномена no-reflow при выполнении чрескожного коронарного вмешательства больным с острым коронарным синдромом с подъемом сегмента ST / Г.В. Сазанов, З.Х. Шугушев // Кардиологический вестник. — 2024. — Т. 19, № 1. — С. 23–28. — DOI: 10.17116/Cardiobulletin20241901123.
7. Клинические факторы, ассоциированные с развитием феномена невосстановленного коронарного кровотока у пациентов с острым коронарным синдромом / Е.В. Константинова, Ю.С. Ильин, А.А. Великоцкий [и др.] // Рациональная Фармакотерапия в Кардиологии. — 2024. — Т. 20, № 1. — С. 27–34. — DOI: 10.20996/1819-6446-2024-2994.
8. Singh, A. Acute Coronary Syndrome / A. Singh, A.S. Museedi, S.A. Grossman. — Текст: электронный // StatPearls [Internet]. — Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2025. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK459157/> (дата обращения: 10.07.2023).
9. Brown, J.C. Risk Factors for Coronary Artery Disease / J.C. Brown, T.E. Gerhardt, E. Kwon. — Текст: электронный // StatPearls [Internet]. — Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2025. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK554410/> (дата обращения: 23.01.2023).
10. Milojevic, M. Decision Making in Patients Undergoing Coronary Artery Revascularization: A New Era in Clinical Trial Design and Evidence-Based Practice / M. Milojevic. — 2019. — 524 p.
11. Клинические факторы, ассоциированные с развитием феномена невосстановленного коронарного кровотока у пациентов с острым коронарным синдромом / Е.В. Константинова, Ю.С. Ильин, А.А. Великоцкий [и др.] // Рациональная фармакотерапия в кардиологии. — 2024. — Т. 20, № 1. — С. 27–34. — DOI: 10.20996/1819-6446-2024-2994.
12. Advancements in Myocardial Infarction Management: Exploring Novel Approaches and Strategies / P. Sachdeva, K. Kaur, S. Fatima [et al.] // Cureus. — 2023. — Vol. 15, № 9. — P. e45578. — DOI: 10.7759/cureus.45578.
13. Шкала оценки риска феномена no-reflow при чрескожных коронарных вмешательствах у пациентов с острым инфарктом миокарда с подъемом сегмента ST / И.С. Бессонов, В.А. Кузнецов, Е.А. Горбатенко [и др.] // Патология кровообращения и кардиохирургия. — 2020. — Т. 24, № 53. — С. 68–76.
14. Do We Need Potent Intravenous Antiplatelet Inhibition at the Time of Reperfusion During ST-Segment Elevation Myocardial Infarction / J. Allencherril, M. Alam, G. Levine [et al.] // Journal of Cardiovascular Pharmacology and Therapeutics. — 2019. — Vol. 24. — P. 107424841881216. — DOI: 10.1177/1074248418812167.
15. Landi, A. Novel Global Platelet Reactivity Biomarker for a More Precise Ischemic Risk Stratification / A. Landi, M. Valgimigli // Circulation: Cardiovascular Interventions. — 2025. — Vol. 18, № 4. — P. e015282.
16. Koziol, K. TRITON-TIMI 38: Prasugrel EFFIENT vs Clopidogrel PLAVIX in Patients with ACS. TRIal to Assess Improvement in Therapeutic Outcomes by Optimizing Platelet Inhibition with Prasugrel — Thrombolysis In Myocardial Infarction / K. Koziol, L. Kosar // RxFiles Trial Summary. — March 2016. — P. 1.
17. No Reflow Phenomenon in ST-segment elevation myocardial infarction (STEMI) / R. Padmakumar, M. Rao, K. Nayak [et al.] // European Chemical Bulletin. — 2023. — Vol. 10. — P. 2387–2410. — DOI: 10.48047/ecb/2023.12.10.1652023.03/07/2023.
18. Feng, X.-M. Adenosine as an Adjunctive Therapy for Acute Myocardial Infarction Undergoing Primary Percutaneous Coronary Intervention: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials / X.-M. Feng, W.-H. Zhang, J. Liu // Rev. Cardiovasc. Med. — 2025. — Vol. 26, № 2. — P. 24065. — DOI: <https://doi.org/10.31083/RCM24065>.
19. Pathophysiology and Treatment of the No-Reflow Phenomenon in ST-Segment Elevation Myocardial Infarction: Focus on Low-Dose Fibrinolysis during Primary Percutaneous Intervention / F. Pelliccia, G. Niccoli, M. Zimarino [et al.] // Rev Cardiovasc Med. — 2023. — Vol. 24, № 12. — P. 365. — DOI: 10.31083/j.rcm2412365.
20. Manolis, A.S. Thrombus Aspiration in Acute Myocardial Infarction: A Long-Awaited Resurgence? / A.S. Manolis, T.A. Manolis // Angiology. — 2022. — Vol. 74, № 6. — P. 598–599. — DOI: 10.1177/00033197221121003.

