ISSN 2223–2966

СОВРЕМЕННАЯ НАУКА:
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 8 2026 (АВГУСТ)

Учредитель журнала
Общество с ограниченной ответственностью
«НАУЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Журнал издается с 2011 года.

Редакция:

Главный редактор
А.В. Царегородцев

Выпускающий редактор
Ю.Б. Миндлин

Верстка
М.А. Комарова

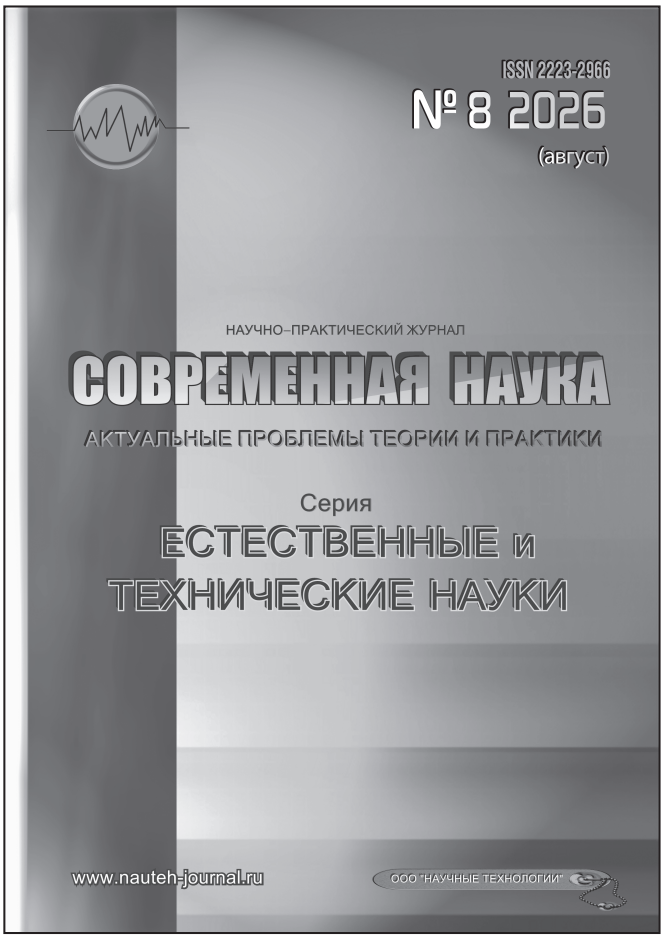
Подписной индекс издания
в каталоге агентства «Пресса России» — 80016

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

Научно-практический журнал

Scientific and practical journal

(ВАК — 1.1.2, 1.5.x, 2.3.x, 3.1.x)



В НОМЕРЕ:

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

Издатель:
Общество с ограниченной ответственностью
«Научные технологии»

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

Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия.
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-44912 от 04.05.2011 г.

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

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

Журнал отпечатан в типографии
ООО «КОПИ-ПРИНТ» тел./факс: (495) 973-8296

Подписано в печать 13.08.2026 г. Формат 84x108 1/16
Печать цифровая Заказ № 0000 Тираж 2000 экз.

ISSN 2223-2966

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ CONTENTS

Общая биология

Газя Г.В., Филатов М.А., Еськов В.В., Газя Н.Ф. — Ранжирование факторов производственной среды при экологическом мониторинге функционального состояния человека
Gazya G., Filatov M., Eskov V., Gazya N. — Ranking of occupational risk factors in human environmental monitoring 8

Назарова Н.П., Тойчина О.Е. — Разработка риск-ориентированной модели контроля качества очистки сточных вод для стабилизации экосистем поверхностных водных объектов (на примере Республики Татарстан)
Nazarova N., Toychina O. — Development of a risk-based model for monitoring wastewater treatment quality for the stabilization of surface water body ecosystems (case study of the Republic of Tatarstan) 14

Рожнова В.О. — Brachionus plicatilis: оптимизация методов культивирования
Rozhnova V. — Brachionus plicatilis: optimization of cultivation methods 20

Созыкин А.А., Власов С.Н., Майллер Е.С., Аллахвердиева А.Д. — Сравнительный морфологический анализ изменений в стенке капиллярного русла волосяных сосочков кожи головы после топической фолликулярной стимуляции в эксперименте
Sozykin A., Vlasov S., Mailler E., Allakhverdieva A. — Comparative morphological analysis of changes in the capillary bed wall of the scalp hair papillae after topical follicular stimulation in the experiment 25

Старостин П.О., Шаталов А.Б. — Анализ эффективности биологической очистки сточных вод на высоконагружаемых биофильтрах: технологические параметры и пути интенсификации процесса
Starostin P., Shatalov A. — Analysis of the efficiency of biological wastewater treatment in high-rate biofilters: technological parameters and ways of process intensification 28

Сунь Лэй, Ян Дэчэн, Цао Фуцюань — Оценка ресурсного потенциала декоративных, лекарственных и пищевых видов растений альпийского пояса предпосылки к их хозяйственному освоению и интродукции в культуру
Sun Lei, Yang Decheng, Cao Fuquan — Assessment of the resource potential of ornamental, medicinal and food species of plants of the alpine belt prerequisites for their economic development and introduction into culture. 36

Уваров М.М. — Исследование способов повышения характеристик сорбентов из отходов льнопереработки для эффективной очистки сточных вод от красителей
Uvarov M. — Research of methods to improve the characteristics of sorbents from linen processing waste for effective treatment of wastewater from dyes 39

Информатика, вычислительная техника и управление

Ахметов Р.Г. — Компьютерное моделирование задачи о массообмене в окрестности капли с учётом влияния обтекания и объёмной нелинейной химической реакции второго порядка
Akhmetov R. — Computer simulation of the problem of mass transfer in the vicinity of a drop, taking into account the influence of flow and a second-order volumetric nonlinear chemical reaction 42

Блинов В.Е. — Многокритериальный выбор топологии сети КФС с учетом QoS, надежности и резервирования маршрутов
Blinov V. — Multi-criteria selection of a CPS network topology considering QoS, reliability and route redundancy 50

Борзых Н.Ю. — Метод многокритериального анализа альтернатив в системах поддержки принятия решений на основе гибридного байесовско-нечёткого подхода
Borzykh N. — Multi-criteria analysis method for decision support systems based on a hybrid bayesian-fuzzy approach 56

Ван Цзэюй, Чжу Лун — Управление ориентацией космического аппарата методом бэкстеппинга с заданными показателями качества и конечным временем сходимости при наличии неопределённостей и внешних возмущений
Wang Zeyu, Zhu Long — Spacecraft attitude control using the backstepping method with prescribed performance and finite-time convergence in the presence of uncertainties and external disturbances 61

Ветошкин Н.В. — Экспериментальное сравнение подходов к диспетчеризации задач нейросетевых вычислений в дальнем граничном слое гетерогенной высоконагруженной системы
Vetoshkin N. — Experimental comparison of task dispatching approaches for neural network computations in the far edge layer of a heterogeneous high-load system 69

Гаургов С.С. — Методы статического анализа программного обеспечения промышленных контроллеров для выявления нарушений требований безопасности
Gaurgov S. — Methods of static analysis of industrial controller software to identify safety requirement violations 75

Гидинда Грас Мушиго — Реинжиниринг инфраструктуры на примере кафедры университета на основе UML и IDEF1X
Gidinda Grace Muchigo — Infrastructure reengineering using the example of a university department based on UML and IDEF1X 80

Зиновьев В.И., Ромашкова О.Н. — Предиктивное управление бифуркационной маршрутизацией и оптимистичным исполнением в децентрализованных организационных системах
Zinovev V., Romashkova O. — Predictive control of bifurcation routing and optimistic execution in decentralized organizational systems 86

Зиновьев Р.Д., Каламитцева Е.И., Яковец Д.А. — Алгоритмы физической репликации баз данных для обеспечения непрерывности бизнес-процессов интернет-магазинов с реляционными базами данных
Zinoviev R., Kalamittseva E., Yakovets D. — Physical database replication algorithms for ensuring business continuity of online stores with relational databases 93

Комарова А.А., Аношин А.П., Калашникова М.Д. — Семантическая сегментация дорожных дефектов на базе SegFormer-B5
Komarova A., Anoshin A., Kalashnikova M. — Semantic segmentation of road defects based on SegFormer-B5 100

Лесовая А.Ю., Захарова О.И. — Автоматизированная система интеллектуальной поддержки принятия решений в службе инцидентобращений администрации
Lesovaya A., Zakharova O. — Automated intelligent decision support system in the administration's incident management service 105

Лесовая А.Ю., Захарова О.И. — Цифровые платформы семантического поиска как фактор повышения эффективности розыска пропавших людей (на примере Самарской области)
Lesovaya A., Zakharova O. — Digital semantic search platforms as a factor in improving the effectiveness of the search for missing people (using the example of the Samara region) 112

Лисовой В.С., Верещагин В.Ю. — Влияние нормализации цветового пространства гистологических изображений на качество сегментации
Lisovoi V., Vereshchagin V. — Influence of normalization of the color space of histological images on the quality of segmentation..... 118

Львова Л.М. — Библиотека универсального доступа к удаленным рабочим столам в облачных системах
Lvova L. — A universal access library for remote desktops in cloud systems 121

Майданов Ю.С. — Оптимизация энергопотребления в IoT-устройствах на базе микроконтроллеров с использованием динамического управления тактовой частотой
Maidanov Yu. — Optimization of power consumption in IoT devices based on microcontrollers using dynamic clock frequency control..... 127

Меделянова А.В., Бычков Е.Д. — Использование алгоритмов нечеткой логики для определения состояния оборудования гетерогенных телекоммуникационных сетей

Medelyanova A., Bychkov E. — Using fuzzy logic algorithms to determine the condition of heterogeneous telecommunication networks 133

Овечкина С.А., Хреняков С.В., Брысин А.Н., Ладынин А.И. — Языковая специфика датасетов для контроля подлинности рукописной подписи
Ovechkina S., Hreniykov S., Brysin A., Ladynin A. — Language-specific features of datasets for handwritten signature authenticity verification 138

Соанху Хавьэ Вилфриэд — Сравнительный анализ генеративных моделей глубокого обучения для синтеза 10-секундных 12-канальных электрокардиограмм: GAN-архитектуры и диффузионные модели
Soanhu Javier Wilfried — Comparative analysis of generative deep learning models for the synthesis of 10-second 12-channel electrocardiograms: GAN architectures and diffusion models..... 148

Таран В.В. — Статико-лексический анализ и функционально-технические возможности программного кода библиотеки-расширения pianosyn.lsp (piano synthesizer) пакета NyquistIDE с вариативной интерпретацией синтаксических элементов, выражений и операторов в редакторе Audacity® при реализации сложных схем инженерного редактирования аудиоматериалов (Часть II)
Taran V. — Static-lexical analysis and functional-technical capabilities of the source code of the extension library pianosyn.lsp (piano synthesizer) for the NyquistIDE package with variable interpretation of syntactic elements, expressions, and operators in the Audacity® editor during the implementation of complex engineering schemes for audio material editing (Part II) 154

Тарасов А.Г., Ковальчук А.С. — Преимущества использования алгоритма адаптации имитационной модели радиолинии кис по скорости передачи в условиях помех с использованием кодов с автокоррекцией
Tarasov A., Kovalchuk A. — Evaluation of the effectiveness of the algorithm for adapting the simulation model of the cis radio link in terms of transmission rate under interference conditions using auto-correction codes 171

Тарасов В.С. — Управление развитием компетенций специалистов в организационных системах на основе автоматизированной классификации профилей подготовки
Tarasov V. — Managing the development of specialists' competencies in organizational systems based on automated classification of training profiles..... 176

Тимофеев М.А. — Подходы к защите пространственных датасетов в системах анализа данных на основе проверки схем данных, оценки соответствия и выявления аномального поведения объектов
Timofeev M. — Approaches to the protection of spatial datasets in data analysis systems based on the verification of data schemas, conformity assessment and detection of abnormal behavior of objects... 181

Федосеев А.Д. — Подходы к защите веб-сервисов от ошибок авторизации при обработке запросов внешних систем
Fedoseev A. — Approaches to protecting web services from authorization errors when processing requests from external systems 187

Фетарони Малак, Стёпин Ю.П. — Нечеткая марковская модель метода нечеткого анализа иерархий в оценке эффективности и рисков технологий гидравлического разрыва пласта
Fetaroni Malak, Stepin Yu. — Fuzzy Markov model based on the fuzzy analytic hierarchy process for evaluating the efficiency and risks of hydraulic fracturing technologies..... 194

Фетарони Малак, Стёпин Ю.П. — Моделирование и управление процессами гидравлического разрыва пласта для оптимизации эксплуатационных затрат на основе метода динамики средних и обобщенного критерия оптимальности
Fetaroni Malak, Stepin Yu. — Modeling and control of hydraulic fracturing processes for operational cost optimization based on the method of dynamics of averages and generalized optimality criterion 205

Хисматов И.Э., Антонов В.В. — Графовая модель распределенной экспертной оценки в процессе отбора персонала
Khismatov I., Antonov V. — Graph model of distributed expert assessment in the personnel selection process 214

Хрусталева И.Н., Хрусталев М.Б., Степанов С.Н., Черных Л.Г. — Подсистема проектирования и оптимизации структур транспортрных операций, реализуемых в рамках машиностроительного предприятия
Khrustaleva I., Khrustalev M., Stepanov S., Chernykh L. — The subsystem for design and optimization of transport operations structures implemented within the machine-building enterprise 220

Чумакова А.В. — Разработка управляющих сигналов и реализация драйверов для модели вентильного электропривода
Chumakova A. — Development of control signals and realising of drivers for the valve electric drive model. 227

Шмелев О.С., Бутаков В.А., Трифонов С.В., Александрова А.Е. — Разработка автоматизированной системы для повышения эффективности физико-химического блока переработки органических отходов в замкнутых системах жизнеобеспечения
Shmelev O., Butakov V., Trifonov S., Aleksandrova A. — Development of an automated system to improve the efficiency of the physical and chemical unit for processing organic waste in closed life support systems 232

Шульга М.И., Федорчук Д.А., Спеваков А.Г. — Исследование способа реализации атаки на квантовую криптографическую систему в широкополосном спектре
Shulga M., Fedorchuk D., Spevakov A. — Research on a method of implementing an attack on a quantum cryptographic system in the broadband spectrum. 239

Яковлева О.А., Миндлин Ю.Б., Верезубова И.Н. — Моделирование киберугроз в вузовских сетях на основе теории игр: аналитический обзор
Yakovleva O., Mindlin Yu., Verezubova I. — Modeling cyber threats in university networks based on game theory: an analytical review 244

Якушев В.А. — Адаптация методов цифронатурного эксперимента для оптимизации испытаний в Аэродинамических трубах
Yakushev V. — Adaptation of computational experimental methods for optimizing aerodynamic tests in the wind tunnels. 250

Клиническая медицина

Бердыш Д.С. — Пектиновые порошки яблочного и цитрусового происхождения как средство локального гемостаза при повреждениях паренхиматозных органов: экспериментально-морфологическое обоснование
Berdysh D. — Pectin powders of apple and citrus origin as a means of local hemostasis in injuries of parenchymal organs: experimental and morphological substantiation. 255

Введенская И.П., Дзюбайло А.В., Казеннов Д.А., Введенский В.Ю., Шарапова Е.В. — Пути постановки диагноза Синдрома Мунье-Куна
Vvedenskaya I., Dzyubaylo A., Kazennov D., Vvedensky V., Sharapova E. — Diagnosis of Mounier-Kuhn Syndrome 259

Громов А.Л., Лунев М.А., Петраш Д.А., Язикова К.С. — Клинический опыт использования «скользящего» лоскута по В. А. Виссарионову
Gromov A., Lunev M., Petrash D., Yazikova K. — Clinical experience of using the «sliding» flap according to V.A. Vissarionov. 265

Жихарев Е.А. — Алгоритм клинико-лучевой оценки пациентов с подозрением на онкологическое заболевание на этапе первичной маршрутизации
Zhikharev E. — The algorithm of clinical and radiological assessment of patients with suspected cancer at the stage of primary routing. 269

Ичмелян А.М., Богдасаров А.Ю., Давидян Л.Ю., Богдасарова Р.А., Олейникова Д.В. — Влияние дефицита мелатонина на нейроэндокринную регуляцию и исходы ВРТ у женщин старшего репродуктивного возраста с идиопатическим бесплодием
Ichmelyan A., Bogdasarov A., Davidyan L., Bogdasarova R., Oleynikova D. — The impact of melatonin deficiency on neuroendocrine regulation and ART outcomes in women of advanced reproductive age with idiopathic infertility 276

Мустафина В.Н., Амарантов Д.Г., Годовалов А.П., Хлынова А.С., Афанасьева Н.В. — Результаты внедрения оптимизированной лечебной стратегии при пиогенных абсцессах печени

Mustafina V., Amarantov D., Godovalov A., Khlynova A., Afanaseva N. — Results of implementing an optimized treatment strategy for pyogenic liver abscesses 282

Никифоров И.А., Костюк Г.П., Бурыгина Л.А., Белова М.Ю., Истомина В.В. — Иммунологические аспекты шизофрении (обзор литературы). Часть I
Nikiforov I., Kostyuk G., Burygina L., Belova M., Istomina V. — Immunological aspects of schizophrenia (literature review). Part I 286

Петухова Н.В., Ветшев Ф.П., Осминин С.В., Русскова К.С., Адхамов Ш.А. — Сравнительный анализ органосохраняющего лечения коротких ожоговых стриктур пищевода
Petukhova N., Vetshev F., Osminin S., Russkova K., Adkhamov Sh. — Comparative analysis of organ-preserving treatment for short esophageal burn strictures 294

Рощин Е.М. — Кинематический подход к реставрации прикуса с цифровым протоколированием CAD/CAM и оценкой адаптации тканей височно-нижнечелюстного сустава
Rochshin E. — Kinematic approach to occlusal rehabilitation with digital CAD/CAM protocol and assessment of temporomandibular joint tissue adaptation 300

Сизов А.В. — Краткосрочные и долгосрочные последствия гестационного сахарного диабета для матери
Sizov A. — Short- and long-term effects of gestational diabetes on the mother 306

Юмтарова З.А. — Малоинвазивный способ лечения миомы матки с помощью радиочастотной абляции под ультразвуковым контролем
Yumtarova Z. — A minimally invasive method for treating uterine fibroids using ultrasound-guided radiofrequency ablation 311

Наши авторы 317

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.08

РАНЖИРОВАНИЕ ФАКТОРОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СРЕДЫ ПРИ ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА

RANKING OF OCCUPATIONAL RISK FACTORS IN HUMAN ENVIRONMENTAL MONITORING

G. Gazya
M. Filatov
V. Eskov
N. Gazya

Summary. This paper presents the results of ranking occupational environmental factors in the ecological monitoring of the cardiovascular system in young women employed at an oil and gas enterprise. The aim of the study was to determine the relative significance of occupational environmental factors based on the analysis of electrocardiographic parameters and heart rate variability indices.

The study involved 60 women divided into experimental and control groups. Multidimensional intelligent data analysis methods were used to process the data, determine the weighting coefficients of the investigated factors, and rank them according to their influence on the functional state of the body.

The findings showed that occupational noise and power-frequency electromagnetic fields exert the greatest influence on the functional state of the cardiovascular system, whereas the contribution of the remaining factors was less pronounced. The proposed approach can be used to improve occupational environmental monitoring and environmental risk assessment at oil and gas enterprises.

Keywords: environmental monitoring, occupational environment, cardiovascular system, heart rate variability, environmental risk.

Газя Геннадий Владимирович
Кандидат биологических наук, доцент, Индустриальный институт — филиал, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Югорский государственный университет, г. Нефтеюганск
86wsr@rambler.ru
Филатов Михаил Александрович
Доктор биологических наук, профессор, Бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа — Югры, Сургутский государственный университет
filatovmik@yandex.ru
Еськов Валерий Валерьевич
Кандидат медицинских наук, доцент, Бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа — Югры, Сургутский государственный университет
firing.squad@mail.ru
Газя Наталья Федоровна
Врач-педиатр, Бюджетное учреждение Ханты-Мансийского автономного округа — Югры, Сургутская городская клиническая поликлиника № 4
nata_stratan@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты ранжирования факторов производственной среды при экологическом мониторинге состояния сердечно-сосудистой системы молодых женщин, работающих на предприятии нефтегазового комплекса.

Цель исследования заключалась в определении относительной значимости факторов производственной среды на основе анализа электрокардиографических показателей и параметров вариабельности сердечного ритма.

В исследовании приняли участие 60 женщин, разделенных на опытную и контрольную группы. Для обработки данных использовались методы интеллектуального анализа многомерных данных, позволившие определить весовые коэффициенты исследуемых факторов и выполнить их ранжирование.

Установлено, что наибольшее влияние на функциональное состояние организма (ФСО) оказывают производственный шум и электромагнитное поле промышленной частоты, тогда как вклад остальных факторов менее выражен. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования производственного экологического мониторинга и оценки экологических рисков на предприятиях нефтегазового комплекса.