21. Pradhan, A. Deferred Stenting for Heavy Thrombus Burden During Percutaneous Coronary Intervention for ST-Elevation MI / A. Pradhan, M. Bhandari, P. Vishwakarma, R. Sethi // *European Cardiology Review*. — 2021. — Vol. 16. — P. e08. — DOI: <https://doi.org/10.15420/scr.2020.31>.
22. Immediate vs Delayed Stenting in ST-Elevation Myocardial Infarction: Rationale and Design of the International PRIMACY Bayesian Randomized Controlled Trial / E.M. Jolicœur, N. Dendukuri, P. Belisle [et al.] // *Canadian Journal of Cardiology*. — 2020. — Vol. 36, Issue 11. — P. 1805–1814. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjca.2020.01.019>.
23. Мазнев, Д.С. Мануальная тромбаспирация как метод профилактики феномена no-reflow / Д.С. Мазнев, С.А. Болдуева, И.А. Леонова // *Дальневосточный медицинский журнал*. — 2019. — № 4. — С. 81–85.
24. Meta-Analysis of the Long-Term Effect of Routine Aspiration Thrombectomy in Patients Undergoing Primary Percutaneous Coronary Intervention / J. Mancini, K. Filion, S. Windle [et al.] // *The American Journal of Cardiology*. — 2016. — Vol. 118. — DOI: [10.1016/j.amjcard.2016.04.008](https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2016.04.008).
25. Association of Physician Variation in Use of Manual Aspiration Thrombectomy With Outcomes Following Primary Percutaneous Coronary Intervention for ST-Elevation Myocardial Infarction: The National Cardiovascular Data Registry CathPCI Registry / E. A. Secemsky, E. G. Ferro, S. V. Rao [et al.] // *JAMA Cardiol*. — 2019. — Vol. 4, № 2. — P. 110–118. — DOI: [10.1001/jamacardio.2018.4472](https://doi.org/10.1001/jamacardio.2018.4472).
26. State of the Art of Primary PCI: Present and Future / A. Mignatti, J. Echarte-Morales, M. Sturla, A. Latib // *J Clin Med*. — 2025. — Vol. 14, № 2. — P. 653. — DOI: [10.3390/jcm14020653](https://doi.org/10.3390/jcm14020653).
27. Natural history of coronary stents: 14 year follow-up of drug eluting stents versus bare metal stents / A. Valaparambil, B. Sasidharan, H. Sivasapillai, J.V. Thulaseedharan // *Indian Heart Journal*. — 2023. — Vol. 75, Issue 6. — P. 457–461. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ihj.2023.11.001>.
28. Alqawasmī, M. Bivalirudin Versus Heparin in Primary PCI for STEMI / M. Alqawasmī, J.C. Blankenship // *Cardiovascular Drugs and Therapy*. — 2025.
29. Meta-Analysis on the Efficacy of High-Dose Statin Loading Before Percutaneous Coronary Intervention in Reducing No-Reflow Phenomenon in Acute Coronary Syndrome / S. Anayat, K. Majid, H. S. Nazir [et al.] // *Am J Cardiol*. — 2023. — Vol. 195. — P. 9–16. — DOI: [10.1016/j.amjcard.2023.02.024](https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2023.02.024).
30. Sodium-glucose cotransporter-2 inhibitors in individuals with ischemia reperfusion injury: A systematic review / H. Behzad, H. Asham, S. Beheshtirouy [et al.] // *Perfusion*. — 2025. — Vol. 40, № 3. — P. 701–710. — DOI: [10.1177/02676591241257371](https://doi.org/10.1177/02676591241257371).
31. Сазанов Г.В., Шугушев З.Х., Белоконов О.С. и др. Бужирование инфаркт связанной коронарной артерии как метод снижения частоты встречаемости феномена no-reflow у пациентов с острым коронарным синдромом с подъемом сегмента ST. *Инновационная медицина Кубани*. 2023;(3):54–61. <https://doi.org/10.35401/2541-9897-2023-26-3-54-61>
32. Фролов А.А., Починка И.Г., Фролов И.А. и др. Синдром коронарной микрососудистой обструкции при чрескожных коронарных вмешательствах у пациентов с инфарктом миокарда: комплексный подход к профилактике и лечению. *Патология кровообращения и кардиохирургия*. 2024;28(3):64–77. <https://doi.org/10.21688/1681-3472-2024-3-64-77>

© Сазанов Григорий Вячеславович (mc_sagr@mail.ru); Айдемиров Артур Насирович (aaidemirov@mail.ru);

Сапельников Олег Валерьевич (sapelnikovov@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ БИОМАРКЕРОВ СЫВОРОТКИ У ПАЦИЕНТОВ С ГИПЕРТЕНЗИВНОЙ И ИШЕМИЧЕСКОЙ КАРДИОПАТОЛОГИЕЙ¹

PROGNOSTIC VALUE OF SERUM BIOMARKERS IN PATIENTS WITH HYPERTENSIVE AND ISCHEMIC CARDIOPATHOLOGY

**T. Khokonova
Z. Kharaeva
D. Sokhroкова
S. Solyanik
N. Sokhroкова**

Summary. This study addresses the urgent problem of cardiovascular system pathologies, which remain the leading cause of mortality. The aim of the work was to study biomarkers of N-acetyl-beta-D-glucosaminidase (NAG), tissue inhibitor of matrix proteinases-1 (TIMP-1) and proMMP1 in patients with arterial hypertension and ischemic heart disease, including cases with atherosclerosis. The study was performed on a sample of 120 patients, distributed into 4 groups according to diagnoses, and a control group of 20 healthy individuals. The concentrations of biomarkers were determined in blood serum by enzyme immunoassay. The results demonstrated a statistically significant increase in the level of TIMP-1 in patients of all clinical groups compared with controls, as well as a significant increase in NAG in patients with CHD and postinfarction atherosclerosis. It was found that inflammatory and cytolytic markers take part in the development of arterial hypertension, and their concentration increases with the accession of cardiovascular complications. N-acetyl-beta-D-glucosaminidase activity in dynamics reflects the degree and depth of myocardial fibrotic changes, which allows us to recommend this index as an objective biochemical test to assess the degree of cardiac damage in clinical practice.