Ключевые слова: экологический мониторинг, производственная среда, сердечно-сосудистая система, вариабельность сердечного ритма, экологический риск.

Введение

Экологическая безопасность человека является одним из приоритетных направлений современной экологии, поскольку состояние окружающей и производственной среды оказывает непосредственное влияние на здоровье населения, работоспособность человека и устойчивость функционирования социально-экономических систем [1].

Особую актуальность данная проблема приобретает для предприятий нефтегазового комплекса, где персонал в течение длительного времени подвергается воздействию комплекса физических факторов производственной среды (ФПС), включая производственный шум, вибрацию, электромагнитные поля и неблагоприятные параметры микроклимата.

Даже при соблюдении действующих санитарно-гигиенических нормативов длительное сочетанное воздействие указанных факторов способно вызывать напряжение адаптационных механизмов организма и формирование функциональных изменений ССС.

Одним из основных инструментов оценки воздействия факторов окружающей и производственной среды является экологический мониторинг человека, предусматривающий систематическое наблюдение за состоянием среды обитания и реакцией организма на воздействие экологических факторов.

В современных условиях экологический мониторинг выходит за рамки контроля отдельных физических или химических показателей и ориентирован на комплексную оценку функционального состояния человека (ФСЧ) как интегрального индикатора экологического благополучия.

Представленный подход позволяет своевременно выявлять ранние признаки нарушения адаптации и разрабатывать мероприятия, направленные на снижение экологического риска [2].

В последние годы значительно расширились возможности инструментального контроля как параметров производственной среды, так и физиологических показателей организма человека [3]. Одновременно увеличивается объем информации, получаемой при проведении электрокардиографических (ЭКГ) исследований и анализе вариабельности сердечного ритма (ВСР). ЭКГ-показатели отражают особенности электрической активности сердца, тогда как параметры ВСР характеризуют состояние механизмов вегетативной регуляции и адаптационные возможности организма. Их совместное использование обеспечивает комплексную оценку функционального состояния сердечно-сосудистой системы (ССС) в условиях воздействия ФПС.

В мировой научной литературе все большее внимание уделяется применению современных методов анализа данных при экологическом мониторинге [4, 5]. Интеллектуальный анализ многомерной информации позволяет учитывать сложные взаимосвязи между многочисленными экологическими и физиологическими показателями, выявлять скрытые закономерности и определять факторы, оказывающие наибольшее влияние на состояние организма человека. Вместе с тем большинство опубликованных исследований посвящено либо оценке отдельных ФПС, либо анализу физиологических показателей без определения их относительной значимости в общей системе экологического мониторинга.

Для предприятий нефтегазового комплекса данная проблема имеет особое значение, поскольку производственная деятельность сопровождается одновременным воздействием нескольких физических факторов, каждый из которых способен вносить различный вклад в изменение ФСО. В этих условиях возникает необходимость объективного определения приоритетных факторов, требующих первоочередного контроля при организации производственного экологического мониторинга.

Решение указанной задачи возможно путем ранжирования ФПС на основе комплексного анализа данных экологического мониторинга и физиологических показателей обследуемых лиц. Такой подход позволяет перейти от анализа отдельных показателей к интегральной оценке их относительной экологической значимости и повысить эффективность принятия решений в области обеспечения экологической безопасности работников.

Целью исследования является ранжирование ФПС по степени их влияния на функциональное состояние ССС женщин, работающих на предприятии нефтегазового комплекса, на основе комплексного анализа электрокардиографических показателей и параметров вариабельности сердечного ритма.

Научная новизна работы заключается в разработке подхода к определению относительной значимости ФПС с использованием методов интеллектуального анализа многомерных данных, позволяющего объективизировать их ранжирование по степени влияния на функциональное состояние ССС.

Практическая значимость исследования состоит в возможности использования полученных результатов при совершенствовании программ производственного экологического мониторинга, оптимизации состава контролируемых ФПС и разработке профилактических мероприятий, направленных на снижение экологического риска для работников нефтегазового комплекса.

Материалы и методы

Исследование выполнено в рамках оценки влияния ФПС на функциональное состояние ССС женщин, работающих на предприятии нефтегазового комплекса в условиях хронического воздействия комплекса физических ФПС (шум, вибрация в процессе профессиональной деятельности.

Исследование включало оценку ЭКГ-параметров (Миокард, Ритм, Пульс) и параметры ВСР (SIM, PAR, SSS, SDNN, INB) 60 женщин (работниц нефтегазового предприятия), средний возраст которых составлял 25,4 года, а средний стаж работы 2,1 года.

Использование указанных ЭКГ-параметров и ВСР обусловлено их высокой чувствительностью к воздействию факторов окружающей и производственной среды и возможностью объективной оценки ФСО.

Общая группа обследуемых была разделена на опытную (наблюдаемую) группу (F_1) — женщины-операторы технологических установок (n=30 чел.), подверженные хроническому воздействию ФПС (шум, вибрация общая, электромагнитное излучение) (ФПС), и контрольная группа (F_2) — женщины-операторы товарные (n=30 чел.), не подверженные хроническому воздействию ФПС, но имеющие аналогичные опытной группе возраст и стаж работы на предприятии.

Экологический мониторинг человека сопровождается накоплением большого объема взаимосвязанных данных, содержащих как характеристики производственной среды, так и физиологические показатели обследуемых лиц. В подобных условиях применение только традиционных статистических методов не всегда позволяет объективно оценить относительную значимость исследуемых факторов.

Поэтому для обработки информации использовались методы интеллектуального анализа многомерных данных, позволяющие учитывать нелинейные взаимосвязи между исследуемыми признаками (что не всегда могут методы классической статистики) и выполнять их ранжирование по степени влияния на ФСО [6].

Исходный массив данных проходил предварительную обработку, включавшую проверку корректности измерений, устранение пропусков, нормализацию количественных признаков и формирование единой базы наблюдений. После завершения предварительной подготовки выполнялось построение модели интеллектуального анализа, обеспечивающей определение относительного вклада каждого исследуемого фактора [7].

В результате обработки для каждого признака рассчитывался весовой коэффициент, характеризующий степень его влияния на изменение ФСО [8]. Полученные коэффициенты использовались для ранжирования ФПС и выделения приоритетных факторов экологического риска.

Последовательность выполнения исследования представлена на рисунке 1.

Она включает формирование массива данных экологического мониторинга, предварительную обработку информации, интеллектуальный анализ многомерных данных, расчет весовых коэффициентов исследуемых факторов, их ранжирование и последующую экологическую интерпретацию полученных результатов.



Рис. 1. Схема алгоритма исследования

Представленный алгоритм обеспечивает последовательный переход от процедуры идентификации ФПС (по результатам специальной оценки условий труда) к определению их относительной экологической значимости, что позволяет использовать результаты исследования при организации производственного экологического мониторинга и разработке мероприятий по снижению экологического риска.

Результаты и обсуждение

На первом этапе исследования была проведена сравнительная оценка показателей функционального

состояния ССС у женщин, работающих в различных производственных условиях нефтегазового предприятия. Опытную группу составили женщины-операторы технологических установок, подвергающиеся длительному воздействию комплекса физических ФПС (шум, общая вибрация, электромагнитное излучение). Контрольную группу составили женщины-операторы товарного производства, не подвергающиеся хроническому воздействию указанных факторов, при сопоставимых возрасте и стаже работы.

Первичный нейросетевой анализ (в отличие от традиционного статистического метода Манна-Уитни) показал наличие различий как по ЭКГ-показателям, так и по параметрам ВСР, что свидетельствует о различной степени напряжения механизмов адаптации ССС в зависимости от условий производственной деятельности [9, 10]. Результаты сравнительного информационного нейросетевого анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Результаты оценки ЭКГ-показателей опытной и контрольной групп

Группы сравнения	Количество итераций	Миокард	Ритм	Пульс
F_1–F_2	100	0,03	0,04	0,09

Примечание. F_1 — опытная (наблюдаемая) группа — женщины-операторы технологических установок, N=30; F_2 — контрольная группа — женщины-операторы товарные, N=30. Миокард — степень отклонения электрической активности сердечной мышцы (микроальтераций) от нормы (%). Представлены весовые коэффициенты ЭКГ-параметров, определенные методом нейросетевого анализа.

Следующим этапом исследования являлось определение относительной информативности ЭКГ-показателей и параметров ВСР для оценки влияния ФПС [11].

Для каждого исследуемого признака был рассчитан весовой коэффициент, отражающий его вклад в изменение функционального ССС [12] (таблица 2).

Проведенный анализ показал, что исследуемые физиологические показатели обладают различной диагностической ценностью [13]. Наибольшими весовыми коэффициентами характеризуются параметры, наиболее чувствительные к хроническому воздействию физических ФПС, тогда как информативность остальных признаков значительно ниже.

Полученные результаты подтверждают необходимость комплексного использования как ЭКГ показателей, так и параметров ВСР при экологическом мониторинге ФСЧ [14–16].

На основании рассчитанных весовых коэффициентов выполнено ранжирование ФПС по степени их влияния на функциональное состояние ССС.

Таблица 2.

Результаты ранжирования параметров вариабельности сердечного ритма групп сравнения F_1F_2

Параметр	Весовой коэффициент	Ранг
SSS	0,283	1
INB	0,255	2
SDNN	0,197	3
PAR	0,148	4
SIM	0,129	5

Примечание. SIM — показатель симметрии распределения кардиоинтервалов; PAR — показатель парасимпатической регуляции; SSS — интегральный показатель состояния системы регуляции; SDNN — стандартное отклонение последовательных NN-интервалов; INB — индекс напряжения регуляторных систем.

Полученные данные (таблица 3) показали, что исследуемые факторы существенно различаются по степени экологической значимости. Наибольший вклад в изменение функционального состояния ССС вносят факторы, характеризующие длительное физическое воздействие производственной среды, тогда как влияние остальных факторов выражено в меньшей степени.

Таблица 3.

Ранжирование факторов риска по результатам нейросетевого анализа

Фактор риска	Весовой коэффициент	Ранг	Уровень значимости
Производственный шум	0,31	1	Высокий
Электромагнитное поле промышленной частоты	0,24	2	Высокий
Вибрация	0,15	3	Средний
Атмосферные загрязнители (пыль, газообразные вещества)	0,12	4	Средний
Температурный фактор	0,07	5	Средний
Стаж работы	0,06	6	Низкий
Возраст	0,03	7	Низкий

Примечание. Весовые коэффициенты определены ИНС и характеризуют относительный вклад исследуемых факторов в изменение ФСО человека.

Применение интеллектуального анализа данных позволило объективно определить приоритетные факторы, требующие первоочередного внимания при организации производственного экологического мониторинга [1, 4, 7].

Графическое представление результатов (рисунок 2) позволяет отчетливо выделить группу факторов, обладающих максимальными весовыми коэффициентами. Именно эти факторы оказывают наибольшее влияние на функциональное состояние ССС обследованных женщин и могут рассматриваться как приоритетные объекты производственного экологического контроля [4, 14, 15].

Одновременно рисунок демонстрирует постепенное снижение значимости остальных факторов, что свидетельствует о возможности оптимизации программ экологического мониторинга за счет концентрации внимания на наиболее информативных показателях.

Полученные результаты подтверждают, что комплекс физических ФПС оказывает неодинаковое влияние на функциональное состояние ССС работников нефтегазового предприятия. Следовательно, применение единого подхода к контролю всех факторов без учета их относительной значимости не обеспечивает максимальной эффективности производственного экологического мониторинга.

Ранжирование факторов позволило выделить показатели, обладающие наибольшей экологической значимостью, что открывает возможности для совершенствования системы производственного экологического контроля. Практическое применение полученных результатов позволит оптимизировать объем мониторинговых исследований, повысить информативность оценки функционального состояния работников и обеспечить более эффективное управление экологическими рисками.

Использование методов интеллектуального анализа многомерных данных следует рассматривать не как самостоятельную цель исследования, а как современный инструмент объективной оценки относительной значимости ФПС при экологическом мониторинге ФСЧ [1, 5–8].

Заключение

В результате проведенного исследования установлено, что воздействие комплекса физических ФПС на работников нефтегазового предприятия сопровождается неодинаковой выраженностью изменений функционального состояния ССС. Полученные данные свидетельствуют о целесообразности комплексной оценки ЭКГ-показателей и параметров ВСР при экологическом мониторинге человека.

Применение методов интеллектуального анализа многомерных данных позволило определить относительную значимость исследуемых ФПС и выполнить их ранжирование по степени влияния на ФСО. Установлено, что наибольший вклад в изменение исследуемых физиологических показателей в рассматриваемой выборке вносят производственный шум и электромагнит-

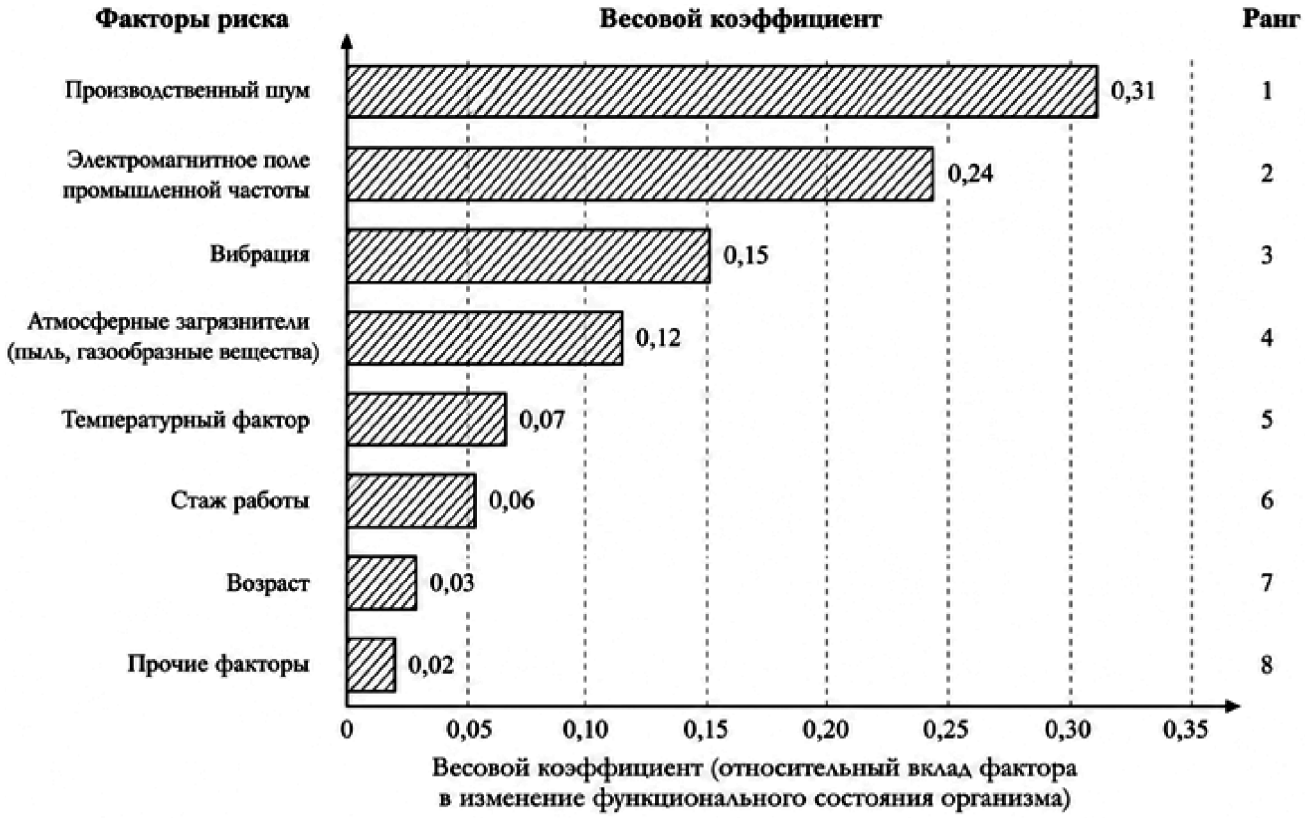


Рис. 2. Ранжирование факторов риска по весовым коэффициентам, определенным ИНС

ное поле промышленной частоты, тогда как влияние вибрации, атмосферных загрязнителей, температурного фактора и других исследуемых воздействий выражено в меньшей степени.

Полученные результаты подтверждают, что использование методов ранжирования позволяет перейти от контроля большого числа экологических показателей к выделению приоритетных ФПС, требующих первоочередного внимания при организации производственного экологического мониторинга. Такой подход способствует повышению информативности мониторинговых исследований, более рациональному распределению ресурсов производственного контроля и своевременному выявлению экологических рисков для здоровья работников.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения предложенного подхода при совершенствовании систем производственного экологического мониторинга на предприятиях нефтегазового комплекса, разработке профилактических мероприятий по снижению воздействия неблагоприятных ФПС и повышении эффективности управления экологической безопасностью персонала.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением перечня контролируемых ФПС, увеличением объема выборки обследуемых работников различных профессиональных групп, а также разработкой интегрированных интеллектуальных систем поддержки принятия решений для оценки экологических рисков и прогнозирования функционального состояния человека в условиях длительного воздействия факторов окружающей и производственной среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Binetti M.S., Massarelli C., Uricchio V.F. Machine Learning in Geosciences: A Review of Complex Environmental Monitoring Applications // Machine Learning and Knowledge Extraction. — 2024. — Vol. 6, No. 2. — P. 1263–1280.
2. Boudreault J., et al. Machine Learning for Modelling the Health Impacts of Extreme Heat: A Comprehensive Literature Review // Environment International. — 2025. — Vol. 206. — 109965. — DOI: 10.1016/j.envint.2025.109965.
3. Alhawiti K.M. A Physics-Informed Multimodal Deep Learning Framework for City-Scale Air-Quality and Health-Risk Prediction // Systems. — 2026. — Vol. 14, No. 3. — 320. — DOI: 10.3390/systems14030320.
4. Ferrari G.N., Leal G.C.L., Ossani P.C., Galdamez E.V.C. Investigation of the Usage of Machine Learning to Explore the Impacts of Climate Change on Occupational Health: A Systematic Review and Research Agenda // Frontiers in Public Health. — 2025. — Vol. 13. — 1578558. — DOI: 10.3389/fpubh.2025.1578558.
5. Iyer H.S., et al. Harnessing Geospatial Artificial Intelligence (GeoAI) for Environmental Epidemiology: A Narrative Review // Current Environmental Health Reports. — 2025. — Vol. 12. — Article 34. — DOI: 10.1007/s40572-025-00497-4.
6. Филатова О.Е., Еськов В.М., Галкин В.А., Музиева М.И., Кухарева А. Существуют ли отличия классификации систем искусственного интеллекта? // Сложность. Разум. Постнеклассика. — 2022. — № 1. — С. 48–59. — DOI: 10.12737/2306-174X-2022-1-48-59.
7. Eskov V.V., Gavrilenko T.V. Neural Network Technologies in Industrial Ecology // AIP Conference Proceedings. — 2023. — Vol. 2700. — 050033. — DOI: 10.1063/5.0125298.
8. Газя Г.В., Еськов В.В. Искусственные нейросети в оценке возрастных изменений // Вестник новых медицинских технологий. — 2022. — Т. 29, № 1. — С. 101–105.
9. Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Вохмина Ю.В. Формализация эффекта «Повторение без повторения» Н.А. Бернштейна // Биофизика. 2017. Т. 62. № 1. С. 168–176.
10. Чемпалова Л.С., Яхно Т.А., Манина Е.А., Игнатенко А.П., Оразбаева Ж.А. Гипотеза W. Weaver при изучении произвольных и непроизвольных движений // Вестник новых медицинских технологий. — 2021. — Т. 28, № 1. — С. 75–77.
11. Еськов В.М., Гавриленко Т.В., Музиева М.И., Самойленко И.А. Теория динамического хаоса не может описывать биосистемы // Сложность. Разум. Постнеклассика. — 2022. — № 3. — С. 87–95.
12. Григоренко В.В. Статистическая оценка эффекта Еськова–Зинченко для кардиоинтервалов // Сложность. Разум. Постнеклассика. — 2022. — № 4. — С. 79–89.
13. Еськов В.М., Пятин В.Ф., Чемпалова Л.С., Шамов К.А., Кухарева А. Существуют ли возможности для исследования стохастики в кардиологии и во всей медицине? // Сложность. Разум. Постнеклассика. — 2022. — № 1. — С. 28–47.
14. Liu S., et al. Heart Rate Variability: A Multidimensional Perspective from Physiological Marker to Brain-Heart Axis Disorders Prediction // Frontiers in Cardiovascular Medicine. — 2025. — Vol. 12. — Article 1630668.
15. Shusterman V., et al. Tracking Autonomic Nervous System Activity Using Surface ECG: Personalized, Multiparametric Evaluation // Journal of Electrocardiology. — 2025. — Vol. 88. — Article 153837.
16. Еськов В.М., Колосова А.И., Фадюшина С.И., Мордвинцева А.Ю. Хаотическая динамика ритмики сердца // Сложность. Разум. Постнеклассика. — 2021. — № 1. — С. 25–34.

© Газя Геннадий Владимирович (86wsr@rambler.ru); Филатов Михаил Александрович (filatovmik@yandex.ru);
Еськов Валерий Валерьевич (firing.squad@mail.ru); Газя Наталья Федоровна (nata_stratan@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.24

РАЗРАБОТКА РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ЭКОСИСТЕМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ (НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН)

DEVELOPMENT OF A RISK-BASED MODEL FOR MONITORING WASTEWATER TREATMENT QUALITY FOR THE STABILIZATION OF SURFACE WATER BODY ECOSYSTEMS (CASE STUDY OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN)

N. Nazarova
O. Toychina

Summary. The article presents the results of an analysis of the efficiency of wastewater treatment plants in Almetyevsk and the state of the Stepnoy Zay River, which receives the treated wastewater. The insufficient efficiency of the existing state environmental supervision system, based on discrete inspections, is revealed, which does not allow for the timely detection of emergency pollutant discharges. Modern methods of continuous water body monitoring are considered. Based on the best available techniques and a risk-based approach, a monitoring model is substantiated that includes the introduction of automatic water pollution monitoring stations (AWPMS). Criteria for assessing environmental risks, an algorithm for the model's operation, and a scheme for the placement of six AWPMS on the Stepnoy Zay River are proposed, enabling the achievement of standard water quality indicators, and increasing the efficiency of supervisory activities.

Keywords: wastewater, treatment facilities, suspended solids, petroleum products, phosphates, risk-based models, automatic water pollution monitoring stations.

Назарова Надежда Петровна
Кандидат биологических наук, доцент, Альметьевский филиал ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ
wnl_08@mail.ru
Тойчина Ольга Евгеньевна
Ведущий специалист, Юго-Восточное территориальное управление Министерства экологии и природных ресурсов Республики Татарстан

Аннотация. Представленная работа направлена на оценку эффективности функционирования очистных сооружений канализационной системы города Альметьевска, а также на анализ экологического состояния реки Степной Зай, выступающей в качестве приемника очищенных сточных вод. Установлено, что действующая система государственного экологического надзора, базирующаяся на дискретных проверках, характеризуется недостаточной результативностью, что делает невозможным своевременное выявление залповых (аварийных) сбросов загрязняющих веществ. В статье проанализированы современные подходы к организации непрерывного мониторинга водных объектов. С опорой на наилучшие доступные технологии (НДТ) и риск-ориентированный подход обоснована модель контроля, предусматривающая внедрение автоматических станций контроля загрязнения воды (АСКЗВ). Сформулированы критерии оценки экологических рисков, разработан алгоритм функционирования предлагаемой модели, а также представлена схема размещения шести АСКЗВ на реке Степной Зай. Реализация предложенных решений позволит обеспечить достижение нормативных показателей качества воды и повысить оперативность надзорной деятельности.

Ключевые слова: сточные воды, очистные сооружения, взвешенные вещества, нефтепродукты, фосфаты, риск-ориентированная модель, автоматические станции контроля загрязнений воды.

Введение

Эффективность очистки сточных вод (СВ) на городских очистных сооружениях канализации (ОСК) является ключевым фактором, определяющим качество воды поверхностных водных объектов [1, 2]. В Республике Татарстан (РТ), как и в целом по России, одной из острейших проблем остается загрязнение малых рек нефтепродуктами и биогенными элементами, прежде всего фосфатами [3, 4].

Традиционная система государственного экологического надзора (ГЭН), основанная на периодических проверках, не позволяет оперативно выявлять залповые сбросы с очистных сооружений, которые являются одной из основных причин деградации водных экосистем [5]. Нормативно-правовое регулирование в области охраны водных объектов базируется на Водном кодексе РФ и Федеральном законе «Об охране окружающей среды», однако существующие методики контроля не учитывают временные факторы (неравномерность сброса,

сезонность) и кумулятивный эффект от воздействия нескольких источников загрязнения [6].

В этой связи особую актуальность приобретает разработка риск-ориентированной модели контроля, интегрирующей непрерывный автоматический мониторинг и количественную оценку экологических рисков [7, 8].

Материалы и методы исследований

Объектами исследования служили очистные сооружения канализации г. Альметьевска (АО «Альметьевск-Водоканал»), река Степной Зай — приёмник очищенных СВ, а также деятельность Юго-Восточного территориального управления Министерства экологии и природных ресурсов РТ (ЮВТУ МЭПР РТ) по осуществлению государственного экологического надзора (ГЭН).

Отбор проб проводили в 2020–2024 гг. в 6 контрольных створах реки Степной Зай: выше города, ниже очистных сооружений, ниже промышленной зоны, в черте города, ниже городской черты и в замыкающем створе. Частота отбора — 2–4 раза в месяц. В пробах определяли pH, взвешенные вещества, нефтепродукты, фосфаты, аммоний-ион, нитраты, нитриты, общее железо, $БПК_5$ и ХПК. Все анализы выполнены аккредитованной лабораторией ЮВТУ МЭПР РТ по аттестованным методикам [9].

Для количественной оценки экологического риска, связанного с воздействием СВ на водный объект, использовался интегральный показатель R, рассчитываемый по формуле (1):

$$R = P \cdot S \quad (1)$$

Где R — интегральный показатель экологического риска (безразмерная величина), P — вероятность наступления неблагоприятного события (значение в интервале от 0 до 1), а S — тяжесть последствий для экосистемы, оцениваемая в баллах от 1 до 5 в соответствии с разработанной классификацией.

Кроме того, для оценки уровня загрязнения водного объекта применялся индекс экологического риска (RI), вычисляемый по формуле (2):

$$RI = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{C_i}{ПДК_i} \cdot k_{т,i} \right) \quad (2)$$

Где C_i — фактическая концентрация i-го загрязняющего вещества в пробе воды (мг/дм³), $ПДК_i$ — установленная ПДК данного вещества для водного объекта соответствующего вида водопользования (мг/дм³), а $k_{т,i}$ — коэффициент относительной токсичности i-го вещества, значения которого дифференцированы в зависимости от класса опасности (для веществ первого класса опасности коэффициент принят равным 1,5, второго класса — 1,2, третьего класса — 1,0, четвёртого класса — 0,8).

Полученные значения индекса экологического риска позволяют отнести водный объект к той или иной категории загрязнения и определить приоритетность принятия управленческих решений.

Литературный обзор

Проблема загрязнения малых рек остаточными концентрациями сточных вод широко освещена в современной литературе. Так, Серпокрылов Н.С. с соавт. подчёркивают: «даже при штатной работе городских очистных сооружений в водный объект поступает до 3–5 % исходного количества взвешенных веществ и органики, что при многолетнем накоплении приводит к деградации экосистемы» [1, с. 48]. Губанов Л.Н. и Ермолаев Н.Р. отмечают: «наиболее уязвимыми являются малые реки, поскольку их самоочищающая способность в 5–7 раз ниже, чем у средних и крупных водотоков» [2, с. 71]. Минеева Н.М. и Семенова Т.А. прямо указывают: «биогенная нагрузка от городских очистных сооружений (фосфаты, аммоний) в 2,5–3 раза превышает фоновые значения, что служит триггером цианобактериального «цветения» и формирования гипоксии» [3, с. 38]. Аналогичные данные получены Никоноровым А.М. и Жулидовым А.В.: «нефтепродукты в концентрациях 0,02–0,05 мг/дм³, характерных для очищенных сточных вод, обладают кумулятивным токсическим действием и накапливаются в донных отложениях» [4, с. 26].

Критический анализ действующей системы государственного экологического надзора представлен в работе Зайцевой Н.В. с соавт.: «дискретный отбор проб с частотой 2–4 раза в месяц не позволяет выявить более 70 % залповых сбросов, поскольку длительность большинства из них не превышает 12 часов» [5, с. 9]. Харитонов В.Ф. и Иванова О.П. подтверждают: «риск-ориентированный подход требует перехода от периодических проверок к непрерывному автоматическому мониторингу, иначе выявляемость нарушений остаётся не выше 30–40 %» [7, с. 21]. В качестве технологического решения Игнатьева М.Н. и Смирнов А.В. предлагают: «внедрение автоматических станций контроля загрязнения воды (АСКЗВ) с частотой измерений 15–30 минут сокращает время обнаружения сброса с нескольких суток до 0,5–1 часа» [15, с. 35]. При этом авторы предупреждают: «простое оснащение АСКЗВ без разработки риск-ориентированного алгоритма реагирования не даёт ожидаемого эффекта» [15, с. 36].

Результаты

Анализ данных за исследуемый период показал высокую эффективность очистки по большинству пока-

зателей: аммоний-ион — 99,4 %, $БПК_5$ — 99,5 %, взвешенные вещества — 97,2 %, фосфаты — 98,7 %. Однако по ряду веществ эффективность недостаточна: марганец — 88,3 % (ПДК превышена в 1,8 раза), медь — 80,5 % (превышение в 3,9 раза).

Таблица 1.

Усреднённые показатели работы очистных сооружений канализации г. Альметьевска за период 2020–2024 гг.

Загрязняющее вещество	Среднегодовая концентрация, мг/дм³	ПДК, мг/дм³	Эффективность, %
Взвешенные вещества	4,33	15,4	97,2
Нефтепродукты	0,028	0,05	94,8
Аммоний-ион	0,421	1,05	99,4
Фосфаты	0,078	0,219	98,7
Марганец	0,018	0,01	88,3
Медь	0,0039	0,001	80,5
$БПК_5$	2,12	2,9	99,5

В створе реки Степенной Зай в черте г. Альметьевска значение индекса экологического риска RI достигло 10,98, что соответствует экстремально высокому уровню антропогенной нагрузки и деградации качества воды. Частота превышения ПДК (рис. 1) максимальна для трёх показателей: нефтепродуктов — 68 % проб, фосфатов — 72 %, аммоний-иона — 54 %.

Хроническое загрязнение сформировало устойчивую зону гипоксии протяжённостью 15 км ниже города (подтверждено измерениями растворённого кислорода в 2020–2024 гг.), а в летние периоды 2021 и 2022 гг. зафиксированы случаи замора рыбы вследствие дефицита кислорода и токсического воздействия поллютантов. Существующая система ГЭН базируется на дискретных проверках с отбором проб в установленных контрольных створах. Дискретный контроль с частотой отбора проб 2–4 раза в месяц не обеспечивает непрерывного наблюдения: временной лаг между сбросом и его обнаружением достигает 120 ч (5 сут.), а выявляемость залповых сбросов не превышает 30 %. К основным недостаткам системы ГЭН относятся низкая оперативность реагирования и отсутствие единой цифровой платформы для агрегации данных государственного мониторинга, производственного контроля и лабораторных анализов.

Предлагаемая риск-ориентированная модель имеет модульную архитектуру и включает базу данных, модуль расчёта рисков по формулам (1) и (2), геоинформационную систему для визуализации источников загрязнения и модуль оповещения. Категоризация объектов ГЭН выполнена согласно Постановлению Правительства РФ № 886 от 27.07.2017, вводящему 6 категорий риска.

Интегральный показатель риска для очистных сооружений составил R = 0,72, что относит исследуемый объект к категории «высокий риск» и определяет периодичность плановых проверок один раз в два года. Для практической реализации модели разработан циклический алгоритм (рис. 2), включающий непрерывный

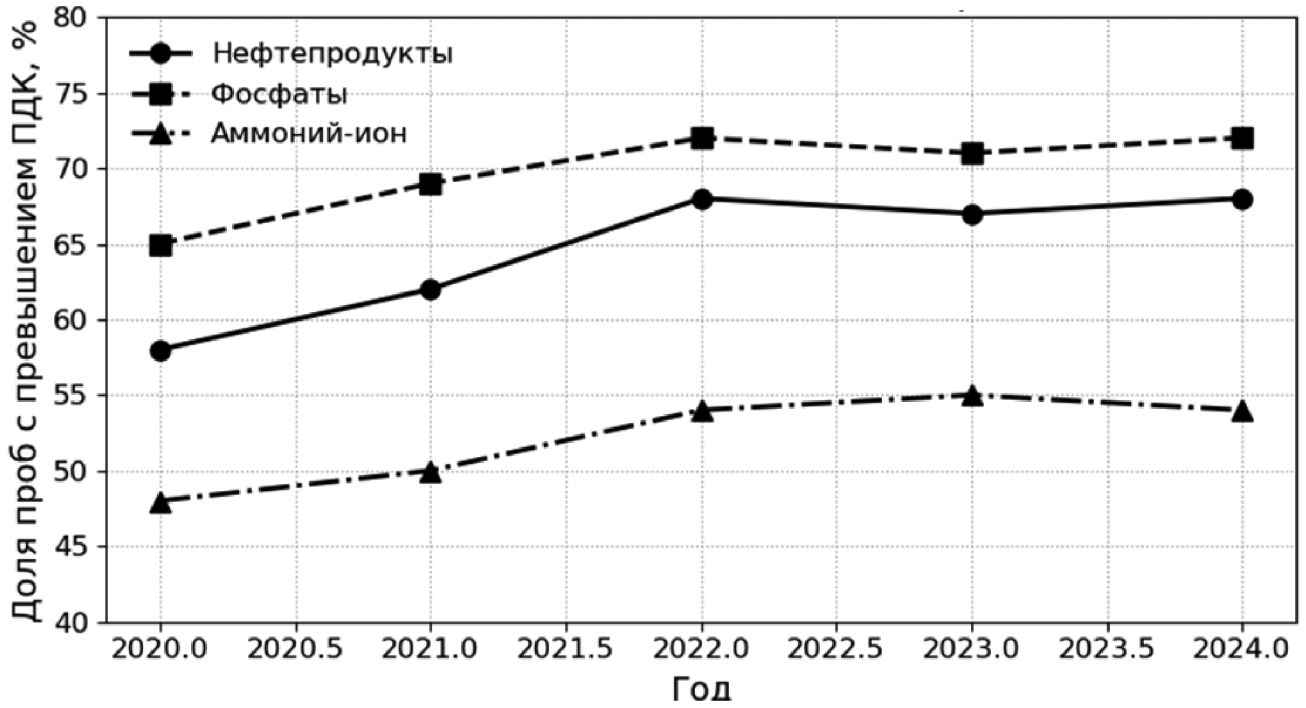


Рис. 1. Динамика превышений ПДК загрязняющих веществ в водных объектах г. Альметьевска

Таблица 2.
Шкала категорий экологического риска для объектов государственного экологического надзора

Категория риска	Значение R	Периодичность плановых проверок
Чрезвычайно высокий	$R \geq 0,8$	1 раз в год
Высокий	$0,6 \leq R < 0,8$	1 раз в 2 года
Значительный	$0,4 \leq R < 0,6$	1 раз в 3 года
Средний	$0,2 \leq R < 0,4$	1 раз в 4 года
Умеренный	$0,1 \leq R < 0,2$	1 раз в 5 лет
Низкий	$R < 0,1$	плановые проверки не проводятся

автоматический мониторинг с частотой 15–30 мин с помощью АСК3В, первичную обработку данных, вычисление RI и R, сравнение с пороговыми уровнями, формирование сигнала тревоги, его передачу в ЮВТУ МЭПР РТ, оперативное реагирование (выезд в срок от 2 до 24 ч), а также документирование инцидента и внесение данных в базу.

В рамках организации непрерывного мониторинга качества воды на реке Степенной Зай в пределах городской черты города Альметьевска было обосновано размещение 6 АСК3В (рис. 3). Выбор местоположения каждой станции осуществлялся на основе оценки гидрологических характеристик реки и расположения источников антропогенной нагрузки.

Первая станция (фоновый створ) расположена выше всех источников загрязнения, вторая — ниже ОСК, третья — ниже промышленной зоны, четвёртая (основной пост) — в черте города, пятая — ниже города, шестая, замыкающая — на выходе реки из городской черты. Расстояние между крайними створами составляет 14,5 км, что обеспечивает полный охват зоны антропогенного воздействия городской агломерации.

На основе выполненных расчётов установлено, что внедрение разработанной риск-ориентированной модели позволит достичь существенного улучшения как качества воды, так и оперативности системы ГЭН. Ко-

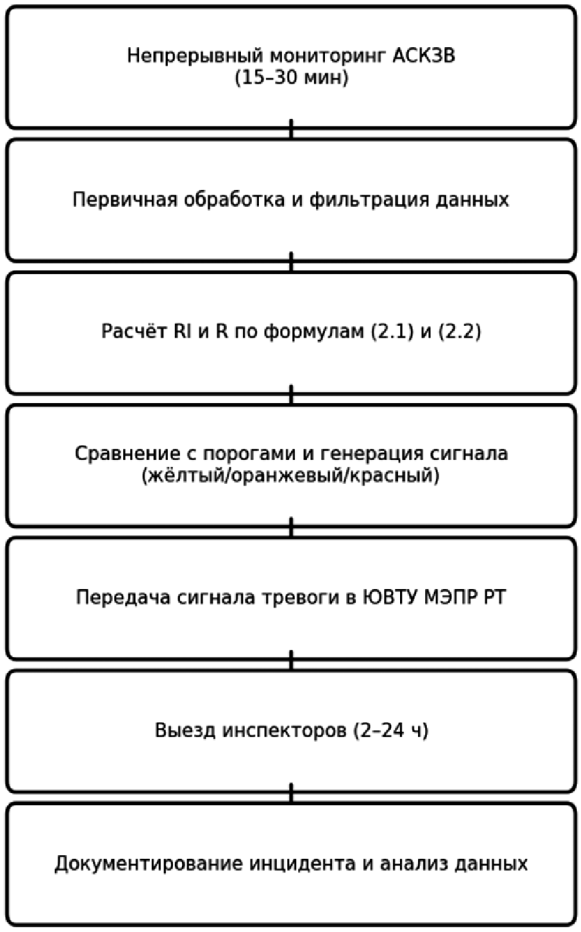


Рис. 2. Алгоритм функционирования риск-ориентированной модели с использованием АСК3В

личественная оценка прогнозируемой эффективности представлена в табл. 3.

Обсуждение

Полученные результаты позволяют оценить текущее состояние очистных сооружений г. Альметьевска и качество воды реки Степенной Зай, а также сформулировать принципы построения риск-ориентированной системы контроля. Эффективность удаления органических веществ и взвешенных веществ на ОСК г. Альметьевска ($БПК_5$ — 99,5 %, аммоний-ион — 99,4 %, взвешенные вещества — 97,2 %) сопоставима с показателями, приведёнными для современных городских очистных со-



Рис. 3. Схема размещения АСК3В на реке Степной Зай в г. Альметьевск (расстояние между крайними створами 14,5 км)

Таблица 3.
Интегральная оценка прогнозируемой эффективности внедрения риск-ориентированной модели контроля

Показатель	Прогнозируемое улучшение
Модифицированный индекс загрязнённости воды	снижение на 44,8 % (с 5,8 до 3,2)
Индекс экологического риска (RI)	снижение на 62,5 % (с 10,98 до 4,12)
Время от сброса до обнаружения	сокращение в 240 раз (с 120 часов до 0,5 часа)
Выявляемость залповых сбросов	увеличение в 3,2 раза (с 30 % до 95 %)
Снижение массы сброса загрязняющих веществ	4,86 т/год (фосфаты — 4,06 т/год)
Сокращение количества плановых проверок	на 319 проверок (82,2 %)

оружений в работе [1] (эффективность по $БПК_5$ 98–99 %). Однако систематические превышения ПДК по марганцу (в 1,8 раза) и меди (в 3,9 раза) свидетельствуют о недостаточной эффективности существующих технологий доочистки от тяжёлых металлов, что согласуется с данными исследования [10] для городов Поволжья.

Хроническое загрязнение реки Степенной Зай нефтепродуктами (68 % проб) и фосфатами (72 % проб) по масштабам сопоставимо с ситуацией на малых реках, описанной в работах [3] и [4]. Сформировавшаяся зона гипоксии протяжённостью 15 км является следствием эвтрофикации и подтверждает модель, предложенную в [6], согласно которой критическая биогенная нагрузка приводит к кислородному дефициту уже при превышении ПДК фосфатов в 1,5–2 раза.

Рассчитанные временной лаг между сбросом и его обнаружением (до 120 ч) и выявляемость залповых сбросов (30 %) совпадают с оценками [5, 7], что подтверждает универсальность проблемы: дискретный отбор проб не позволяет фиксировать кратковременные повышения концентраций (менее 6–12 ч), характерные для аварийных сбросов с ОСК. Отсутствие единой цифровой платформы, отмеченное в [7], усугубляет ситуацию.

Интегральный показатель экологического риска R = 0,72 для ОСК г. Альметьевска относит объект к категории «высокий риск» согласно Постановлению Правительства РФ № 886 [14], что определяет периодичность плановых проверок один раз в два года и требует усиления инструментального контроля в межпроверочный период посредством внедрения АСК3В. Разработанный алгоритм с частотой измерений 15–30 мин и автоматической передачей сигналов тревоги при превышении RI > 6,0 соответствует принципам риск-ориентированного подхода, изложенным в [8] и [15]. Схема размещения шести АСК3В на реке Степенной Зай учитывает гидрологические особенности и локализацию источников нагрузки.