Keywords: coronary heart disease, arterial hypertension, heart failure, atherosclerosis, NAG, TIMP1, proMMP1.

Хоконова Тамара Муратовна

кандидат медицинских наук,
ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова»
tomek83@mail.ru

Хараева Заира Феликсовна

доктор медицинских наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова»
irafe@yandex.ru

Сохрокова Дисана Муратовна

Ассистент, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский
государственный университет им. Х.М. Бербекова»
dsohrokova@yandex.ru

Соляник Светлана Сергеевна

старший преподаватель,
ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова»
sveta071990@gmail.com

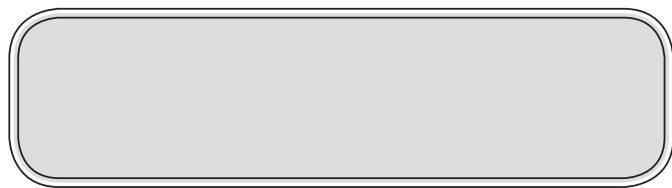
Сохрокова Наина Муратовна

Ординатор,
ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова» (КБГУ)
nsokhroкова@gmail.com

Аннотация. В данном исследовании рассматривается актуальная проблема патологий сердечно-сосудистой системы, остающихся ведущей причиной летальности. Целью работы являлось изучение биомаркеров N-ацетил-бета-Д-глюкозаминидазы (NAG), тканевого ингибитора матриксных протеиназ-1 (TIMP-1) и проMMP1 у пациентов с артериальной гипертензией и ишемической болезнью сердца, включая случаи с атеросклерозом. Исследование проведено на выборке из 120 пациентов, распределенных на 4 группы в соответствии с диагнозами, и контрольной группе из 20 здоровых лиц. Концентрации биомаркеров определялись в сыворотке крови методом иммуноферментного анализа. Результаты продемонстрировали статистически значимое повышение уровня TIMP-1 у пациентов всех клинических групп по сравнению с контролем, а также достоверное увеличение NAG у больных с ИБС и постинфарктным атеросклерозом. Установлено, что воспалительные и цитолитические маркеры принимают участие в развитии артериальной гипертензии, а их концентрация возрастает при присоединении кардиоваскулярных осложнений. Активность N-ацетил-бета-Д-глюкозаминидазы в динамике отражает степень и глубину фиброзных

¹ Финансирование. Исследование проведено в рамках ГЗ FZZR-2023–0005. Финансовой поддержки со стороны компаний-производителей использованных в исследовании материалов и медицинского оборудования авторы не получали.

Благодарность: авторы выражают благодарность Хамизовой Мадине Маковне — заведующей кардиологическим отделением ГБУЗ ГКБ №1 города Нальчика; Уметову Мурату Анатольевичу — заведующему кафедрой факультетской терапии медицинской академии КБГУ; руководству и сотрудникам ГБУЗ «Городская поликлиника №1» города Нальчика, в частности главному врачу Каскуловой Аулият Фуадовне и заместителю главного врача Сижажевой Софиат Хасеновне.



Введение

Во многих крупномасштабных исследованиях продемонстрирована тесная корреляция между увеличенными показателями провоспалительных цитокинов и развитием и прогрессированием СН и ее исходами [1, 2, 3]. Следует полагать, что различные воспалительные процессы могут быть вовлечены в механизмы формирования ишемической и гипертензивной СН [4, 5]. В этой связи, особенно актуальным представляется исследование активности сывороточных регуляторных медиаторов пациентов с сердечно-сосудистой патологией, в частности — с АГ и ИБС с кардиосклеротическими изменениями.

Одной из представителей гидролаз, являющихся гидролитическими ферментами лизосом, считают N-ацетил-бета-Д-глюкозаминидазу (NAG). NAG (К.Ф.3.2.1.30) — фермент лизосом тубулярного нефрона, маннозосодержащий кислый гликопротеид, первоначально описан Conchie et al. в 1959 году. Ранее изучалось изменение активности фермента у крыс, которая претерпевает изменения при различных патологических состояниях. Определена увеличенная активность NAG в сыворотке больных с варикозом вен, инсулинзависимым сахарным диабетом, патологией щитовидной железы. У лиц, страдающих гипертонической болезнью, в сочетании с ишемической болезнью сердца, атеросклерозом сосудов и у ревматологических больных активность оказалась значительно снижена [6]. Молекулярная масса NAG 140–160 кД. В тканях и биологических жидкостях встречается в двух главных молекулярных изоформах NAG-A и NAG-B [7]. Однако в литературе практически отсутствуют данные о вариациях данного биомаркера в сыворотке крови у коморбидных пациентов, в частности страдающих АГ, ИБС, ПИК.

Ввиду этого, было сочтено возможным провести исследование активности N-ацетил-бета-Д-глюкозаминидазы у пациентов с патологией сердечно-сосудистой системы, поскольку фермент может служить маркером глубины цитолитического процесса в системе кардио-эндотелиального континуума.

Тканевой ингибитор матриксных протеиназ-1 (TIMP-1) — гликопротеин массой 28 кДа с множественными дисульфидными мостиками, относят к специфичному ингибитору коллагеназ, однако он ингибирует и другие

изменений миокарда, что позволяет рекомендовать данный показатель в качестве объективного биохимического теста для оценки степени кардиального поражения в клинической практике.

Ключевые слова: ишемическая болезнь сердца, артериальная гипертензия, сердечная недостаточность, кардиосклероз, NAG, TIMP1, proMMP1.