Внедрение модели обеспечит многократное улучшение ключевых показателей: сокращение времени обнаружения сброса с 120 ч до 0,5 ч (в 240 раз), повышение выявляемости залповых сбросов до 95 %, снижение индекса экологического риска на 62,5 % (с 10,98 до 4,12), что переводит водный объект из зоны экстремально высокого загрязнения в зону высокого и создаёт условия для естественного восстановления экосистемы. Сокращение количества плановых проверок на 82,2 % при одновременном росте эффективности надзора является прямым следствием риск-ориентированного подхода, аналогичный эффект (снижение числа аварийных сбросов на 60–70 %) получен при внедрении подобных систем в Европе [15].

Предлагаемая модель разработана для реки Степенной Зай в пределах городской черты Альметьевска. Применяемый методический аппарат (расчёт R и RI, категорирование риска) является универсальным, однако прямое тиражирование системы на другие водные объекты требует учёта их гидрологического режима и фонового качества воды. В дальнейшем планируется расширение исследования на бассейновую систему Закамья и технико-экономическое обоснование пилотного внедрения АСК3В.

Заключение

В ходе исследования разработана и обоснована риск-ориентированная модель контроля состояния водных объектов, адаптированная к условиям Юго-Восточного территориального управления Министерства экологии и природных ресурсов РТ. Модель интегрирует непрерывный автоматический мониторинг с использованием АСК3В, количественную оценку экологических рисков по показателям R и RI, а также алгоритм оперативного реагирования на превышение пороговых уровней загрязнения.

Анализ работы очистных сооружений канализации г. Альметьевска за 2020–2024 гг. показал, что при высокой эффективности удаления органических веществ и биогенных элементов существующая система не обеспечивает соблюдение ПДК по марганцу и меди, а хроническое превышение ПДК по нефтепродуктам, фосфатам и аммоний-иону привело к формированию зоны гипоксии протяжённостью 15 км ниже города. Оценка действующей системы государственного экологического надзора выявила дискретный характер наблюдений, обусловливающий низкую выявляемость залповых сбросов (не более 30 %) и временной лаг до 120 ч.

Предлагаемая модель устраняет эти ограничения за счёт категоризации объектов по шести уровням риска. Для очистных сооружений г. Альметьевска установлена категория «высокий риск» (R = 0,72), что определяет периодичность плановых проверок один раз в два года. Реализация модели позволит снизить модифицированный индекс загрязнённости воды на 44,8 %, индекс экологического риска — на 62,5 %, сократить время обнаружения сброса с 120 ч до 0,5 ч (в 240 раз), повысить выявляемость залповых сбросов до 95 % и уменьшить массу ежегодного сброса загрязняющих веществ на 4,86 т, а также сократить количество плановых проверок на 82,2 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Серпокрылов Н.С., Гетманцев С.В., Масленников Е.М. Анализ эффективности очистки сточных вод городских очистных сооружений // Инженерный вестник Дона. — 2023. — № 3. — С. 45–54.
2. Губанов Л.Н., Ермолаев Н.Р. Оценка влияния сбросов очистных сооружений на качество воды малых рек // Водные ресурсы. — 2022. — № 4. — С. 67–75.
3. Минеева Н.М., Семенова Т.А. Биогенная нагрузка и эвтрофирование малых рек в зоне антропогенного воздействия // Водное хозяйство России. — 2023. — № 2. — С. 34–42.
4. Никоноров А.М., Жулидов А.В. Нефтепродукты в поверхностных водах урбанизированных территорий // Экологическая химия. — 2024. — № 1. — С. 22–30.
5. Зайцева Н.В., Шур П.З., Кирьянов Д.А. Риск-ориентированный надзор в области охраны окружающей среды: методология и практика // Анализ риска здоровью. — 2021. — № 4. — С. 4–13.
6. Ушакова Е.С., Шитиков В.К. Оценка кумулятивного эффекта от сбросов сточных вод в малые реки // Вода: химия и экология. — 2023. — № 3. — С. 34–42.
7. Харитонов В.Ф., Иванова О.П. Риск-ориентированный подход в государственном экологическом надзоре // Экология производства. — 2022. — № 11. — С. 18–23.
8. Сечкова Н.А., Оболдина Г.А., Попов А.Н. Использование комплексных критериев качества для оценки экологической безопасности водохозяйственной деятельности // Водное хозяйство России. — 2024. — № 1. — С. 28–37.
9. Белова Л.В., Вялкова Е.И., Глущенко Е.С., Осипова Е.Ю. Технология очистки производственных сточных вод // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2022. — Т. 24, № 2. — С. 112–124.
10. Масленникова И.С., Гусева Т.В. Оценка экологического риска при загрязнении водных объектов тяжелыми металлами // Экологическая безопасность. — 2023. — № 2. — С. 18–26.
11. Тарановская Е.А., Собгайда Н.А., Алферов И.Н., Морев П.В. Очистка сточных вод с применением хитозана // Современные проблемы науки и образования. — 2024. — № 3. — С. 18–25.
12. Волосникова Г.А., Чернобровкина О.Е. Повышение эффективности работы очистных сооружений канализации // Инженерный вестник Дона. — 2023. — № 4 (100). — С. 45–52.
13. Колесников В.П., Жигарев И.А. Биоиндикация качества поверхностных вод по состоянию гидробионтов. — Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2023. — 184 с.
14. Постановление Правительства РФ от 27.07.2017 № 886 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации».
15. Игнатьева М.Н., Смирнов А.В. Автоматический контроль качества воды: современные технологии и опыт внедрения // Экология и промышленность России. — 2022. — Т. 26, № 8. — С. 32–37.

© Назарова Надежда Петровна (wnl_08@mail.ru); Тойчина Ольга Евгеньевна

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.28

BRACHIONUS PLICATILIS: ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОВ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ

BRACHIONUS PLICATILIS: OPTIMIZATION OF CULTIVATION METHODS

V. Rozhnova

Summary. The article presents the results of an experimental study on optimizing the cultivation methods of the rotifer *Brachionus plicatilis*, which is the object of the first stage of feeding larvae of marine fish in aquaculture. The urgency of searching for effective nutrient media for the mass cultivation of this aquatic plant is substantiated, since traditional yeast diets do not provide sufficient nutritional value and crop productivity. It was found that the maximum population density is achieved by gradually increasing the water temperature from 18 to 24 °C and adding the following mixture: algae *Diacronema lutheri*, yeast, methionine, lysine, vitamin B12. In this case, the complex enrichment of the diet provided better adaptation to thermal stresses and intensive proliferation. It was found that the decrease in numbers on the 8th day correlates with a decrease in temperature and the accumulation of toxic metabolic products, especially pronounced in groups with a high concentration of amino acids. Based on the data obtained, the physiological role of methionine and lysine for the development of marine fish larvae is substantiated: methionine participates in the synthesis of taurine and is a precursor to cysteine and tyrosine, while lysine provides calcification of bone tissue and synthesis of muscle protein. Deficiency of these amino acids leads to skeletal deformations and stunting in fast-growing pelagic and benthic species. Practical recommendations are proposed for correcting the dosages of additives and replacing part of the culture medium to prevent the negative effects of long-term cumulative cultivation.

Keywords: Brachionus plicatilis, live feed, aquaculture, amino acids, methionine, lysine, temperature, Diacronema lutheri, yeast.

Рожнова Виктория Олеговна
Керченский государственный морской технологический университет
yaviktoria.troyan@yandex.ru

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования по оптимизации методов культивирования коловратки *Brachionus plicatilis*, которая является объектом первой ступени кормления личинок морских рыб в аквакультуре. Обоснована актуальность поиска эффективных питательных сред для массового выращивания этого гидробионта, так как традиционные дрожжевые диеты не обеспечивают достаточной пищевой ценности и продуктивности культуры. Установлено, что максимальная плотность популяции достигается при постепенном повышении температуры воды с 18 до 24 °C и добавлении следующей смеси: водоросль *Diacronema lutheri*, дрожжи, метионин, лизин, витамин B12. При этом варианте комплексное обогащение рациона обеспечило лучшую адаптацию к термическим стрессам и интенсивную пролиферацию. Выявлено, что падение численности на 8-е сутки коррелирует со снижением температуры и накоплением токсичных продуктов метаболизма, особенно выраженным в группах с высокой концентрацией аминокислот. На основе полученных данных обоснована физиологическая роль метионина и лизина для развития личинок морских рыб: метионин участвует в синтезе таурина и является предшественником цистеина и тирозина, а лизин обеспечивает кальцификацию костных тканей и синтез мышечного белка. Дефицит этих аминокислот ведёт к деформациям скелета и задержке роста у быстрорастущих пелагических и донных видов. Предложены практические рекомендации по коррекции дозировок добавок и замене части культуральной среды для предотвращения негативных эффектов длительного накопительного культивирования.

Ключевые слова: Brachionus plicatilis, живой корм, аквакультура, аминокислоты, метионин, лизин, температура, Diacronema lutheri, дрожжи.

Главным фактором успеха для развития марикультуры является эффективное воспроизводство ценных видов гидробионтов. Именно от того, как организован этот процесс, зависят темпы роста и перспективы всей отрасли. Кроме традиционно выращиваемых кефалевых (пиленгаса и др.), объектами промышленного разведения сегодня также стали представители семейств камбаловых и серановых. При этом личиночный период развития — это критический этап их жизненного цикла, который сопровождается высокой смертностью молоди на ранних стадиях онтогенеза. Причиной этого является неадекватный состав первого живого корма. Он должен соответствовать размеру ротового аппарата личинки и обладать высокой биологической ценностью. Только так он будет покрывать потребности организма в протеине, полиненасыщенных жирных кислотах и эссенциальных нутриентах. В этой связи коловратки, в частности *Brachionus plicatilis*, являются наиболее востребованным объектом первой ступени кормления.

Помимо размерных характеристик и способности к партеногенезу, важнейшим преимуществом *Brachionus plicatilis* является её высокая адаптивность к изменяющимся условиям среды, что позволяет культивировать её в широком диапазоне солёности и температуры [9]. Однако продуктивность культуры и её пищевая ценность в значительной степени зависят от состава рациона, причём традиционные дрожжевые диеты, несмотря

на их доступность и простоту применения, не обеспечивают оптимального баланса незаменимых нутриентов [6]. В этой связи наш научный интерес реализовался в поиске эффективных способов обогащения кормовых смесей, позволяющих наращивать плотность популяции и повышать биологическую ценность коловраток как стартового корма для личинок.

Цель исследования — оценить эффективность обогащения рациона коловратки *Brachionus plicatilis* незаменимыми аминокислотами (метионином и лизином) в сочетании с микроводорослью *Diacronema lutheri* и витамином B_{12} для повышения продуктивности культуры, а также выявить оптимальные температурные условия, обеспечивающие максимальную плотность популяции при культивировании в искусственных условиях.

На сегодняшний день фауна планктонных коловраток морских бассейнов имеет большое разнообразие видов, но для нужд аквакультуры выбирают вид *Brachionus plicatilis*. Он сочетает комплекс биологических и пищевых характеристик. Оптимальные размерные классы позволяют использовать коловратку для кормления личинок большинства видов морских рыб, а способность к партеногенезу гарантирует быстрое наращивание биомассы в культуре (табл. 1).

Представленные характеристики показывают, что вид *Brachionus plicatilis* является незаменимым стартовым живым кормом при выращивании личинок морских рыб в искусственных условиях. Особого внимания заслуживает способность коловраток выступать в роли «живых капсул» для транспортировки нутриентов к личинкам.

Как отмечают А.А. Семик, R. Dinesh, S. Nandhakumar, C. Anand, J.S.S. Kumar, P. Padmavathy, обогащение рациона *Brachionus plicatilis* микроводорослями, содержащими DHA и EPA, позволяет существенно повысить выживаемость и темпы роста личинок морских рыб [2, 4].

Объектом нашего исследования послужила природная культура коловратки *Brachionus plicatilis*. Процессы адаптации и культивации проводили в стеклянных емкостях объемом 10 литров с профильтрованной морской водой соленостью 12–13 ‰. Начальная плотность посадки составляла 20 экз./мл. Схема эксперимента:

1. Контрольный: сухие пекарские дрожжи (20–25 мг/л).
2. Опытный 1: смесь дрожжей, микроводоросли *Diacronema lutheri* (1–1,2·10^6 кл/мл), витамина B12 и метионина (10 мкг/л).
3. Опытный 2: смесь дрожжей, микроводоросли *Diacronema lutheri* (1–1,2·10^6 кл/мл), витамина B12 метионина, лизина (10 мкг/л).

Таблица 1.

Характеристики *Brachionus plicatilis* как объекта аквакультуры

Характеристика	Описание	Значение для аквакультуры
Размер	100–400 мкм; выделяют L — (190–320 мкм), S — (140–220 мкм) и SS-штаммы (100–160 мкм)	Соответствует размеру ротового аппарата личинок на первых этапах питания; позволяет подбирать штамм под конкретный вид рыб
Эвригалинность	Оптимальный диапазон солёности 10–35 ppt	Возможность культивирования в широком диапазоне солёностей, адаптация к условиям конкретных хозяйств
Температурный оптимум	22–30 °C; рост сохраняется при 15–35 °C	Высокая скорость размножения в оптимальном диапазоне; возможность круглогодичного культивирования
Тип размножения	Партеногенез (бесполое размножение) в благоприятных условиях; образование покоящихся яиц при стрессе	Обеспечивает экспоненциальный рост популяции; покоящиеся яйца позволяют сохранять культуру и транспортировать
Скорость размножения	Высокая; период генерации несколько суток; максимальная плодовитость при 5 ppt (25,50±0,58 особей)	Быстрое наращивание биомассы для обеспечения личинок кормом в необходимых объёмах
Продолжительность жизни	До 2 недель; максимальная при 20 °C; до 290,5 ч на смешанных диетах	Позволяет планировать циклы культивирования; влияет на общую продуктивность культуры
Стартовый корм	Первый живой корм для личинок в течение 7–30 дней экзогенного питания	Незаменим на критическом этапе перехода личинок на внешнее питание
«Живые капсулы»	Транспортировка нутриентов (НЖК, аминокислоты, витамины) непосредственно в ткани личинок	Возможность направленного обогащения коловраток недостающими нутриентами («bioencapsulation»)
Адаптивность	Широкий диапазон толерантности к факторам среды; наличие генетически различных штаммов	Возможность культивирования в различных климатических и технологических условиях

Источник: составлено автором по данным [1–4, 9–11]

Ежедневно проводили мониторинг плотности популяции, данные обрабатывали в программе MS Excel 2007.

В ходе эксперимента температуру воды изменяли в диапазоне 18–24 °С. При начальных значениях около 20 °С лаг-фаза была непродолжительной, экспоненциальный прирост нами был зафиксирован на вторые сутки и продолжался до 12-х суток.

Результаты эксперимента представлены графически на рисунке 1.

Как показало исследование, максимальные показатели плотности были достигнуты в третьем варианте (с добавками метионина и лизина), показавшем лучшую адаптацию к термическим стрессам. Второй вариант (только с метионином) показал результат ниже третьего, но существенно выше контрольного.

Отмечено, что падение численности на 8 сутки коррелирует со снижением температуры среды. Последующее восстановление режима до 23–24 °С не привело к возвращению пиковых показателей, что свидетельствует о накоплении токсичных продуктов метаболизма. При этом угнетение культуры было наиболее выражено в группе с максимальной концентрацией аминокислот. Минимальные темпы размножения отмечены в контроле.

В процессе исследования мы отметили, что в опытных группах с добавлением аминокислот наблюдалась не только более высокая плотность популяции, но и увеличение продолжительности экспоненциальной фазы

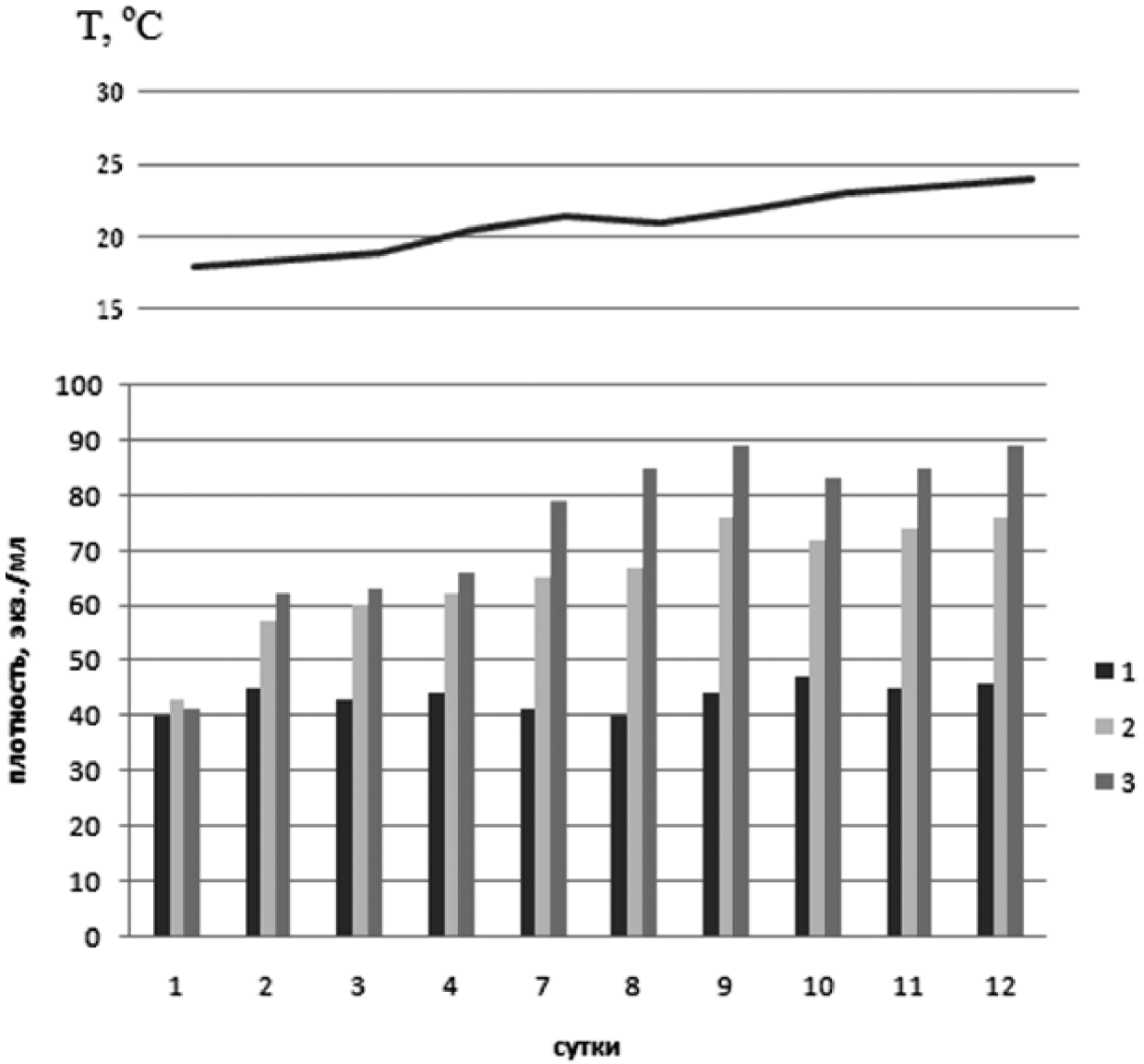


Рис. 1. Показатели роста плотности культуры коловратки на разных кормах:
1 — дрожжи, 2 — водоросль *Diacronema lutheri*+дрожжи+ витамин B_{12}+метионин, 3 — водоросль *Diacronema lutheri* + дрожжи + метионин + лизин + витамин B12

роста по сравнению с контрольной группой. Это может свидетельствовать о том, что метионин и лизин стимулируют пролиферацию и поддерживают метаболическую активность клеток на более высоком уровне. Мы пришли к выводу, что зафиксированное на 8-е сутки падение численности во всех группах, особенно выраженное при максимальной концентрации аминокислот, указывает на наличие пороговых значений, превышение которых приводит к угнетению культуры.

Полученные нами данные о стимулирующем эффекте обогащения рациона коловраток аминокислотами согласуются с результатами исследований, в которых показано, что использование специализированных схем кормления позволяет повысить продуктивность культуры *Brachionus plicatilis* и её пищевую ценность [6]. В работе A. Srivastava, K. Hamre, J. Stoss, R. Chakrabarti, S.K. Tonheim. было установлено, что аминокислотный состав коловраток, включая содержание лизина, варьирует в зависимости от применяемых диет, что подтверждает принципиальную возможность направленного обогащения [8]. Что касается физиологического значения метионина для личинок, наши предположения о его роли в синтезе таурина согласуются с исследованиями Saavedra, M.M.A.S., Barr Y., Pousão P, Helland S., et al., показавшими, что добавление лизина и тирозина в рацион личинок морского карася, получавших коловраток, позволяет корректировать метаболизм этих аминокислот на ранних стадиях развития [7].

С точки зрения физиологии личинок морских рыб, полученные результаты имеют прикладное значение. Метионин участвует в синтезе таурина, необходимого для работы сердечно-сосудистой системы, и служит предшественником цистеина и тирозина. В свою очередь, главная роль в кальцификации костных тканей принадлежит лизину, который также способствует синтезу мышечного белка и усвоения кальция. Для быстрорастущих пелагических (серрановые) и донных (камбаловые) рыб дефицит этих аминокислот ведет к деформациям скелета и задержке роста [5, 7]. Выходом является использование коловратки, выращенной на средах с балансом этих аминокислот, что проводит их непосредственно в ткани личинок, минимизируя риск алиментарных патологий.

Комплексные питательные смеси, включающие микроводоросли, витамины группы В и аминокислоты (метионин, лизин), обеспечивают интенсивную пролиферацию *Brachionus plicatilis*, превосходящую традиционные дрожжевые диеты. Однако при длительном накопительном культивировании избыток метионина может выступать лимитирующим фактором жизнеспособности популяции из-за накопления азотистых метаболитов. Поэтому мы рекомендуем производить замену одной трети культуральной среды либо корректировать дозировку добавок. Выявленный в нашем исследовании потенциал питательных смесей открывает перспективы для создания специализированных линий живого корма. Практическая значимость работы заключается в том, что предложенные схемы кормления могут быть адаптированы для использования в рыбоводных хозяйствах различного масштаба.

Таким образом, в данной статье были представлены результаты экспериментального исследования по оптимизации методов культивирования коловратки *Brachionus plicatilis*, которая является объектом первой ступени кормления личинок морских рыб в аквакультуре. Обоснована актуальность поиска эффективных питательных сред для массового выращивания этого гидробионта, так как традиционные дрожжевые диеты не обеспечивают достаточной пищевой ценности и продуктивности культуры. Установлено, что максимальная плотность популяции достигается при добавлении следующей смеси: водоросль Diacronema lutheri, дрожжи, метионин, лизин, витамин В12. При этом варианте комплексное обогащение рациона обеспечило лучшую адаптацию к термическим стрессам и интенсивную пролиферацию. Выявлено, что падение численности на 8-е сутки коррелирует со снижением температуры и накоплением токсичных продуктов метаболизма, особенно выраженным в группах с высокой концентрацией аминокислот. На основе полученных данных обоснована физиологическая роль метионина и лизина для развития личинок морских рыб: метионин участвует в синтезе таурина и является предшественником цистеина и тирозина, а лизин обеспечивает кальцификацию костных тканей и синтез мышечного белка. Дефицит этих аминокислот ведёт к деформациям скелета и задержке роста у быстрорастущих пелагических и донных видов. Предложены практические рекомендации по коррекции дозировок добавок и замене части культуральной среды для предотвращения негативных эффектов длительного накопительного культивирования.

Дальнейшие исследования в данной сфере могут быть направлены на оценку того, насколько повышенное содержание лизина и метионина в теле коловратки влияет на темп линейного роста, оссификацию скелета и иммунный статус личинок камбаловых и кефалевых рыб в первые недели постэмбрионального развития.

ЛИТЕРАТУРА

1. Винберг Г.Г. Интенсивность обмена и пищевые потребности рыб / Г.Г. Винберг. — Минск: Изд-во БГУ, 1956. — 253 с.
2. Семик А.А. О крупномасштабном выращивании солоноватоводной коловратки *Brachionus plicatilis* O.F. Mull на Таманском рыбопитомнике // Труды Южного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии. — 1995. — Т. 41. — С. 158–160.
3. Спекторова Л.В., Лебедева Л.И., Карташева Н.В., Орленко О.В., Корженко О.В. Инструкция по массовому разведению морских одноклеточных водорослей и коловраток. — Москва: ОНТИ ВНИРО, 1986. — 97 с.
4. Dinesh R., Nandhakumar S., Anand C., Kumar J.S.S., Padmavathy P. Comparative analysis of Nannochloropsis oculata, Dunaliella salina, and Tetraselmis gracilis as feed sources for rotifer, Brachionus plicatilis: Effects on population dynamics, biochemical composition, and fatty acid profile // Journal of Applied Phycology. — 2025. — Vol. 37. — pp. 1029–1039.
5. Halver J.E., Hardy R.W. Fish Nutrition. — 3rd ed. — Academic Press, 2002. — 824 p.
6. Hegab M., Abdelhameed M.S., Nasr H.Sh., Mola H.A. Applying a New Feeding Protocol for Enhancing Mass Culture and Nutritional Value of the Rotifer Brachionus plicatilis // Aquaculture Studies. — 2020. — Vol. 20, № 2. — pp. 81–89. — DOI: 10.4194/2618-6381-v20_2_02.
7. Saavedra M.M.A.S., Barr Y., Pousão P, Helland S., et al. Supplementation of tryptophan and lysine in Diplodus sargus larval diet: effects on growth and skeletal deformities // Aquaculture Research. — 2009. — №40 (10). — pp. 1191–1201. DOI: 10.1111/j.1365-2109.2009.02208. x.
8. Srivastava A., Hamre K., Stoss J., Chakrabarti R., Tonheim S.K. Protein content and amino acid composition of the live feed rotifer (Brachionus plicatilis): With emphasis on the water-soluble fraction // Aquaculture. — 2006. — Vol. 254, № 1-4. — pp. 534–543.
9. Tran-Nguyen Q.A., et al. Effects of Salinity, Temperature, and Diet on the Biological Characteristics of Brachionus plicatilis Müller, 1786 // Biology. — 2025. — Vol. 14, № 7. — pp. 878. — DOI: 10.3390/biology14070878.
10. Wang M., Guo Y., Wang M. Effects of several cultivation temperatures on miniaturization of the rotifers, Brachionus plicatilis // Aquaculture International. — 2025. — № 33. — pp. 514.
11. Watanabe T., Kitajima T., Fugita S. Nutrional values of live organisms used in Japan for mass propagation of fish: a review. Aguacultura. 1983. — № 34. — pp. 115–143.

© Рожнова Виктория Олеговна (yaviktoria.troyan@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.32

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ В СТЕНКЕ КАПИЛЛЯРНОГО РУСЛА ВОЛОСЯНЫХ СОСОЧКОВ КОЖИ ГОЛОВЫ ПОСЛЕ ТОПИЧЕСКОЙ ФОЛЛИКУЛЯРНОЙ СТИМУЛЯЦИИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

COMPARATIVE MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF CHANGES IN THE CAPILLARY BED WALL OF THE SCALP HAIR PAPILLAE AFTER TOPICAL FOLLICULAR STIMULATION IN THE EXPERIMENT

A. Sozykin
S. Vlasov
E. Mailler
A. Allakhverdieva

Summary. There is no information in the scientific literature about the effect of epigenil on the vascular wall of the microcirculatory bed of the hair papillae. Purpose. To study the changes in the ultrastructure of microvessels of the connective tissue papillae of the scalp dermis, with a focus on the capillaries of the hair follicles, in female and male rats 8 and 12 hours after applying the lotion to their scalp. In the experimental group, there was an increase in the diameter of the dermal papillary capillaries and microvessels of a similar network in the hair follicles, as well as moderate hyperemia without signs of inflammation. The recorded effect of capillaries — the expansion of their diameter lasted in the skin of the rats' heads for no more than 8 hours.

Keywords: epigenin, baldness, capillaries, hair follicles, aseptic inflammation, microcirculatory system, endotheliu.

Созыкин Александр Александрович
кандидат медицинских наук, доцент, Российский Государственный Социальный Университет, Москва
Aleks_sozykin@mail.ru
Власов Сергей Николаевич
ФГБОУ ВПО Ростовский государственный медицинский университет
ser.vl4s0v02@yandex.ru
Майллер Елизавета Станиславовна
Участковый педиатр,
Щербиновский ЦРБ МЗ, Ростов-на-Дону
maillerlisa@gmail.com
Аллахвердиева Адила Дагмановна
ФГБОУ ВПО Ростовский государственный медицинский университет, Ростов-на-Дону
ms_adila@mail.ru

Аннотация. Сведения в современной научной литературе о влиянии эпигенила на стенку сосудов микроциркуляторного русла волосяных сосочков отсутствуют. Целью нашего исследования было изучение изменений ультраструктуры микрососудов соединительнотканных сосочков дермы скальпа с акцентом на капилляры волосяных фолликулов у самок и самцов крыс через 8 и 12 часов после нанесения лосьона на кожу их головы. В экспериментальной группе отмечались признаки проявления асептического воспаления — статистически достоверное расширение диаметра дермальных сосочковых капилляров и у микрососудов аналогичной сети капилляров в волосяных фолликулах, а также их умеренное полнокровие (накопление и задержка эритроцитов) без проявлений воспаления. Зафиксированный эффект капилляров — расширение их диаметра продолжался в коже головы крыс не более 8 часов.

Ключевые слова: эпигенин, облысение, капилляры, волосяные фолликулы, асептическое воспаление, микроциркуляторное русло, эндотелий.

Актуальность

При различных патологиях кожи и ряде соматических заболеваний у людей обеих полов в области головной части (скальпа) возникает проблема избыточного выпадения волос (реактивные алопеции) или же тотальное облысение [1,2,3]. На сегодняшний день у врачей — трихологов наиболее эффективным и безопасным средством коррекции вышеуказанного косметического дефекта является применение «фолликулостимулирующих» молекул естественного происхождения (экстракты) или же искусственно синтезированных [4,5]. Флавонид эпигенил, являющийся одним из ведущих компонентов такого рода топических средств, по данным многочисленных исследований временно и локально расширяет диаметр дермальных капилляров сосочкового слоя, позволяя улучшить насыщение малодифференцированных клеток волосяных фолликулов элементами, необходимыми для активации роста стержней волос на голове [6].

Однако, в доступной нам научной литературе крайне малочисленны и противоречивы данные об изменении структуры сосудов и дермы в условиях стимуляции кровоснабжения кожи.

Цель

Изучить изменения ультраструктуры микрососудов соединительнотканных сосочков дермы скальпа с акцентом на капилляры волосяных фолликулов у самок и самцов крыс через 8 и 12 часов после нанесения лосьона на кожу их головы.

Материалы и методы

Изначально, на головную часть кожи 20 годовалых половозрелых крыс (10 самок, 10 самцов) площадью 1 кв. мм между ушными раковинами равномерно наносилось 0,5 мл раствора, содержащего эпигенил. Животные находились в стандартных и одинаковых условиях содержания. Из эксперимента крысы (по 5 особей различного пола на срок) выводились через 8 и 12 часов при условии введения нембуталового наркоза с соблюдением этических норм, согласно Европейской Конвенции защиты лабораторных животных (1986 г.). Наше экспериментальное исследование проводилось с разрешения локального этического комитета (5.09.25 г.). Полученный биопсионный материал — участки всех слоев лоскута кожи головы с волосяными сосочками, подвергшихся воздействию масляного раствора с содержанием эпигенила. Фрагменты кожи иссекались, фиксировались, обезвоживались и уплотнялись по стандартным методикам для последующего изготовления гистологических препаратов из серийных вертикальных и горизонтальных срезов. Контролем служили те же области кожи, взятые от здоровых: годовалых крыс: самца и самки, не подвергшихся контакту с препаратом. Для изучения результатов и сравнения материала эксперимента с контролем применялись методы классической гистологии: окраска гематоксилином — эозином и фуксин — резорцином по Вейгерту, окраска на соединительную ткань по Малори. Проведен также морфометрический анализ полученного материала при помощи съемки гистологических препаратов видеокамерой Levenhuk M1000 PLUS — 10 мпс. совмещенной с микроскопом Levenhuk MED D 30T и пакетом приложений к ней с программой «Морфометрия 7» (г. Санкт-Петербург 2024 г.).

Полученный биоматериал исследовался и с помощью метода просвечивающей электронной микроскопии. После стандартной обработки и приготовлении прицельных ультратонких срезов их просматривали на электронном микроскопе JEM-100S. НИИ Биологии ЮФУ ЦКП «Современная микроскопия». Выполнено также иммуногистохимическое исследование биоматериала с помощью моноклональных антител к маркеру пролиферации клеток сосудистой стенки CD-34 и маркером апоптоза белком P-53 DO7.

Основные результаты и обсуждение

Зафиксированный эффект капиллярного расширения продолжался в коже головы крыс не более 8 часов и не изменил архитектонику дермы, а также ультраструктуру физиологически обновляющихся клеточных элементов в капиллярах волосяных соединительнотканных сосочков (смотри рисунок 1).

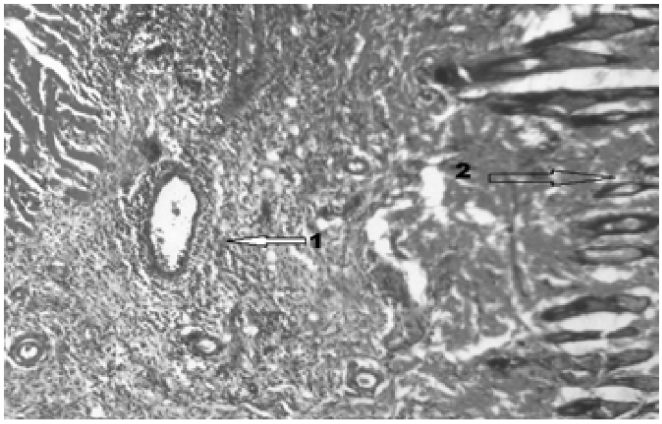


Рис. 1. Расширенные сосуды микроциркуляторного русла в дерме (1) и волосяных сосочках (2) крысы спустя 8 часов после нанесения на её головную область поверхностного слоя кожи 1 мл эпигенилсодержащего раствора. Ув. х20; Окраска препарата гематоксилин-эозином

В экспериментальной группе отмечались достоверно статистически различные, по сравнению с контролем показатели, отражающие: расширение диаметра дермальных сосочковых капилляров и у микрососудов анлогичной сети в волосяных фолликулах, а также их умеренное полнокровие без проявлений воспаления. Ультраструктура микроциркуляторного русла не изменялась (см. рисунок 2).

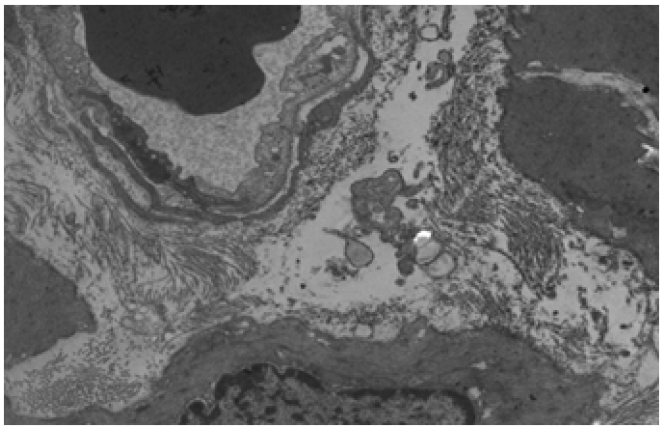


Рис. 2. Полнокровие капилляра соединительнотканного волосяного сосочка в области нанесения лосьона спустя 8 часов после его нанесения на кожу головы крысы. Электронная микрофотография Ув.х 6000

Иммуногистохимическое исследование взятого биоматериала с помощью моноклональных антител к маркеру пролиферации клеток сосудистой стенки CD-34 и маркером апоптоза белком P-53 DO7 показало отсутствие выраженной патологической пролиферации эндо-

телиальной выстилки микроциркуляторного русла, а так же апоптотической гибели клеточных элементов волосяных сосочков, эпидермиса, дермы и сосудистой стенки.

Заключение

Зафиксированный эффект капилляров — расширение их диаметра продолжался в коже головы крыс не более 8 часов и не изменил ультраструктуру стенки гемокапилляров, а также тканевых элементов волосяных соединительнотканных сосочков, не повлияв таким образом на архитектонику дермы в целом (см. рисунок 3).

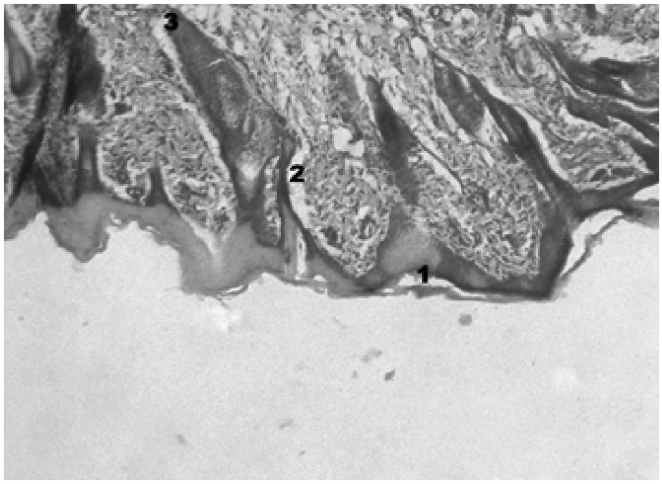


Рис. 3. Сохранность структуры волосяных сосочков в коже головы крысы через 12 часов после экспериментального нанесения эпигенилсодержащего раствора. Ув. х10. Окраска гематоксилином-эозином. Обзорное фото. 1. Эпидермис возле волосяной воронки 2. Волосяная сумка 3. Дермальный волосяной сосочек

ЛИТЕРАТУРА

1. Баландин А.А., Тиунова В.В., Баландина И.А. Причины возрастной алопеции с точки зрения современной морфологии. Journal of Siberian Medical Sciences. 2025;(2):113–126. https://doi.org/10.31549/2542-1174-2025-9-2-112-125
2. Цимбаленко Т.В., Гаджигороева А.Г. Трихоскопические признаки при андрогенетической алопеции. Клиническая дерматология и венерология. 2022; 21(5):708–714.
3. Tsimbalenko T.V., Gadzhigoroeva A.G. Trichoscopic signs in androgenetic alopecia. Russian Journal of Clinical Dermatology and Venereology. 2022;21(5):708–714. https://doi.org/10.17116/klinderma202221051708
4. Сенчукова С.Р., Кузнецова А.В., Криницына Ю.М. Современные методы мониторинга и дифференциальной диагностики нерубцовых форм алопеций // Современные проблемы науки и образования. 2017. № 1. ;URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=25905 (дата обращения: 18.10.2025).DOI: https://doi.org/10.17513/spno.25905
5. Sukandar E.Y., Ridwan A., Sukmawan Y.P. Vasodilation Effect of Oleanolic Acid and Apigenin as a Metabolite compound of Anredera cordifolia (Ten) V Steenis on isolated rabbit aortic and frog heart // Int. J. Res Ayurveda Pharm, 2016. Т. 7. № 5. С. 82–84.
6. Pindado-Ortega C. et al. Prescribing Habits for Androgenic Alopecia among Dermatologists in Spain in 2017: A Cross-Sectional Study //Actas Dermo-Sifiliográficas (English Edition), 2018. Т. 109. №. 6. С. 536–542.
7. Дхапте-Павар В., Саптарси Ш., Кенджале П. и др. Нанокосмецевтика: грани и аспекты // Косметика и медицина. Special edition. — 2021. — №2. — С. 20–23.
8. Королькова Т.Н., Харитонова Е.Е., Шепилова И.А. и др. Изучение эффективности косметического средства на основе пептидов в наружной терапии диффузной алопеции // Российский журнал кожных и венерических болезней. — 2020. — №3. — С. 188–193.
9. Горбик В.С., Шпрах З.С., Козлова Ж.М. и др. Липосомы как система таргетной доставки лекарственных средств (обзор) // Российский биотерапевтический журнал. — 2021. — №1. — С. 33–41.
10. Сунцова Л.П., Шлотгауэр А.А., Евсеенко В.И. и др. Исследование растворимости и мембранной проницаемости механохимически полученных твердых дисперсий растительных флавоноидов // Химия в интересах устойчивого развития. — 2019. — №27. — С. 193–199.
11. Дхапте-Павар В., Саптарси Ш., Кенджале П. и др. Нанокосмецевтика: грани и аспекты // Косметика и медицина. Special edition. — 2021. — №2. — С. 20–23.
12. Карнаухов В.К., Лукьянова А.А., Лукашина М.И. и др. Современные подходы к лечению андрогенетической алопеции // Вестник дерматологии и венерологии. — 2017. — №1. — С. 21–30.
13. Королькова Т.Н., Харитонова Е.Е., Шепилова И.А. и др. Изучение эффективности косметического средства на основе пептидов в наружной терапии диффузной алопеции // Российский журнал кожных и венерических болезней. — 2020. — №3. — С. 188–193.
14. Кубанова А.А., Утц С.Р., Кубанов А.А. и др. Перспективы практического использования наночастиц в дерматологии // Вестник дерматологии и венерологии. — 2016. — №2. — С. 15–20.
15. Сунцова Л.П., Шлотгауэр А.А., Евсеенко В.И. и др. Исследование растворимости и мембранной проницаемости механохимически полученных твердых дисперсий растительных флавоноидов // Химия в интересах устойчивого развития. — 2019. — №27. — С. 193–199.