MMPs [8]. В норме TIMP-1 синтезируется преимущественно в яичниках и костях, в клетках трофобласта. Его незначительная экспрессия обнаружена в клетках большинства типов. Экспрессия TIMP-1 индуцируется в том числе в ответ на стимуляцию основного фактора роста фибробластов. TIMP-1 является растворимым белком и локализуется во внеклеточном пространстве [9]. Описана антиапоптотическая активность данного белка. TIMP-1 является модулятором роста эндотелиальных клеток, а также одним из маркеров деградации внеклеточного матрикса и смертности от ССЗ [10]. В этой связи для более детального изучения вариабельности данного маркера, а также для изучения возможных корреляционных взаимосвязей его вместе с вышеупомянутыми показателями, было проведено настоящее исследование.

Известно, что матриксные металлопротеиназы (ММП) выделяются из клеток в неактивной форме — в виде проферментов (proMMP), активация которых происходит под действием активных ММП человека и протеиназ бактерий. В то же время протеолиз угнетается с помощью белков — ингибиторов протеиназ, в частности, тканевого ингибитора ММП1 (TIMP1) [11, 12]. По данным литературы, динамика соотношения протеолитических ферментов и их ингибиторов при различных сердечно-сосудистых заболеваниях ранее не исследовалась. Поэтому представляет интерес сравнительный анализ содержания proMMP1 и ингибиторов протеиназ в плазме крови у пациентов с ишемической болезнью сердца и артериальной гипертензией, перенесших коронавирусную инфекцию.

Цель работы: исследование биомаркеров N-ацетил-бета-Д-глюкозаминидазы, тканевого ингибитора матриксных протеиназ-1 и proMMP1 у пациентов с артериальной гипертонией и ишемической болезнью сердца, в том числе с кардиосклерозом.

Материалы и методы

Объектом исследования служили пациенты, проходившие лечение в кардиологическом отделении ГБУЗ «Городская клиническая больница» города Нальчика Кабардино-Балкарской Республики, а также амбулаторные больные, наблюдавшиеся в ГБУЗ «Городская поликлиника №1» города Нальчика. Исследование проведено в период с 2015 по 2023 годы. Критериями включения пациента в 1 группу были следующие: АГ 1 и 2 степени,

возраст от 45 до 70 лет, длительность АГ не более 10 лет, отсутствие регулярной антигипертензивной терапии. Критериями включения пациента во 2 группу были следующие: наличие ИБС, возраст от 45 до 70 лет, длительность не более 10 лет, антиангинальная терапия. Критериями включения пациента в 3 группу были следующие: наличие ИБС с кардиосклерозом, антиангинальная терапия, возраст от 45 до 70 лет. Для группы контроля отобраны пациенты, которые по данным обследования (общеклиническое обследование, биохимическое исследование крови, специальные (опросные), статистические, а также методы сравнительного и системного анализа) были признаны практически здоровыми.

Всего обследовано 90 пациентов (40 мужчин и 50 женщин, средний возраст 53 ± 10 лет, разделенных на 3 группы (АГ, ИБС, ИБС+ПИК). Первую группу составили 30 пациентов с АГ 1 и 2 степени (13 мужчин и 17 женщин, средний возраст 54 ± 10). Вторую группу составили 32 больных с ИБС (14 мужчин и 18 женщин, средний возраст 55 ± 9). Третью группу составили 28 пациентов с ИБС и ПИК (13 мужчин и 15 женщин, средний возраст 53 ± 11). Контрольную группу составили 20 соматически здоровых лиц (10 мужчин, 10 женщин, средний возраст 55 ± 10 лет). Все пациенты подписали информированное согласие на участие в исследовании. Критерии исключения: в обследование не включали больных с уровнем гликозилированного гемоглобина более 10 %, анемией, почечной недостаточностью, недавними (до 10 суток) эпизодами острой СН, острым коронарным синдромом в течение предшествующих 3 мес, воспалительными заболеваниями в стадии обострения, пароксизмальными тахикардиями, окклюзирующими заболеваниями сосудов нижних конечностей. В комплекс инструментальных методов входили: рентгенография органов грудной клетки с верификацией признаков венозного застоя в легких, эхокардиография, тест 6-минутной ходьбы, электрокардиография.

Биомаркеры N-ацетил-бета-Д-глюкозаминидаза (NAG), тканевой ингибитор матриксных протеиназ-1 (TIMP1) определяли в сыворотке крови иммуноферментным методом с помощью тест-систем фирмы «Вектор-Бест» (Россия).

Статистическую обработку проводили с использованием пакета прикладных программ Statistica 10.0. Рассчитывали средние арифметические и среднеквадратичные отклонения исследуемых величин и ошибки репрезентативности. Нормальное распределение полученных данных представлялось в виде $M \pm m$, где M — средняя арифметическая исследуемых величин, m — ошибка репрезентативности. Разницу показателей в группах оценивали по t-критерию Стьюдента. Критическим считался уровень значимости различия $p=0,05$.

Результаты и обсуждение

При исследовании цитокинов у больных в группах было выявлено, что у пациентов всех групп отмечалось выраженное статистически значимое повышение показателей TIMP1 и proMMP1 в сравнении с показателями контрольной группы ($p<0,001$) (таблица 1).