© Созыкин Александр Александрович (Aleks_sozykin@mail.ru); Власов Сергей Николаевич (ser.vl4s0v02@yandex.ru); Майллер Елизавета Станиславовна (maillerlisa@gmail.com); Аллахвердиева Адила Дагмановна (ms_adila@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.33

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НА ВЫСОКОНАГРУЖАЕМЫХ БИОФИЛЬТРАХ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ПУТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА

Старостин Павел Олегович
Аспирант, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
zzz_lovetmm@mail.ru
Шаталов Андрей Борисович
Кандидат технических наук, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
Sab1509@ya.ru

Аннотация. Актуальность работы обусловлена ужесточением нормативных требований к качеству сбрасываемых в водные объекты сточных вод в Российской Федерации, переходом отрасли водоотведения к нормированию на основе наилучших доступных технологий (НДТ) и необходимостью снижения энергоёмкости сооружений биологической очистки. В качестве эффективной альтернативы традиционным аэротенкам рассматриваются высоконагружаемые биофильтры (ВБФ), сочетающие компактность, устойчивость к залповым нагрузкам и относительно низкие удельные энергозатраты. *Цель исследования* — систематизация технологических параметров работы ВБФ и обоснование современных путей интенсификации процесса биологической очистки сточных вод. *Методы*: сравнительный анализ нормативной базы (СП 32.13330.2018), обобщение отечественных и зарубежных научных публикаций, расчётно-теоретический анализ зависимостей между гидравлической и органической нагрузкой, высотой загрузочного слоя и эффективностью очистки. *Результаты*: определён диапазон рациональных значений гидравлической нагрузки 10–30 м^3/(м^2·сут) и окислительной мощности 0,75–4,5 кг БПК/(м^3·сут); показана зависимость БПК очищенной воды от высоты загрузки; систематизированы факторы, влияющие на эффективность работы ВБФ; выделены перспективные направления модернизации — применение плоскостной пластиковой загрузки с удельной поверхностью 100–300 м^2/м^3, двухступенчатых схем, совмещения с технологиями MBBR и BAF, регулируемой рециркуляции. *Выводы*: использование ВБФ с интенсификацией процесса позволяет обеспечить стабильное достижение БПК очищенной воды на уровне 15–20 мг/л и нитрификацию при снижении строительных и эксплуатационных затрат по сравнению с классическими аэротенками.

Ключевые слова: биологическая очистка сточных вод, высоконагружаемый биофильтр, биоплёнка, окислительная мощность, гидравлическая нагрузка, плоскостная загрузка, нитрификация, интенсификация очистки.

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT IN HIGH-RATE BIOFILTERS: TECHNOLOGICAL PARAMETERS AND WAYS OF PROCESS INTENSIFICATION

P. Starostin
A. Shatalov

Summary. The relevance of the study is determined by the tightening of environmental regulations concerning the discharge of treated wastewater into water bodies in the Russian Federation, the transition of the water-disposal sector to permitting based on Best Available Techniques (BAT), and the need to reduce the energy consumption of biological treatment facilities. High-rate biofilters (HRB) are considered as an effective alternative to conventional aeration tanks, combining compact layout, resistance to shock loads, and relatively low specific energy demand. *The aim of the research* is the systematisation of the technological parameters of HRB operation and the substantiation of modern ways for intensifying the biological wastewater treatment process. *Methods* include comparative analysis of the Russian regulatory framework (SP 32.13330.2018), synthesis of domestic and international scientific publications, and analytical examination of relationships between hydraulic and organic loading, depth of the filter bed, and treatment efficiency. *Results*: a rational range of hydraulic loading of 10–30 m^3/(m^2·day) and oxidation capacity of 0.75–4.5 kg BOD/(m^3·day) is established; the dependence of effluent BOD on media depth is shown; key factors affecting HRB performance are systematised; promising modernisation directions are highlighted — plastic plane-type media (100–300 m^2/m^3), two-stage schemes, integration with MBBR and BAF technologies, and controlled recirculation. *Conclusions*: applying intensified HRB schemes ensures stable effluent BOD of 15–20 mg/L and nitrification while reducing capital and operating costs in comparison with conventional aeration tanks.

Keywords: biological wastewater treatment, high-rate biofilter, biofilm, oxidation capacity, hydraulic loading, plastic plane media, nitrification, treatment intensification.

Введение

Водоотведение и биологическая очистка городских и производственных сточных вод остаются одними из ключевых инженерно-экологических задач современности. В Российской Федерации законодательные требования к качеству сбрасываемых сточных вод в последние годы планомерно ужесточаются: вступление в силу Федерального закона № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды»» и переход крупных промышленных объектов и централизованных систем водоотведения поселений на нормирование на основе наилучших доступных технологий (НДТ) существенно изменили условия проектирования и эксплуатации очистных сооружений. Установление нормативов допустимых сбросов (НДС) на уровне концентраций, близких к рыбохозяйственным ПДК, делает задачу глубокой биологической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод обязательным элементом любой современной канализационной схемы.

В этих условиях повышается практический интерес к сооружениям биологической очистки, обладающим сочетанием компактности, энергоэффективности, высокой удельной производительности и устойчивости к неравномерности поступающих нагрузок. Классические аэротенки, оставаясь наиболее распространённым типом сооружений, характеризуются значительным энергопотреблением (до 50–70 % электроэнергии очистной станции расходуется на аэрацию), повышенной чувствительностью к залповым органическим и токсическим нагрузкам, а также требуют существенных площадей отчуждения. В связи с этим в последние годы наблюдается возврат интереса к технологиям прикреплённой микрофлоры, среди которых важное место занимают высоконагружаемые биофильтры (ВБФ).

Биофильтр представляет собой аппарат, в котором биологическое окисление органических загрязнений осуществляется биоплёнкой, закреплённой на поверхности неподвижной загрузки, при фильтрации через неё сточной воды с периодической подачей воздуха. В сравнении с аэротенками биофильтры имеют ряд принципиальных преимуществ: отсутствие необходимости в энергозатратной пневматической или механической аэрации при естественной тяге, устойчивость биоценоза биоплёнки к кратковременным колебаниям нагрузки и температуры, меньший вынос активного ила и, как следствие, упрощённая схема вторичного отстаивания. Вместе с тем традиционные капельные биофильтры обладают ограниченной производительностью по органической нагрузке, что сделало необходимым создание высоконагружаемых конструкций.

В соответствии с требованиями СП 32.13330.2018 «Канализация. Наружные сети и сооружения» (актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85) биофильтры классифицируются по величине гидравлической и органической нагрузки на капельные, высоконагружаемые и биофильтры с плоскостной загрузкой. ВБФ представляют собой аппараты с увеличенной высотой загрузочного слоя (2–4 м), применением крупнофракционного или плоскостного загрузочного материала и, как правило, с организованной рециркуляцией очищенных сточных вод. Окислительная мощность таких сооружений достигает 2,0–4,5 кг БПК/(м^3·сут), что существенно превышает показатели капельных биофильтров и приближает ВБФ по производительности к аэротенкам при значительно меньших удельных энергозатратах.

Несмотря на многолетний опыт применения ВБФ в отечественной и зарубежной практике водоотведения, вопросы интенсификации их работы остаются предметом активных исследований. В последние 10–15 лет существенно расширился ассортимент синтетических загрузочных материалов с удельной поверхностью 100–300 м^2/м^3, развиваются гибридные технологии на базе биофильтрации (биоаэрируемые фильтры BAF, двухступенчатые схемы с выделенной ступенью нитрификации, совмещение с реакторами с подвижным слоем MBBR). Параллельно появляются возможности интеллектуального управления режимами работы на основе моделей искусственных нейронных сетей.

Цель настоящей работы — теоретический анализ эффективности биологической очистки сточных вод на высоконагружаемых биофильтрах и обоснование современных путей интенсификации процесса на основе обобщения нормативной базы, научных публикаций и расчётных зависимостей.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи: 1) рассмотреть конструктивные особенности и принципы работы ВБФ в сравнении с другими типами биофильтров; 2) систематизировать технологические параметры и расчётные зависимости, рекомендуемые СП 32.13330.2018 и научной литературой; 3) проанализировать факторы, определяющие эффективность биологической очистки на ВБФ; 4) выполнить сравнительный анализ различных типов биофильтров; 5) обобщить современные пути интенсификации процесса и перспективные направления их развития.

Конструктивные особенности и принцип работы высоконагружаемых биофильтров

Принцип действия биофильтра основан на биологическом окислении растворённых и коллоидных органических загрязнений сточных вод аэробной микрофлорой, закреплённой в виде биологической плёнки на поверхности загрузочного материала. При прохождении сточной воды тонким слоем по поверхности загрузки

происходит сорбция органических веществ биоплёнкой, их биохимическое окисление с участием кислорода воздуха, а также превращение аммонийного азота в нитритную и нитратную формы в результате деятельности нитрифицирующих бактерий. Продукты жизнедеятельности и отмершая биоплёнка периодически выносятся потоком воды и задерживаются во вторичных отстойниках.

Конструктивно высоконагружаемый биофильтр включает в себя следующие основные элементы: корпус (круглой или прямоугольной формы в плане, выполненный из железобетона, металла или композитных материалов); несущую и дренажную системы в виде колосниковой решётки или железобетонных балок со щелевыми отверстиями; загрузочный слой; систему распределения поступающих сточных вод; систему естественной или принудительной вентиляции; а также систему сбора и отвода очищенной воды и отмершей биоплёнки. Отдельные конструкции ВБФ дополнительно оснащаются системой рециркуляции, позволяющей возвращать часть очищенной воды на вход аппарата для выравнивания нагрузки.

Загрузочный материал является ключевым элементом ВБФ, во многом определяющим эффективность биологической очистки. Согласно СП 32.13330.2018, в ВБФ применяются два принципиально различных типа загрузочных материалов:

— объёмная загрузка — щебень прочных горных пород, гравий, керамзит, шлаки, а также специально формованные пластиковые изделия с размером фракции 40–70 мм и насыпной плотностью 500–1000 кг/м^3. Такая загрузка традиционно применяется в отечественной практике, обеспечивает удельную площадь поверхности биоплёнки до 80–100 м^2/м^3 и при относительно низкой стоимости обладает повышенной склонностью к заиливанию при органических нагрузках выше 1,0–1,5 кг БПК/(м^3·сут);
— плоскостная (блочная, модульная) загрузка — гофрированные пластиковые (чаще полипропиленовые или ПВХ) блоки, формирующие упорядоченную сеть каналов с пористостью 73–99 %. Удельная поверхность такой загрузки достигает 100–300 м^2/м^3, что позволяет повысить окислительную мощность ВБФ до 3,5–4,5 кг БПК/(м^3·сут). Плоскостная загрузка обеспечивает стабильный гидродинамический режим, минимизирует риск заиливания и снижает металлоёмкость корпуса за счёт меньшей массы.

Высота загрузочного слоя ВБФ согласно СП 32.13330.2018 принимается в пределах 2–4 м, что существенно превышает высоту капельных биофильтров (1–2 м) и меньше, чем у башенных биофильтров с пластмассовой загрузкой (до 8–16 м). Увеличенная высота обеспечивает достаточное время контакта сточной воды с биоплёнкой при повышенной гидравлической нагрузке, но одновременно требует организации эффективного воздухообмена по всей высоте аппарата.

Отличия ВБФ от смежных типов сооружений заключаются не только в высоте и виде загрузки. Капельные биофильтры рассчитываются на гидравлическую нагрузку 1–3 м^3/(м^2·сут) и применяются преимущественно на малых очистных станциях (до 1000 м^3/сут) с $БПК_{20}$ поступающих стоков до 200 мг/л. Башенные биофильтры с плоскостной загрузкой проектируются при гидравлических нагрузках до 10 м^3/(м^2·сут) и применяются там, где по соображениям компактности плана предпочтительна развитая вертикаль. ВБФ занимают промежуточное положение и ориентированы на городские сточные воды средней концентрации.

Система рециркуляции очищенных сточных вод — характерный признак ВБФ, отсутствующий у типовых капельных биофильтров. Возврат части очищенной воды (коэффициент рециркуляции R = 0,5–3,0) обеспечивает: а) разбавление поступающих стоков до концентрации БПК, приемлемой для однопроходного режима (≤ 300 мг/л); б) выравнивание суточной и сезонной неравномерности нагрузок; в) поддержание минимальной гидравлической нагрузки, достаточной для периодического «срыва» избыточной биоплёнки и предотвращения заиливания загрузки.

Технологические параметры и расчётные зависимости

Технологический расчёт ВБФ выполняется в соответствии с СП 32.13330.2018 и основывается на совместном учёте гидравлической нагрузки, органической нагрузки, окислительной мощности, температуры поступающих сточных вод и требуемой степени очистки. Для ВБФ с объёмной загрузкой допускаемая гидравлическая нагрузка принимается в диапазоне 10–30 м^3/(м^2·сут), при этом нижняя граница характерна для аппаратов, работающих без рециркуляции при низких концентрациях органических загрязнений, верхняя — для ВБФ с развитой рециркуляцией и плоскостной загрузкой.

Органическая нагрузка по БПКполн поступающих сточных вод без рециркуляции ограничивается величиной 300 мг/л для ВБФ и 150 мг/л для капельных биофильтров. Превышение этих значений приводит к ухудшению кислородного режима, преждевременному заиливанию загрузки и снижению эффективности очистки. При более высокой концентрации применяется рециркуляция очищенной воды с коэффициентом *R*, рассчитываемым по условию:

$$R = (L_{пост} - L_{доп}) / (L_{доп} - L_{рец}), \quad (1)$$

где $L_{пост}$ — БПКполн поступающих сточных вод, мг/л; $L_{доп}$ — допустимая $БПК_{полн}$ на входе в биофильтр, мг/л (300 мг/л для ВБФ); $L_{рец}$ — $БПК_{полн}$ рециркулирующей очищенной воды, мг/л.

Ключевым технологическим показателем является окислительная мощность (ОМ) — масса $БПК_{полн}$, удаляемая единицей объёма загрузки в сутки. Для ВБФ с объёмной загрузкой фракцией 40–70 мм ОМ составляет 0,75–2,25 кг БПК/(м³·сут), а при применении плоскостной пластиковой загрузки с удельной поверхностью 100–300 м²/м³ достигает 3,5–4,5 кг БПК/(м³·сут). Для капельных биофильтров ОМ не превышает 0,2–0,4 кг БПК/(м³·сут), что подтверждает многократное преимущество ВБФ по удельной производительности.

Расчётный объём фильтрующей загрузки определяется из материального баланса по БПК:

$$V = Q \cdot (L_1 - L_2) / M, \quad (2)$$

где V — объём фильтрующей загрузки, м³; Q — расчётный расход сточных вод, м³/сут; L_1, L_2 — $БПК_{полн}$ соответственно поступающих и очищенных сточных вод, мг/л (г/м³); M — окислительная мощность биофильтра, г БПК/(м³·сут).

Удельный расход воздуха для ВБФ с естественной вентиляцией принимается в соответствии с СП 32.13330.2018 в пределах 8–12 м³ на 1 м³ очищаемых сточных вод. При принудительной подаче воздуха (биоаэрируемые фильтры) расход воздуха снижается до 4–6 м³/м³ за счёт более полного использования кислорода. Естественная тяга обеспечивается за счёт разности температур внутри корпуса биофильтра и окружающего воздуха, что определяет сезонную неравномерность воздухообмена и требует дополнительных конструктивных решений для зимнего периода.

Требования к качеству поступающих сточных вод включают: максимальную концентрацию взвешенных веществ не более 150 мг/л для исключения быстрого заиливания; $БПК_{полн}$ не более 300 мг/л без рециркуляции; расчётную минимальную температуру 10 °С (при меньших значениях необходимо утепление корпуса и применение рециркуляции тёплой воды из вторичных отстойников). При отрицательных температурах наружного воздуха критичным становится кратность воздухообмена и теплоизоляция корпуса.

Количество избыточной биоплёнки, сбрасываемой с ВБФ при очистке хозяйственно-бытовых сточных вод, составляет ориентировочно 28 г сухого вещества на одного жителя в сутки при влажности 96 %, что соответствует 700 г биоплёнки натуральной влажности на жителя в сутки. Эта величина используется при расчёте вторичных отстойников и сооружений по обработке осадка.

Высота загрузочного слоя напрямую связана с требуемым качеством очистки по БПК. По обобщённым данным СП 32.13330.2018 и научной литературы, при гидравлической нагрузке 15–20 м³/(м²·сут) и температуре 10 °С для ВБФ с объёмной загрузкой можно принять следующие ориентировочные зависимости: Н = 2 м обеспечивает $БПК_{20}$ очищенной воды 25–30 мг/л; Н = 3 м — $БПК_{20}$ около 20 мг/л; Н = 4 м — $БПК_{20}$ около 15 мг/л. Для достижения более глубокой очистки (БПК менее 10 мг/л и обеспечение нитрификации) требуется переход к двухступенчатой схеме или применение плоскостной загрузки со значительной удельной поверхностью.

Сводные технологические параметры различных типов биофильтров представлены в таблице 1.

Факторы, влияющие на эффективность биологической очистки

Эффективность работы ВБФ определяется совокупностью технологических, конструктивных, гидродинамических и биохимических факторов, воздействующих на формирование и жизнедеятельность биоплёнки. К основным факторам относятся температура сточной воды, её активная реакция (pH), концентрация растворённого кислорода, состав биоценоза биоплёнки, соотношение биогенных элементов, гидравлический режим работы и сезонная нестабильность нагрузок.

Температура сточной воды является определяющим фактором активности биоценоза. Оптимальный диапазон для аэробной микрофлоры составляет 18–25 °С. При снижении температуры до 10 °С и ниже скорость биохимических реакций уменьшается приблизительно в 2 раза на каждые 10 °С (коэффициент температурной зависимости θ = 1,04–1,08), при этом особенно чувствительны к охлаждению нитрификаторы. В соответствии с СП 32.13330.2018 расчётной минимальной температурой сточных вод для биофильтров принимается 10 °С; при более низких значениях необходимо применение теплоизоляции корпуса, тамбурных конструкций входа и выхода воздуха, рециркуляции тёплой воды из вторичных отстойников.

Активная реакция сточных вод (pH) существенно влияет на видовой состав биоплёнки. Для смешанного биоценоза хозяйственно-бытовых стоков оптимальный диапазон pH составляет 6,5–8,5. Выход за эти границы приводит к ингибированию гетеротрофной микрофлоры и, в ещё большей степени, нитрификаторов, оптимум которых лежит в области pH 7,5–8,5. При поступлении производственных стоков с низким значением pH необходима предварительная нейтрализация.

Таблица 1.
Сравнительные технологические параметры биофильтров различных типов

Параметр	Капельный	Высоконагружаемый (объёмная загрузка)	Башенный	С плоскостной загрузкой
Высота загрузки H, м	1–2	2–4	8–16	3–6
Фракция / тип загрузки	Щебень 25–40 мм	Щебень/керамзит 40–70 мм	Пластиковые блоки	ПВХ/ПП блоки, пористость 73–99 %
Удельная поверхность, $м^2/м^3$	60–80	80–100	90–150	100–300
Гидравлическая нагрузка q, $м^3/(м^2·сут)$	1–3	10–30	6–10	10–40
$БПК_{полн}$ поступающих стоков, мг/л (без R)	≤ 150	≤ 300	≤ 300	≤ 300
Окислительная мощность, кг БПК/$(м^3·сут)$	0,2–0,4	0,75–2,25	1,0–2,0	2,0–4,5
Коэффициент рециркуляции R	0–0,5	0,5–3,0	0,5–2,0	0,5–2,0
Удельный расход воздуха, $м^3/м^3$	естественная тяга	8–12	8–12	4–12
БПК очищенной воды, мг/л	20–25	15–25	15–20	10–15
Область применения	Малые станции до 1000 $м^3$/сут	Городские ОС средней производительности	Компактные ОС в стеснённых условиях	Современные ОС, нитрификация

Концентрация растворённого кислорода в жидкой фазе, контактирующей с биоплёнкой, должна быть не менее 2 мг/л для стабильной гетеротрофной окислительной деятельности и не менее 3–4 мг/л для нитрификации. В ВБФ с естественной тягой кислород поступает за счёт диффузии из проходящего через загрузку воздуха. Эффективность воздухообмена зависит от разности температур, высоты аппарата, пористости загрузки и наличия застойных зон. При неблагоприятных условиях (летние месяцы, безветренная погода, малая тяга) применяется принудительная подача воздуха.

Биоценоз биоплёнки ВБФ характеризуется выраженной вертикальной стратификацией. В верхних слоях, куда поступает максимальная нагрузка по органическим веществам, доминируют гетеротрофные бактерии родов Pseudomonas, Zoogloea, Alcaligenes, Flavobacterium, а также простейшие и высшие организмы — коловратки, нематоды. В нижних, более очищенных слоях, при снижении БПК до уровня менее 10–20 мг/л условия становятся благоприятными для развития автотрофных нитрифицирующих бактерий Nitrosomonas (окисление NH_4^- до NO_2^-) и Nitrobacter (окисление NO_2^- до NO_3^-). Принципиальным условием нитрификации является снижение концентрации органических загрязнений: при БПК в воде более 10–20 мг/л гетеротрофы, обладающие более высокой удельной скоростью роста, вытесняют нитрификаторов из биоценоза.