При оценке показателей NAG в группах было выявлено, что у больных с ИБС, ИБС с ПИК (2-я, 3-я группы соответственно) отмечались более высокие показатели NAG ($5,5 \pm 0,8$ пг/мл — во 2-й группе, $5,7 \pm 1,2$ пг/мл — в 3-й группе соответственно), по сравнению с контрольной группой сравнения ($2,8 \pm 0,6$ пг/мл) ($p<0,001$) и с пациентами с АГ из 1-й группы ($2,1 \pm 0,4$ пг/мл) ($p<0,05$; $p<0,001$) (таблица 1, рисунок 1).

При оценке значений TIMP1 в группах было выявлено, что у больных с АГ и ИБС с ПИК (1-я, 3-я группы соответственно) эти показатели были наибольшими ($225 \pm 7,4$ пг/мл — в 1-й группе, и $378 \pm 8,4$ пг/мл — в 3-й группе), по сравнению с контрольной группой сравнения ($167 \pm 9,8$ пг/мл) ($p<0,001$) и с пациентами с ИБС без ПИК из 2-й группы ($173 \pm 7,9$) ($p<0,001$) (таблица 1, рисунок 2).

Известно, что тканевые ингибиторы металлопротеиназ связываются с молекулой активного фермента в соотношении 1:1 [13, 14]. На основании этого с учетом молекулярной массы TIMP1 и proMMP1 рассчитано молярное соотношение этих белков в сыворотке, характеризующее потенциальную ингибиторную способность. Соотношение TIMP1/ proMMP1 у пациентов с ИБС, в сочетании с ПИК существенно ниже (таблица 1).

В результате нашего исследования выявлено, что у больных в группах наблюдалось достоверное увеличение параметра proMMP1 в сравнении с группой контроля ($p<0,01$), (таблица 1).

Однако, у пациентов с АГ и ИБС, в том числе с кардиосклерозом, увеличение данного параметра было наибольшим ($p<0,001$); (таблица 1), что, вероятно, свидетельствует о продолжающемся хроническом воспалении, аггравирующим при нарастании сердечной недостаточности.

На фоне снижения количества proMMP1 у пациентов с АГ, отражающего уровень экспрессии гена данной металлопротеиназы, возрастало содержание TIMP1, а у пациентов с ИБС молярное соотношение TIMP1/ proMMP1 было наименьшим.

Выводы

1. Показатель биомаркера N-ацетил-бета-Д-глюкозаминидазы был достоверно выше в группах

Таблица 1.

Показатели уровней NAG, TIMP1, proMMP1 у пациентов в группах

Показатель Indicator	1-я группа АГ n=30 1st group АН n=30	2-я группа ИБС n=32 2nd group CHD n=32	3-я группа ИБС+ПИК n=28 3rd group CHD+PIC n=28	Группа здоровых n=20 5th group (healthy) n=20
N-ацетил-бета-Д-глюкозаминидаза (пг/мл) N-acetyl-beta-D-glucosaminidase (pg/ml)	2,1±0,4	5,5±0,8*#	5,7±1,2*##	2,8±0,6
Тканевой ингибитор матриксных протеиназ-1 (пг/мл) Tissue inhibitor of matrix proteinases-1 (pg/ml)	225±7,4*ss	173±7,9	378±8,4*ss	167±9,8
Предшественник матриксной металлопротеиназы-1 (proMMP1) (пг/мл) Pro-matrix Metalloproteinase 1 (Pro-MMP-1) (pg/ml)	3100±87,8**	3300±102,9**	5800±109,6*# ^s	2100±40,4
Молярное соотношение TIMP1/ proMMP1 Molar ratio TIMP1/ proMMP1	0,073	0,053	0,065	0,080

Примечание: * — различия достоверны по отношению к показателям группы сравнения — здоровых (p<0,001);

** — различия достоверны по отношению к показателям группы сравнения — здоровых (p<0,01);

— различия достоверны по отношению к показателям 1-й группы — пациентов с АГ (p<0,05);

— различия достоверны по отношению к показателям 1-й группы — пациентов с АГ (p<0,001);

^s — различия достоверны по отношению к показателям 2-й группы — пациентов с ИБС (p<0,01)

^{ss} — различия достоверны по отношению к показателям 2-й группы — пациентов с ИБС (p<0,001)

Note: * — the differences are significant in relation to the indicators of the comparison group — healthy (p0,001);

** — the differences are significant in relation to the indicators of the comparison group — healthy (p0,01);

— the differences are significant in relation to the indicators of group 1 — patients with hypertension (p0,05);

— the differences are significant in relation to the indicators of group 1 — patients with hypertension (p0,001);

^s — differences are significant in relation to the indicators of group 2 — patients with coronary heart disease (p0,01)

^{ss} — differences are significant in relation to the indicators of group 2 — patients with coronary heart disease (p0,001)

пациентов ишемической болезнью сердца по сравнению с группой контроля. Однако наиболее высоким он был в группах больных с ишемической болезнью сердца, сопровождающейся кардиосклеротическим поражением миокарда, в том числе после перенесенной коронавирусной инфекции.

- Показатель тканевого ингибитора матриксных протеиназ-1 был достоверно выше в группах пациентов с артериальной гипертензией и ишемической болезнью сердца, сопровождающейся кардиосклеротическим поражением миокарда, в том числе после перенесенной коронавирусной инфекции, по сравнению с группой здоровых лиц.
- Результаты исследования содержания proMMP1 в сыворотке крови у больных в группах продемонстрировали достоверное увеличение данного параметра в сравнении с группой здоровых. Однако, у пациентов с АГ и ИБС, в том числе в постковидном периоде, наблюдалось наибольшее увеличение данного параметра что, вероятно, связано с продолжающимся хроническим воспалением, прогрессирующим вследствие раннее перенесенной коронавирусной инфекции.