Соотношение биогенных элементов в поступающих сточных водах определяет полноту биологической очистки. Для сбалансированного роста биоценоза необходимо соблюдение соотношения БПК : N : P = 100 : 5 : 1. В хозяйственно-бытовых сточных водах это соотношение обычно выполняется за счёт естественного содержания азота и фосфора. В производственных стоках (пивоваренная, молочная, целлюлозно-бумажная промышленность) часто требуется дозирование соединений азота и/или фосфора для поддержания нормальной жизнедеятельности биоплёнки.

Гидравлический режим работы биофильтра определяется равномерностью распределения сточных вод по поверхности загрузки. Неравномерное орошение приводит к локальным перегрузкам и образованию сухих зон, в которых биоплёнка отмирает. В современных ВБФ для распределения стоков применяются реактивные оросители — вращающиеся под действием реактивной силы вытекающей воды оросительные системы с 4–6 лучами. Такие оросители обеспечивают равномерное покрытие всей поверхности загрузки и не требуют затрат электроэнергии. В аппаратах прямоугольной формы применяются подвижные лотковые распределители или стационарные дырчатые трубы.

Сезонная нестабильность нагрузок — характерная особенность хозяйственно-бытовых сточных вод, особенно в малых и средних поселениях. Суточные колебания расхода достигают 1,3–1,8 от среднего, сезонные — 1,5–2,0. Для обеспечения стабильной работы ВБФ в условиях нестационарного режима применяется рециркуляция очищенной воды с регулируемым коэффициентом R, обеспечивающая поддержание минимально необходимой гидравлической нагрузки и сглаживание пиковых концентраций загрязнений. Рециркуляция также способствует поддержанию оптимального температурного режима в холодный период года.

Сравнительный анализ видов биофильтров

Сопоставление технологических параметров биофильтров различных типов (табл. 1) позволяет выделить ряд закономерностей. Прежде всего, отчётливо прослеживается взаимосвязь между удельной поверхностью загрузки, окислительной мощностью и эффективностью удаления органических загрязнений. Переход от крупнофракционной объёмной загрузки к блочной пластиковой плоскостной загрузке увеличивает удельную поверхность биоплёнки в 2–4 раза и окислительную мощность — в 2–3 раза, что позволяет сократить строительный объём сооружения при прочих равных условиях.

Капельные биофильтры, исторически являвшиеся основным типом сооружений с прикреплённой микрофлорой, в настоящее время имеют ограниченную область применения — преимущественно малые очистные станции производительностью до 1000 м³/сут. Их преимущества — простота конструкции, отсутствие вращающихся узлов и энергопотребления на аэрацию — сохраняются, однако низкая окислительная мощность (не более 0,2–0,4 кг БПК/(м³·сут)) и невозможность эффективной работы при БПК поступающих стоков выше 150 мг/л существенно ограничивают их использование.

ВБФ с объёмной загрузкой остаются наиболее распространённым решением в реконструируемых и вновь строящихся сооружениях биологической очистки средней производительности (1000–10 000 м³/сут). Их преимущества включают относительно низкую стоимость загрузочного материала, устойчивость к залповым нагрузкам и возможность длительной эксплуатации без капитального ремонта. Недостатки связаны с риском заиливания при повышенной органической нагрузке и значительной массой загрузки, требующей усиленных несущих конструкций.

Башенные биофильтры представляют собой компактные высотные сооружения (8–16 м), применяемые в стеснённых условиях, — в том числе при реконструкции существующих очистных станций. За счёт значительной высоты загрузки достигается многократный контакт стоков с биоплёнкой, однако эффективная работа требует применения принудительной аэрации и продуманной системы распределения воды по высоте. ВБФ с плоскостной пластиковой загрузкой по технологическим показателям максимально приближены к аэротенкам: достигаемая БПК очищенной воды 10–15 мг/л, окислительная мощность до 4,5 кг БПК/(м³·сут), возможность нитрификации при двухступенчатой схеме. Такие сооружения являются наиболее перспективными для нового строительства и глубокой реконструкции действующих очистных станций в условиях ужесточения нормативов НДС.

Современные пути интенсификации процесса

Современные пути интенсификации биологической очистки сточных вод на ВБФ можно условно разделить на конструктивно-технологические и технолого-управленческие. К первым относятся применение новых загрузочных материалов, переход к многоступенчатым и гибридным схемам, совершенствование систем аэрации. Ко вторым — регулирование рециркуляции, оптимизация предварительной механической очистки, внедрение автоматизированных систем управления, в том числе на основе искусственного интеллекта.

Применение синтетических пластиковых загрузок с удельной поверхностью 100–300 м²/м³ является одним из наиболее эффективных направлений модернизации. Современные блочные загрузки из полипропилена и ПВХ (отечественные разработки на основе гофрированных листов и трубчатых элементов, аналоги зарубежных — Flocor, BIOdek, Cloisonyle и др.) обеспечивают пористость 90–99 %, низкую удельную массу (35–60 кг/м³), высокую химическую и биологическую стойкость. Использование таких загрузок позволяет увеличить окислительную мощность ВБФ в 2–3 раза при снижении массы конструкции в 10–15 раз по сравнению с традиционной щебёночной загрузкой.

Биоаэрируемые фильтры (BAF — biological aerated filter; в отечественной литературе — каркасно-насыпные или принудительно аэрируемые биофильтры, КНФ) представляют собой аппараты с затопленной зернистой загрузкой и принудительной подачей сжатого воздуха в нижнюю часть. В отличие от классических ВБФ, BAF работают в затопленном режиме, что увеличивает время контакта воды с биоплёнкой и устраняет зависимость от естественной тяги. Достигаемая окислительная мощность BAF составляет 5–8 кг БПК/(м³·сут), что значительно превышает показатели аэротенков. BAF обеспечивают одновременную задержку взвешенных веществ, что позволяет исключить вторичные отстойники.

Двухступенчатые схемы биофильтрации основаны на разделении процессов биохимического окисления углерода и нитрификации между двумя последовательно работающими аппаратами. На первой ступени при высокой органической нагрузке (2,5–4,5 кг БПК/(м³·сут)) осуществляется интенсивное удаление гетеротрофными бактериями растворённых органических загрязнений. На второй ступени при сниженной органической нагрузке (БПК < 20 мг/л) создаются условия для развития нитрифицирующего биоценоза, обеспечивающего окисление аммонийного азота. Такая схема позволяет одновременно достичь глубокой очистки по БПК (менее 10 мг/л) и по азоту аммонийному (менее 1–2 мг/л), что критично в условиях ужесточения требований к сбросам в рыбохозяйственные водные объекты.

Совмещение ВБФ с технологией реакторов с подвижным слоем MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) — одно из наиболее динамично развивающихся направлений. В MBBR-реакторах биоплёнка развивается на свободно плавающих пластиковых элементах-носителях (AnoxKaldnes K1, K3, K5 и их отечественные аналоги) с удельной поверхностью 350–800 м^2/м^3. Использование гибридных схем ВБФ + MBBR позволяет разделить функции по удалению углерода и нитрификации, обеспечить высокую устойчивость к залповым нагрузкам и компактность сооружения.

Регулируемая рециркуляция очищенных сточных вод с автоматизированным управлением коэффициентом *R* в зависимости от концентрации загрязнений в поступающих стоках и температуры обеспечивает стабильность работы ВБФ в условиях переменных нагрузок. Современные системы управления на базе онлайн-анализаторов БПК/ХПК и датчиков растворённого кислорода позволяют поддерживать *R* в оптимальном диапазоне 0,5–3,0 с шагом 0,1, что снижает удельное энергопотребление насосных агрегатов на 15–25 %.

Предварительная механическая очистка является обязательным условием стабильной работы ВБФ. Поступление стоков с концентрацией взвешенных веществ более 150 мг/л приводит к ускоренному заиливанию загрузки, снижению порозности, образованию анаэробных зон и преждевременной потере окислительной мощности. Рекомендуемая схема предварительной очистки включает решётки с прозорами 6–10 мм, песколовки и первичные отстойники с эффективностью по взвешенным веществам не менее 50–60 %.

Зарубежный опыт применения биофильтрации включает широкое внедрение технологий BAF (Biofor, Biostyr, Biocarbone компании Degrémont/SUEZ), MBBR (AnoxKaldnes, Veolia) и IFAS (интегрированный активный ил с неподвижной плёнкой). Общим для этих решений является высокая степень автоматизации, применение современных композитных материалов загрузки и гибкие технологические схемы, позволяющие адаптировать сооружение к конкретным условиям. Отечественные разработки (системы типа «Биосфера», «БиоРотор», полимерные загрузки «ПолиКсин», «ЕРШ» и др.) демонстрируют сопоставимые технологические показатели при более низкой стоимости, однако требуют дальнейшего совершенствования систем управления и стандартизации параметров загрузочных материалов.

Перспективным направлением является применение искусственных нейронных сетей (ИНС) для прогнозирования и управления режимами работы биофильтров. ИНС позволяют построить нелинейную модель связи между входными параметрами (расход, БПК, ХПК, взвешенные вещества, температура, pH, концентрация азота и фосфора) и показателями качества очищенной воды, осуществляя предиктивное управление режимом аэрации, рециркуляции и сбросом избыточной биоплёнки. По данным ряда исследований, внедрение нейросетевых алгоритмов управления позволяет снизить удельное энергопотребление на 10–20 % и уменьшить дисперсию БПК очищенной воды на 30–40 % по сравнению с традиционным ПИД-регулированием.

Заключение

Выполненный теоретико-аналитический анализ эффективности биологической очистки сточных вод на высоконагружаемых биофильтрах позволяет сформулировать следующие основные выводы:

1. Высоконагружаемые биофильтры, работающие в соответствии с требованиями СП 32.13330.2018 при гидравлической нагрузке 10–30 м^3/(м^2·сут), органической нагрузке по БПКполн до 300 мг/л и высоте загрузочного слоя 2–4 м, обеспечивают эффективную биологическую очистку хозяйственно-бытовых сточных вод с достижением $БПК_{20}$ на уровне 15–25 мг/л и превосходят традиционные капельные биофильтры по удельной производительности в 4–5 раз.
2. Окислительная мощность ВБФ с объёмной загрузкой составляет 0,75–2,25 кг БПК/(м^3·сут), а при применении плоскостной пластиковой загрузки с удельной поверхностью 100–300 м^2/м^3 достигает 4,5 кг БПК/(м^3·сут), что делает плоскостную загрузку предпочтительным решением для новых и реконструируемых объектов при ограниченной площади застройки.
3. Высота загрузки ВБФ является ключевым расчётным параметром, определяющим требуемую глубину очистки: H = 2 м обеспечивает $БПК_{20}$ 25–30 мг/л, H = 3 м — около 20 мг/л, H = 4 м — 15 мг/л; для достижения более глубокой очистки и стабильной нитрификации необходим переход к двухступенчатым или гибридным схемам.
4. Эффективность биологической очистки на ВБФ определяется совокупностью факторов, среди которых наибольшее значение имеют температура сточных вод (расчётная 10 °C с обязательным утеплением корпуса), активная реакция pH (оптимум 6,5–8,5), соотношение биогенных элементов БПК : N : P = 100 : 5 : 1, равномерность гидравлического режима и наличие рециркуляции с коэффициентом R = 0,5–3,0.
5. Современные пути интенсификации процесса — применение плоскостной пластиковой загрузки, переход к двухступенчатым схемам, совмещение с технологиями BAF и MBBR, автоматизированная регулируемая рециркуляция и внедрение нейросетевых алгоритмов управления — позволяют достичь БПК очищенной воды 10–15 мг/л и устой-

чивой нитрификации при снижении удельного энергопотребления на 10–25 % по сравнению с классическими аэротенками.

6. Результаты проведённого обзорно-аналитического исследования могут быть использованы при проектировании и реконструкции очистных сооружений канализации населённых пунктов и промышленных предприятий в условиях перехода к системе нормирования на основе НДТ и служат научно-технической основой для формирования рациональных технологических схем с применением ВБФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85. — М. : Минстрой России : Стандартинформ, 2019. — 108 с.
2. Хенце М., Армоэс П., ля Кур-Янсен Й., Арван Э. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы : пер. с англ. — М. : Мир, 2006. — 480 с. — ISBN 5-03-003771-X.
3. Воронов Ю.В., Яковлев С.В. Водоотведение и очистка сточных вод : учебник для вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство АСВ, 2006. — 704 с. — ISBN 5-93093-127-6.
4. Яковлев С.В., Карелин Я.А., Ласков Ю.М., Калицун В.И. Канализация. Очистка сточных вод : учебник для вузов. — 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Стройиздат, 1987. — 448 с.
5. Старовойтов С.В., Саийд М., Успенский И.А., Долгова А.Н. Погружные вращающиеся биофильтры с мобильным загрузочным материалом // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. — 2024. — № 2. — С. 186–192. — DOI: 10.36508/rsatu.2024.30.84.024.
6. Mpongwana N., Rathilal S. Exploiting Biofilm Characteristics to Enhance Biological Nutrient Removal in Wastewater Treatment Plants // Applied Sciences. — 2022. — Vol. 12, No. 15. — P. 7561. — DOI: 10.3390/app12157561.
7. Madan S., Madan R., Hussain A. Advancement in biological wastewater treatment using hybrid moving bed biofilm reactor (MBBR): a review // Applied Water Science. — 2022. — Vol. 12, No. 6. — P. 1–17. — DOI: 10.1007/s13201-022-01662-y.
8. Qiu C., Liu J., Ma Y., Zhang Y. A Highly Packed Biofilm Reactor with Cycle Cleaning for the Efficient Treatment of Rural Wastewater // Water. — 2021. — Vol. 13, No. 3. — P. 369. — DOI: 10.3390/w13030369.
9. González-Martínez A., Muñoz-Palazón B., Rodríguez-Sánchez A., Maza-Márquez P. Microbial Ecology of Granular Biofilm Technologies for Wastewater Treatment: A Review // Microorganisms. — 2024. — Vol. 12, No. 3. — P. 433. — DOI: 10.3390/microorganisms12030433.
10. Найдёнко В.В., Губанов Л.Н., Косариков А.Н. Очистка и утилизация промстоков химических производств. — Н. Новгород : Деком, 1996. — 248 с.
11. Журба М.Г., Говорова Ж.М. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений : в 3т. Т.2. Очистка и кондиционирование природных вод. — М. : Издательство АСВ, 2010. — 552 с. — ISBN 978-5-93093-789-5.
12. Фесенко Л.Н., Пчельников И.В., Игнатенко С.И. Интенсификация процессов биологической очистки сточных вод с применением технологии MBBR // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2019. — № 3 (76). — С. 157–166.
13. Гогина Е.С., Гульшин И.А. Энергоэффективные технологии биологической очистки городских сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. — 2020. — № 5. — С. 52–58.
14. Харькина О.В. Эффективная эксплуатация и расчёт сооружений биологической очистки сточных вод. — Волгоград : Панорама, 2015. — 433 с. — ISBN 978-5-9905946-8-1.
15. Данилович Д.А., Козлов М.Н. Сравнительный анализ технологий биологической очистки городских сточных вод с применением прикреплённой и взвешенной микрофлоры // Водоснабжение и санитарная техника. — 2018. — № 9. — С. 40–49.
16. Куликов Н.И., Ноцков Н.П., Приходько В.П. Теоретические основы очистки воды. — Макеевка : Норд-Пресс, 2009. — 298 с.
17. Ружицкая О.А., Гогина Е.С. Применение нейросетевых алгоритмов для управления процессами биологической очистки сточных вод // Вестник МГСУ. — 2022. — Т. 17, № 8. — С. 1058–1069. — DOI: 10.22227/1997-0935.2022.8.1058-1069.
18. Федеральный закон от 21.07.2014 № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Электронный ресурс]. — URL: http://pravo.gov.ru (дата обращения: 15.06.2025).

© Старостин Павел Олегович (zzz_lovetmm@mail.ru); Шаталов Андрей Борисович (Sab1509@ya.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.34

ОЦЕНКА РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА ДЕКОРАТИВНЫХ, ЛЕКАРСТВЕННЫХ И ПИЩЕВЫХ ВИДОВ РАСТЕНИЙ АЛЬПИЙСКОГО ПОЯСА ПРЕДПОСЫЛКИ К ИХ ХОЗЯЙСТВЕННОМУ ОСВОЕНИЮ И ИНТРОДУКЦИИ В КУЛЬТУРУ[1]

Сунь Лэй
Старший преподаватель, Хэйхэский университет
26453769@qq.com
Ян Дэчэн
Стажер-исследователь, Хэйхэский университет
Цао Фуцюань
Профессор, Хэйхэский университет
358792353@qq.com

Аннотация. В статье рассматривается проблема таксономической бедности ассортимента садовых растений в высокогорных холодных районах и недостаточной выраженности локальной идентичности объектов озеленения. На примере Айхуйского района города Хэйхэ проведены инвентаризация и отбор декоративных видов, совмещающих пищевые и лекарственные свойства. Методологическая основа включает полевые маршрутные исследования, анализ флористических источников и многокритериальную оценку перспективности таксонов. Установлено, что в районе произрастает не менее 40 видов с высоким адаптационным потенциалом, декоративными качествами и этнокультурной значимостью. Разработана ландшафтная модель «категориальная экспозиция — полисезонная эстетика» и планировочная структура на основе этнического зонирования. Полученные результаты подтверждают принципиальную возможность интродукции данных растений в садово-парковую практику высокогорных территорий.

Ключевые слова: растения двойного пищевого и лекарственного назначения, декоративные признаки, ландшафтное использование, высокогорные территории, северные этнические меньшинства.

ASSESSMENT OF THE RESOURCE POTENTIAL OF ORNAMENTAL, MEDICINAL AND FOOD SPECIES OF PLANTS OF THE ALPINE BELT PREREQUISITES FOR THEIR ECONOMIC DEVELOPMENT AND INTRODUCTION INTO CULTURE

Sun Lei
Yang Decheng
Cao Fuquan

Summary. The article examines the problem of taxonomic poverty of the assortment of garden plants in high-altitude cold areas and insufficient expression of the local identity of landscaping objects. On the example of the Aihui district of Heihe, an inventory and selection of decorative species combining food and medicinal properties were carried out. The methodological framework includes field route studies, floristic source analysis, and multi-criteria assessment of taxa prospectivity. It has been established that at least 40 species with high adaptive potential, decorative qualities and ethnocultural significance grow in the region. A landscape model «categorical exposure — polyseason aesthetics» and a planning structure based on ethnic zoning have been developed. The results obtained confirm the fundamental possibility of introducing these plants into the landscape gardening practice of highland areas.

Keywords: plants of dual food and medicinal purpose, decorative features, landscape use, highland areas, northern ethnic minorities.

Введение

Под влиянием двух государственных стратегических инициатив — «Здоровый Китай» и «Экологическая цивилизация» — в последние годы фиксируется устойчивый рост общественного запроса на городские ландшафтные объекты, интегрирующие рекреационно-оздоровительные и средоформирующие функции. Таксоны растений, обладающие одновременно пищевой и лекарственной ценностью, представляют собой естественное связующее звено между сектором профилактической медицины и сферой экологического дизайна, что обусловливает значительные перспективы для их интродукции и хозяйственного использования. Однако в высокогорных и холодных климатических зонах системные исследования в данной области остают-

[1] Данная статья публикуется в рамках научно-исследовательского проекта основного операционного расхода вузов в провинции Хэйлунцзян 2022 г. на тему «Исследование развития и одомашнивания ресурсов горных дикорастущие овощей в урочище Хэйхэ для продуктов питания, имеющие лечебные свойства и здравоохранения» Проект:2022-KYYWF-0392

ся фрагментарными. Остро востребовано выяснение структуры локального ресурсного генофонда, параметров стрессоустойчивости и ландшафтной пластичности таких видов применительно к специфическим абиотическим факторам.

Настоящая работа на примере Айхуйского района г. Хэйхэ направлена на планомерное изучение фондов декоративных растений с двойным пищевым и лекарственным статусом. Исследование опирается на данные, представленные в фундаментальных флористических сводках, в частности во «Флоре Хэйлунцзяна» [9]. Полученные результаты позволяют сопрячь садовую ботанику с актуальными концепциями «экологического города» и лесотерапии [2, 3], предлагая новые методологические подходы и примеры локальной адаптации для развития теории ландшафтного проектирования в условиях холодного климата.