Изучение активности фермента N-ацетил-бета-Д-глюкозаминидазы в динамике позволяет определить степень и глубину разрастания соединительной ткани. Исходя из полученных данных, можно сказать, что высокая активность данного биомаркера при наличии кардио-эндотелиальной дисфункции отражает наличие и степень цитолитического процесса, возрастание которого обуславливает увеличение и разрастание соединительной ткани (в случае с больными ИБС — глубины и тяжести кардиосклеротического поражения). Тем самым подтверждается имевшее место в литературе доказательство изменения согласованной деятельности лизосомальных гидролаз, уровень которых характеризует наличие, степень выраженности и динамику обмена основного вещества соединительной ткани. Определение активности N-ацетил-бета-Д-глюкозаминидазы может быть рекомендовано в качестве объективного биохимического теста в клинической практике, в частности для оценки степени кардиального поражения.

Достоверное увеличение тканевого ингибитора матриксных протеиназ-1 у пациентов с артериальной гипертензией и ишемической болезнью сердца, сопро-

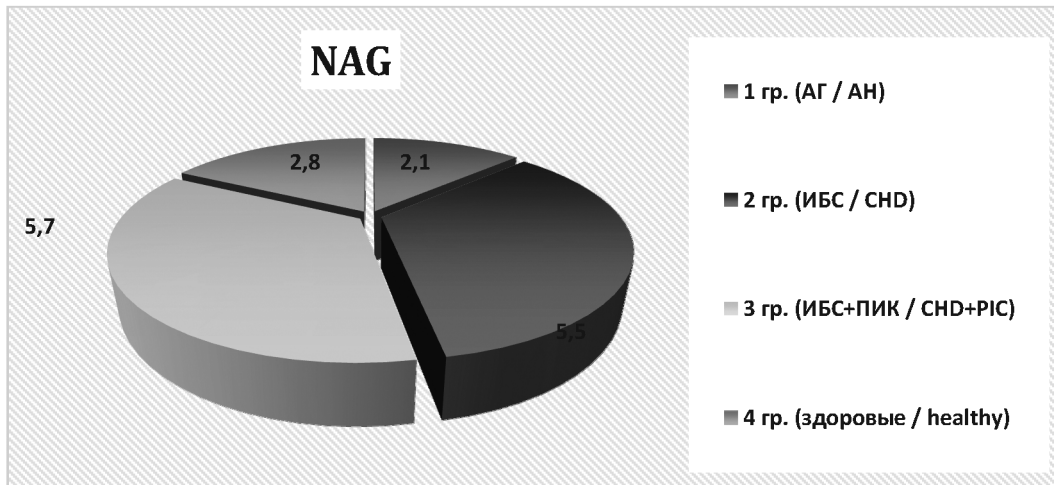


Рис. 1. Анализ уровня NAG у пациентов в группах

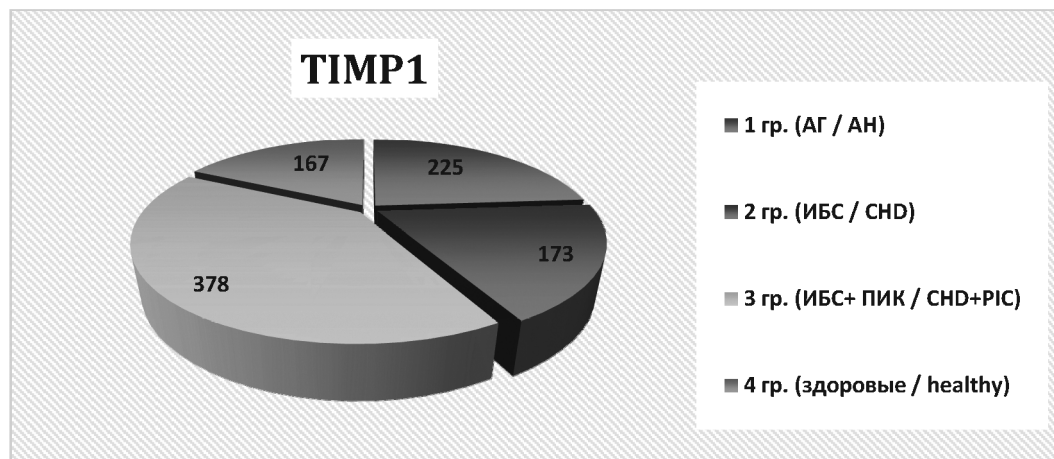


Рис. 2. Анализ уровня TIMP1 у пациентов в группах

вождающейся кардиосклеротическим поражением миокарда по сравнению с контрольной группой, обусловлено высокой активностью деструктивных процессов во внеклеточном матриксе при постинфарктном кардиосклерозировании. При этом, перенесенная коронавирусная инфекция усугубляет эти изменения, что требует дальнейшего изучения путем проведения соответствующих исследований с проспективного анализа.

Таким образом, различная выраженность коллагенолитических процессов у пациентов сравниваемых групп свидетельствует об участии нарушения структуры вне-

клеточного матрикса в развитии данных патологических состояний.

Изучение показателей системы матриксных металлопротеиназ и их ингибиторов является актуальной и клинически значимой задачей в связи с возможностью их использования с диагностической и прогностической целью не только при онкологических и воспалительных заболеваниях, но и в качестве ранних маркеров выявления атеросклеротических заболеваний сосудов и миокардитов различной этиологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мареев В.Ю., Беленков Ю.Н. Принципы рационального лечения сердечной недостаточности. Media Medica. 2000;266
2. Moore C.S., Crocker S.J. An alternate perspective on the roles of TIMPs and MMPs in pathology. Am. J. Pathol. 2012;180(1):12–16.
3. Myrianthefs P.M., Lazaris N., Venetsanou K. et al. Immune status evaluation of patients with chronic heart failure. Cytokine. 2007;(2):150–154.
4. Камышников В.С. Методы клинических лабораторных исследований. Москва. МедПресс-Информ. 2020;11:109
5. Oikonomou E., Tousoulis D., Siasos G. et al. The role of inflammation in heart failure: new therapeutic approaches. Hellenic J. Cardiol. 2011;52(1):30–40.
6. Мясоедова Е.И. Содержание матриксной металлопротеиназы-1 и ее ингибитора у пациентов с ишемической кардиомиопатией. Вестник новых медицинских технологий. 2016;23(4):50–53.
7. Olshevsky A.Yu., Shostak V.B., McCully K.S. Plasma glucosamine and galactosamine in ischemic heart disease. Atherosclerosis. 1990;82:75–83 DOI: 10.1016/0021-9150(90)90146-a.

8. А.Т. Тепляков, А.В. Андриянова, Е.Ю. Пушникова [и др.]. Тканевой ингибитор матричных металлопротеиназ-1 (TIMP-1) как независимый маркер ишемического ремоделирования миокарда при хронической сердечной недостаточности. Сибирский медицинский журнал. 2014;29(2):28–34.
9. Мельник А.А. Диагностическая роль п-ацетил-b-d-глюкозаминидазы как раннего маркера повреждения почек. Почки. 2016;4(18):34–47.
10. Arpino V, Brock M., Gill S.E. The role of TIMPs in regulation of extracellular matrix proteolysis. Matrix Biol. 2015;44-46:247–254.
11. Zachariah J.P, Colan S.D., Lang P et al. Circulating matrix metalloproteinases in adolescents with hypertrophic cardiomyopathy and ventricular arrhythmia. Circulation: Heart Failure. 2012; 5(4):462–466. DOI: 10.1161/CIRCHEARTFAILURE.111.966200.
12. DeLeon-Pennell K.Y., Meschiari C.A., Jung M., Lindsey M.L. Matrix metalloproteinases in myocardial infarction and heart failure. Progress in Molecular Biology and Translational Science. 2017;147:75–100. DOI: 10.1016/bs.pmbts.2017.02.001.
13. Deepe R., Fitzgerald E., Wolters R. et al. The mesenchymal cap of the atrial septum and atrial and atrioventricular septation. Journal of Cardiovascular Development and Disease. 2020; 7(4):50. DOI: 10.3390/jcdd7040050.
14. Л.Б. Ким, Г.С. Русских, А.Н. Путятина, О.Б. Цыпышева. Возрастная динамика содержания матричных металлопротеиназ (ММП-1, -2, -3, -9) и тканевых ингибиторов матричных металлопротеиназ (ТИМП-1, -2, -4) в плазме крови у жителей Европейской части Арктической зоны Российской Федерации. Успехи геронтологии. 2018;31(2)223–230.

© Хоконова Тамара Муратовна (tomek83@mail.ru); Хараева Заира Феликсовна (irafe@yandex.ru);
Сохрокова Дисана Муратовна (dsohrokoba@yandex.ru); Соляник Светлана Сергеевна (sveta071990@gmail.com);
Сохрокова Наина Муратовна (nsokhroкова@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

Наши авторы

Afanasyev G. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, BMSTU

Alekseeva N. — Candidate of Veterinary Sciences, Associate Professor, Donbass Agrarian Academy

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»

Asriyan A. — Postgraduate Student, Federal State Budgetary Institution Federal Bureau of Medical and Social Expertise of the Ministry of Labor and Social Protection of the Russian Federation

Aydemirov A. — Dr. Sci. (Med.), Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Stavropol State Medical University» of the Ministry of Health of the Russian Federation; Stavropol Regional Clinical Hospital

Besklubnaya A. — Candidate of Pedagogical Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering»

Biryukov V. — Graduate student, Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

Bushmanov A. — Ph.D., Associate Professor, Amur State University, Blagoveshchensk,

Buzyrev I. — Bauman Moscow State Technical University

Danilov A. — Assistant, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Dolzhanov P. — Candidate of Veterinary Sciences, Donbass Agrarian Academy

Dronov A. — postgraduate student, MSUT «STANKIN» (Moscow)

Dumachev A. — Ryazan State Medical University named after academician I.P. Pavlov, Ministry of Health of the Russian Federation

Fatenkov O. — MD, Associate Professor, Samara State Medical University Ministry of Health of the Russian Federation

Fokina N. — Postgraduate student, First Moscow State Medical University I.M. Sechenov (Sechenov University)

Our authors

Fomichev S. — Postgraduate student, Moscow Finance and Law University MFUA

Gapanyuk Yu. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, BMSTU

Golovko M. — candidate of pedagogical sciences, associate professor, Almetyevsk branch of the Federal State Budgetary Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI

Gorpinich A. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «State University of Education», Moscow

Goryachkin B. — PhD, Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University

Gresyuk A. — Candidate of Science, assistant professor, Ukhta State Technical University,

Grinev A. — PhD, First Moscow State Medical University I.M. Sechenov (Sechenov University)

Gromozdov D. — postgraduate student, BMSTU

Hejjo Muhsen — PhD student of Kazan Federal University

Idrisov R. — Assistant, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Ilyin I. — Postgraduate student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Moscow State Technological University Stankin»

Kapralov S. — Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Kashikhin A. — Private University «Reaviz», Saint Petersburg

Kasyanov A. — Postgraduate student, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»; Researcher at the Cryptographic Analysis Department, Special Technology Center (STC LLC), Saint Petersburg, Russia

Kazarezov A. — Postgraduate, Novosibirsk State Technical University

Kharaeva Z. — Doctor of Medical Sciences, Professor, FSBEI HE «Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov»

Khokonova T. — MD-PhD, FSBEI HE «Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov»

Klimashevich V. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Koroleva Yu. — independent researcher

Kozhevnikova P. — Candidate of Science, assistant professor, Ukhta State Technical University

Kuchmezov Kh. — PhD in Economics, Financial University under the Government of the Russian Federation

Kuntsev V. — Candidate of Science, assistant professor, Ukhta State Technical University

Larichkin V. — Ph.D. (Engineering) Professor, Novosibirsk State Technical University (NSTU)

Lesovik V. — Candidate of Medical Sciences, Surgeon, Ryazan State Medical University named after academician I.P. Pavlov, Ministry of Health of the Russian Federation

Logachev M. — PhD in Technology, Moscow Polytechnic University

Lozhkova A. — Postgraduate Student, Amur State University, Blagoveshchensk

Malyavin M. — Postgraduate student, Moscow Institute of Information Technology and Moscow Architectural and Construction Institute (MASI)

Martynov A. — MD, PhD, Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of the Peoples' Friendship University of Russia Patrice Lumumba, Moscow, Russia

Maskov G. — Ufa state petroleum technological university

Maslyakov V. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Mironenko O. — Senior lecturer, Donbass Agrarian Academy

Mironov A. — Candidate of Medical Sciences, Samara State Medical University Ministry of Health of the Russian Federation

Morugin S. — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev

Muravyova E. — d.t.s., professor, Ufa state petroleum technological university

Myakotnykh M. — Candidate of Medical Sciences, Samara State Medical University Ministry of Health of the Russian Federation

Nazarova N. — candidate of biological sciences, associate professor, Almetyevsk branch of the Federal State Budgetary Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

Netskina A. — Assistant, Ryazan State Medical University named after academician I.P. Pavlov, Ministry of Health of the Russian Federation

Parabina E. — Candidate of Medical Sciences, Assistant, Samara State Medical University Ministry of Health of the Russian Federation

Pavlov S. — National Research University of Electronic Technology (MIET), Zelenograd

Petrunkin R. — Private University «Reaviz», Saint Petersburg

Polidanov M. — research department specialist, assistant, Private University «Reaviz», Saint-Petersburg

Polyakov M. — Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Pirogov Russian National Research Medical University» of the Ministry of Health of the Russian Federation

Rubtsov A. — Systems Analyst, Innotech Group; PhD student, National Research Nuclear University MEPhI

Sakash I. — Cand. Sci. (Eng.), Krasnoyarsk State Agrarian University

Sapelnikov O. — Dr. of Sci. (Med.), Chief Researcher, Laboratory of Surgical and X-Ray Surgical Methods for the Treatment of Cardiac Arrhythmias, Department of Cardiovascular Surgery, E.I. Chazov National Medical Research Centre of Cardiology, Moscow, Russian Federation

Sazanov G. — Interventional Radiologist, Division of Image-Guided Diagnosis and Surgery, Stavropol Regional Clinical Hospital

Serpukhin D. — Ryazan State Medical University named after academician I.P. Pavlov, Ministry of Health of the Russian Federation

Sheyko E. — V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

Shihaleva O. — V.I. Vernadsky Crimean Federal University; Simferopol

Sitnikov A. — Postgraduate Student, Bunin Yelets State University

Sokhroкова D. — Assistant, FSBEI HE «Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov»

Sokhrokov N. — Orthodontics, FSBEI HE «Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov»

Sokurov A. — Doctor of Medical Sciences, Director of the Institute of Early Care and Follow-up of the G.A. Albrecht Federal State Budgetary Scientific Research Center of the Ministry of Labor of the Russian Federation

Solyanik S. — Senior Assistant, FSBEI HE «Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov»

Svetlova G. — Candidate of Medical Sciences, Samara State Medical University Ministry of Health of the Russian Federation

Sytnikov D. — Sevastopol State University, Sevastopol

Tarasenko S. — Ph. D. (Technology), Academy of the Federal Guard Service of Russian Federation

Terekhov V. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, BMSTU

Tyryshkin S. — Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Altay State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul

Uldiyarov S. — Master of Treatment Facilities, JSC «Almetyevsk-Vodokanal»

Vishnevetskaya V. — Postgraduate student, Military Medical Academy named after S.M. Kirov

Volkov K. — Laboratory Assistant, N.G. Chernyshevsky Saratov National Research State University; Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Yaya L. — PhD Student, Federal State Budgetary Educational Institution of the Peoples' Friendship University of Russia Patrice Lumumba, Moscow, Russia

Yunikov S. — Bauman Moscow State Technical University

Zaitsev O. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Ryazan State Medical University named after academician I.P. Pavlov, Ministry of Health of the Russian Federation

Zapariy N. — MD, Doctor of Medical Sciences, Head of the Educational and Organizational Department of the Educational and Methodological Center of the Federal State Budgetary Institution Federal Bureau of Medical and Social Expertise of the Ministry of Labor and Social Protection of the Russian Federation

Zhang Che — Postgraduate student, BMSTU

Zhen A. — Bauman Moscow State Technical University

Zhovnovatyi K. — Graduate student, The Kosygin Russian State University

Zubarev M. — Assistant, graduate student, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

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).