Исследования, посвящённые использованию растений двойного лекарственно-пищевого назначения в садово-парковом строительстве, за последние годы достигли заметного прогресса. В научном сообществе сформировалась базовая исследовательская парадигма, охватывающая весь процесс — от инвентаризации ресурсов in situ до практической экспозиции в культуре. В частности, апробирован алгоритм «обследование — комплексная оценка — модели применения» [1]. Разработаны модели многокритериальной оценки декоративной ценности, что позволило перейти к количественному обоснованию отбора наиболее перспективных таксонов [4]. Постепенно расширяется спектр объектов проектирования: от публичных садов общего пользования [8] до специализированных просветительских садов при медицинских учреждениях [3]. Фундамент локальной флористики, заложенный Чжоу Иляном и соавторами [9], а также углублённый анализ отдельных видов, выполненный Ли Бинем [5], совместно обогатили теоретический уровень и методологический инструментарий в этой области.

Тем не менее анализ литературы выявляет несколько устойчивых недостатков. Во-первых, явно недостаточное внимание уделяется высокогорным и приграничным районам с суровыми природными условиями. Во-вторых, в существующих работах практически не рассматриваются комплексные вопросы, связанные с адаптацией растений к высотному стрессу и долговременной устойчивостью формируемых ландшафтных композиций. В-третьих, остаётся не обеспеченной глубокая интеграция использования растений двойного назначения с уникальной традиционной культурой локальных этнических меньшинств.

Материалы и методы исследования

Публикация подготовлена в рамках научно-исследовательского проекта по базовому финансированию вузов провинции Хэйлунцзян (2022 г.) «Изучение путей введения в одомашнивание и хозяйственного использования ресурсов горных дикорастущих овощных растений урочища Хэйхэ, обладающих пищевой и профилактической ценностью» (проект № 2022-KYYWF-0392). Исследование выполнялось на территории Айхуйского района городского округа Хэйхэ (провинция Хэйлунцзян), характеризующегося типичными чертами высокогорного холодного климата: продолжительная зима с низкими отрицательными температурами, короткий вегетационный период и значительная амплитуда суточных температур. Исходным нормативным документом для отбора таксонов служил «Перечень продуктов, относимых к пищевым и лекарственным», утверждённый Национальной комиссией по здравоохранению КНР. Дополнительно привлекались региональные флористические описания и архивные данные о традиционном природопользовании.

Полевые исследования проводились маршрутным методом в вегетационные сезоны 2022–2023 гг. Верификация таксономической принадлежности образцов выполнялась с использованием определителей и флористических сводок [9]. Для каждого выявленного вида фиксировались жизненная форма, декоративные органы, фенологические сроки цветения и плодоношения, продолжительность жизненного цикла, а также предпочтительная освещённость (гелиофиты, сциофиты, факультативные формы).

Оценка перспективности таксонов для интродукции в культуру проводилась по трём группам критериев: адаптационный потенциал (морозостойкость, устойчивость к температурным перепадам), декоративные качества (выраженность цветения, форма кроны, сезонная динамика окраски) и этнокультурная значимость (наличие традиций употребления у маньчжуров, эвенков и дауров). Итоговый перечень формировался экспертным методом с балльной оценкой. Всего было проанализировано 78 исходных таксонов, из которых для дальнейшей работы отобрано 45.

Ландшафтное проектирование тематического парка выполнялось с использованием методов ландшафтно-экологического зонирования и этнокультурного позиционирования. Общая планировочная схема строилась по принципу «центральное ядро — три этнические группы» с воссозданием традиционных природопользовательскихукладовивертикальнойструктурыфитоценозов.

Результаты и обсуждения

В результате полевых исследований и последующей верификации было достоверно установлено произрастание 45 видов высших сосудистых растений, обладающих одновременно пищевой ценностью, лекар-

ственными свойствами и выраженным декоративным потенциалом. Среди них преобладают травянистые многолетники, составляющие около 44 % от общего числа, что отражает типичную для высокогорных холодных флор структуру. Древесные формы представлены 7 видами, кустарники — 11 видами, лианы — 6 видами. Подбор осуществлялся с учётом круглогодичной декоративности: раннецветущие виды для весны, медоносы для лета, плодоносящие таксоны для осени и вечнозелёные формы для зимнего аспекта. Среди кустарников зарегистрировано 11 видов, цветение которых приходится на май — июль, а плодоношение — на июль — сентябрь. Около 80 % кустарников являются теневыносливыми или полутеневыми, что позволяет размещать их в подлеске и на северных фасадах.

На основе выполненного ресурсного обследования предложена модель тематического парка. Центральное ядро («Дерево симбиоза») символизирует культуру сосуществования коренных народов с ресурсными видами; в качестве ключевого элемента использован высокоморозостойкий долгоживущий таксон (Quercus mongolica или Pyrus ussuriensis). Этнические ландшафтные зоны включают маньчжурский блок (агроритуальный ландшафт с аптекарским огородом и реконструкцией алтаря), эвенкийский блок (трёхъярусная таёжная структура с формами традиционных жилищ) и даурский блок (агроландшафт с сакральными видами Salix и мастерской плетения). Полученные решения впервые обеспечивают сопряжение ландшафтного ассортимента с этнокультурными традициями трёх коренных этносов на уровне планировочной структуры.

Выводы

На примере Айхуйского района города Хэйхэ в условиях сурового высокогорного климата проведена комплексная инвентаризация ресурсного потенциала декоративных видов, совмещающих пищевые и лекарственные свойства. Отобрано 45 перспективных таксонов с высокой адаптивностью, эстетическими и функциональными качествами, что создаёт основу для обновления ассортимента садовых растений в холодных регионах. Разработана оригинальная система фитоландшафта, основанная на принципах полисезонной эстетики и вертикальной структуры «деревья — кустарники — травы». Предложена планировочная модель «центральное ядро — три этнические группы», обеспечивающая интеграцию ресурсных видов с этнокультурным наследием, просветительской деятельностью и рекреационной функцией. Подтверждена принципиальная возможность интродукции и хозяйственного освоения растений двойного пищевого и лекарственного назначения в садово-парковой практике высокогорных территорий. Дальнейшие исследования целесообразно направить на селекционное улучшение морозостойкости и декоративных признаков местных форм, а также на расширение сфер применения в рамках концепций «Здоровый Китай» и сельского возрождения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гао Вэй. Генетические ресурсы растений, имеющих двойное назначение (лекарственные и пищевые), в провинции Гуанси и их применение в садоводстве: диссертация ... кандидата сельскохозяйственных наук: 06.03.01 / Гао Вэй. — Гуйлинь: Гуйлинский технологический университет, 2024. — 145 с.
2. Гун Чжихуа. Проектирование ландшафта современных городских садов с учетом экологических принципов / Гун Чжихуа // Современное садоводство. — 2022. — Т. 45, № 19. — С. 143–145.
3. Ху Чжэньчжэнь. Проектирование научно-популярного сада растений, имеющих одновременно лекарственное и пищевое назначение, при больнице — на примере научно-популярного сада при больнице интегративной медицины города Гуйлинь / Ху Чжэньчжэнь, Дэн Лили, Сюнь Чжунчжэнь [и др.] // Современное садоводство. — 2023. — Т. 46, № 19. — С. 107–110.
4. Ху Чжэньчжэнь. Комплексная оценка декоративной ценности 51 вида типичных растений, имеющих одновременно лекарственное и пищевое назначение, в провинции Гуанси / Ху Чжэньчжэнь, Дэн Лили, Сяо Ницзе [и др.] // Лесное обследование и планирование. — 2024. — Т. 49, № 3. — С. 147–151.
5. Ли Бинь. Акция — растение, используемое в садоводстве как лекарственное и пищевое средство / Ли Бинь // Садоводство. — 2016. — № 8. — С. 65–67.
6. Ли Вэньцзюань. Исследование планирования и проектирования лесопарков на основе концепции оздоровления в лесу [Текст] / Ли Вэньцзюань // Советник фермера. — 2023. — № 26. — С. 145–147.
7. Шао Лян. Исследование планирования и проектирования экологических парков в городах холодных регионов: диссертация ... кандидата архитектуры: 05.23.22 / Шао Лян. — Харбин: Северо-Восточный сельскохозяйственный университет, 2013. — 189 с.
8. У Чунъянь. Исследование применения растений, имеющих одновременно лекарственное и пищевое назначение, в совместных садах / У Чунъянь, Ван Цзинцзе, Ли Кунь [и др.] // Исследования современного сельского хозяйства. — 2025. — Т. 31, № 3. — С. 55–58.
9. Чжоу Илян. Флора Хэйлунцзяна: в 5 т. / Чжоу Илян [и др.]. — Харби: Издательство Северо-Восточного лесотехнического университета, 1990. — Т. 1. — 460 с.

© Сунь Лэй (26453769@qq.com); Ян Дэчэн; Цао Фуцюань (358792353@qq.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.39

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СОРБЕНТОВ ИЗ ОТХОДОВ ЛЬНОПЕРЕРАБОТКИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ КРАСИТЕЛЕЙ

RESEARCH OF METHODS TO IMPROVE THE CHARACTERISTICS OF SORBENTS FROM LINEN PROCESSING WASTE FOR EFFECTIVE TREATMENT OF WASTEWATER FROM DYES

M. Uvarov

Summary. Russian textile enterprises use various groups of dyes, such as cube, active, dispersed, acidic, and cationic dyes, which end up in wastewater and pose a threat to ecosystems. Research related to the treatment of wastewater from these pollutants is relevant. The use of waste from the primary processing of flax as a sorbent for dyes and other organic pollutants in wastewater is known. This article discusses the possibility of modifying sorbents obtained from flax processing waste and the effect of a targeted change in the properties of sorption materials on the sorption of organic pollutants, including dyes. It has been established that common methods of modifying the analyzed sorbents include acid treatment, special solutions, physical field treatment, plasma modification, metal impregnation, and biological modification.

Keywords: wastewater, sorbents, dyes, sorption, modification.

Уваров Максим Михайлович
Аспирант, ФГБОУ ВО Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина, г. Москва
maxim-uvarov99@yandex.ru

Аннотация. Текстильные предприятия России применяют различные группы красителей, такие как кубовые, активные, дисперсные, кислотные и катионные, которые попадают в сточные воды и представляют собой угрозу для экосистем. Исследования, связанные с очисткой стоков от данных загрязнителей, являются актуальными. Известно применение отходов первичной переработки льна в качестве сорбентов красителей и других органических загрязнителей из сточных вод. В данной статье рассматривается возможность модифицирования сорбентов, получаемых из отходов льнопереработки и влияние направленного изменения свойств сорбционных материалов на сорбцию органических загрязнителей, в том числе красителей. Установлено, что распространёнными методами модифицирования анализируемых сорбентов являются обработка кислотами, специальными растворами, обработка физическими полями и плазменная модификация, импрегнирование металлами, а также биологическое модифицирование.

Ключевые слова: сточные воды, сорбенты, красители, сорбция, модифицирование.

Введение

Текстильная промышленность в Российской Федерации для крашения таких материалов как хлопок, лён, шерсть и различных синтетических тканей применяет различные группы красителей, такие как кислотные, катионные, дисперсные, кубовые и активные. Разнообразие загрязнителей, попадающих в сточные воды, создаёт нагрузку на компоненты окружающей среды, поэтому исследования, связанные с очисткой стоков, в том числе текстильных предприятий, являются актуальными.

С целью очистки сточных вод от сложносоставных загрязнителей, в том числе органических красителей, за счёт широкого ассортимента применяемых сорбентов, а также простоты и экономичности процесса, наиболее распространены сорбционные методы очистки сточных вод, образующихся на красильно-отделочных производствах [1, 2].

Для эффективного улавливания загрязняющих веществ, в том числе органических красителей, сорбционные материалы, получаемые из отходов первичной переработки льна, подвергаются различным способам модифицирования.

Цели и задачи исследования

Целью работы является анализ методов повышения сорбционных характеристик материалов, получаемых из отходов льнопереработки.

Задачами исследования является анализ публикаций, связанных с исследованиями возможности повышения свойств сорбентов из отходов первичной переработки льна для эффективной очистки сточных вод и анализ эффективности очистки стоков от красителей модифицированными льноволокнистыми материалами.

Материалы исследования

Среди способов направленного изменения структуры льноволокнистых сорбентов наибольшее распространение получили такие методы как воздействие физическими полями, разрядом ВЧ-плазмы, растворами кислот и щелочей, а также методы биологического модифицирования и импрегнирования.

Обработка сорбентов, получаемых из отходов первичной переработки льна направлена на изменение структуры, которое характеризуется увеличением пористости сорбентов.

Так, льноволокнистые материалы обрабатывают растворами таурина, хитозана, дихлортриазина, поливинилпирролидона и гидроксиламина [3, 4, 5, 6, 7, 8].

Высокоэффективным способом повышения сорбционных характеристик изучаемых материалов является ацетилирование. Так, известен способ направленного улучшения свойств льняного волокна по методике: льняное волокно массой 5 г помещали в ацетилирующий раствор, включающий в себя 100 мл этанового ангидрида, 200 мл метилбензола и 3 мл хлорной кислоты [9].

Анализ поверхности сорбционных материалов, подверженных данному способу модифицирования, показывает, что на поверхности сорбентов образуется большое количество различных по размеру пор, что приводит к увеличению площади взаимодействия с загрязняющими веществами и более высокой степени очистки сточных вод от красителей.

В результате модифицирования волокнистых сорбентов, получаемых из отходов льнопереработки, растворами хитозана, а также плёнок, получаемых из суспензий хитозана, происходит образование композиционных сорбционно-активных материалов, способных к высоко эффективной очистке сточных вод от органических загрязнителей, в том числе от красителей [7].

Так, сорбционная ёмкость льноволокна, модифицированного растворами хитозана с концентрациями 2 и 0,5 % соответственно по красителю кислотному красному 94 составляет 18,45 мг/г, а по красителю метиленовому голубому — 4,95 мг/г.

Льняную костру и льняную паклю также подвергают обработке 1 Н растворами серной и уксусной кислот для повышения сорбционных свойств [10].

Ещё одним способом модифицирования сорбентов, получаемых из отходов переработки льна, является смешение с другими сорбционно-способными материалами. Так, существует способ физико-химического модифицирования льноволокнистого сорбента путём получения смеси с шариками оксида циркония и измельчением данных материалов в соотношении 1:10. За счёт данного процесса происходит образование волокнистых сорбентов различного диаметра, в структуре которых присутствует мелкодисперсный оксид циркония. Это приводит к увеличению количества пор различного диаметра, а также к общему снижению кристалличности [11].

Ещё одним материалом, который можно ввести в структуру льняного волокна с целью повышения его сорбционных характеристик, является серебро. Модифицированный серебром сорбент обладает более высокой степенью улавливания загрязняющих веществ из сточных вод, в том числе органических красителей [12].

Степень очистки сточных вод от красителя кристаллического фиолетового льноволокном, модифицированным частицами серебра, составляет 99,56 %, а от метиленового синего и бриллиантового зелёного красителей эффективность очистки достигает 65 % [13].

Широкие области применения сорбционных материалов, получаемых из отходов первичной переработки льна, открывает возможность повышения характеристик сорбентов за счёт воздействия на их структуру физических полей.

Так. в работе [9] льноволокно подвергалось воздействию микроволнового излучения мощностью 450 Вт в течение 7 минут в микроволновой печи.

Наибольшая интенсивность поглощения нефтепродуктов модифицированным данным способом льноволокнистым сорбционным материалом достигается в первые 6 минут проведения процесса сорбции [9].

Широко применяются плазмомодифицированные сорбционные материалы, получаемые из отходов льнопереработки.

Так, для повышения сорбционных свойств коротких льняных волокон их подвергают модифицированию двух видов: плазмой разряда атмосферного давления и газоразрядной плазмой низкого давления [14].

Модифицирование льноволокнистого сорбента плазмой разряда атмосферного давления производится по следующей методике: анод располагают на расстоянии 5 мм над поверхностью короткого льняного волокна, а катод погружают в раствор гидроксида натрия. Сила тока изменяется от 15 мА до 30 мА. На электроды подаётся напряжение 1 кВ, в результате чего между электродом в газовой фазе и поверхностью водного раствора щёлочи возникает газовый разряд атмосферного давления [14].

Модификация короткого льняного волокна газоразрядной плазмой низкого давления производится в специальном реакторе, давление внутри которого разрежено до достижения остаточного давления 1 Па. Для модифицирования короткого льняного волокна применяется тлеющий разряд при напряжении на электродах 1 кВ, силе тока 15–30 мА и рабочем давлении 100 Па. В реактор подаётся поток воздуха со скоростью 5 м/с с непрерывным откачиваем системы вакуумным насосом [14].

Установлено, что сорбционная ёмкость короткого льняного волокна по отношению к нефтепродуктам и органическим красителям после модифицирования сорбента разрядами плазмы данных типов возрастает.

Особый интерес представляют биологические методы модифицирования сорбентов, получаемых из отходов льнопереработки. Биологическое модифицировение заключается в ферментировании льняных волокнистых материалов и льняной костры специальными препаратами. Растворы комплексов ферментов, вводимые в льняную костру содержат в своём составе целлюлазы, эстеразы, аминокислоты, пектиназы и гемицеллюлазы. Воздействие на сорбенты данных растворов увеличивает их сорбционную ёмкость по отношению к тяжёлым металлам и нефтепродуктам [15, 16, 17].

Выводы

Таким образом, в работе проведён анализ публикаций, который показывает, что в настоящее время наиболее распространены такие методы повышения сорбционных свойств льноволокнистых материалов как плазменное модифицирование, обработка специальными растворами, растворами кислот, воздействие на структуру сорбента физических полей, а также биологическое модифицирование.

Показано, что модифицирование сорбционно-активных материалов, получаемых из отходов первичной переработки льна, приводит к увеличению эффективности улавливания нефтепродуктов, а также увеличению степени очистки сточных вод текстильных предприятий от таких красителей как кристаллического фиолетового метиленового синего, бриллиантового зелёного и красителя кислотного красного 94.

Возможность модифицирования сорбентов, получаемых из отходов первичной переработки льна, открывает перспективы для широкого применения данных материалов для очистки сточных вод от органических загрязнителей, в том числе красителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Patadia N. Removal of waste dyes from water by organic \\ International Journal of Advance Research. Ideas and Innovations in Technology. 2022. №4. P. 96–104.
2. Patil P., Nasipude S., Salunkhe M. Decolorization of Textile Effluent Using Adsorbents from Natural Sources \\ International Journal of Innovative Research and Creative Technology. 2015. №1. P. 412–414.
3. Никифорова Т.Е., Софронов А.Р. Сорбционные свойства нового модифицированного сорбента из льняного волокна \\ От химии к технологии шаг за шагом, 2024. №3. С.61–71.
4. Li Y., Guo R., Lu W., Zhu D. Research progress on resource utilization leather solid waste \\ Journal of Leather Science and Enheineering. 2019. 17 p.
5. Magda A., Abdelrahman E., Mohamed H., El-Sayed E., Aya M. Flax fiber based semicarbazide biosorbent for removal of Cr (VI) and Alazarin Red S dye from wastewater \\ Scientific Reports. 2023. №13. 25 p.
6. Mikhalovska L., Gun'ko V., Rugal A., Oranska O., Gornikov Y., Morvan C., Follain N., Domas C., Mikhalovsky S. Cottonised flax fibres vs cotton fibres: structural, textural and adsorption characteristics \\ RSC Advances. 2012. №5. P. 2032–2042.
7. Mir M., Wilson L. Flax fiber-chitosan biocomposites with tailored structure and switchable physicochemical properties \\ Carbohydrate Polymer Technologies and Applications. 2023. №6. 15 p.
8. Nikiforova T.E.. Kozlov V.A., Gagina A.N. Sorption of Copper Ions by Cellulose Sorbets Modified with a Dichlorotriazine Compound and Polyvinylpyrrolidone \\ Russian Journal of Applied Chemistry. 2010. №10. P. 1774–1780.
9. Mahmoud M. Oil spill cleanup by raw flax fiber: Modification effect, sorption isotherm, kinetics, and thermodynamics \\ Arabian Journal of Chemistry. 2020. №6. P. 5553–5563.
10. Шайхиев И.Г. Степанова С.В., Фридланд С.В., Хасаншина Э.М. Отходы переработки льна в качестве сорбентов нефтепродуктов. 2. Влияние химической обработки на гидрофобность и нефтепоглощение \\ Вестник Башкирского университета, 2010. №3. С.607–609.
11. Karoyo A., Dehabadi L, Alabi W., Simonson S., Wilson L. Hydration and Sorption Properties of Raw and Milled Flax Fibers \\ ACS OMEGA. 2020. №11. P. 6113–6121.
12. Magda A., Mohamad H., Mostafa A. Synthesis, characterization, antimicrobial and photocatalytic properties of nano-silver-doped flax fibers \\ Polymer Bulletin. 2023. №80. P. 9745–9777.
13. Chandanshive V., Kadam S., Khandare R., Kurade M., Jeon B-H., Jadhav J., Govindwar S. In situ phytoremedation of dyes from textile wastewater using garden ornamental plants, effect on soil quality and plant growth \\ Chemosphere. 2018. №210. P. 968–976.
14. Никифорова Т.Е., Козлов В.А., Натареев С.В., Дубкова Е.А. Влияние плазменного модифицирования на сорбционные свойства льняного волокна \\ Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология, 2014. №3. С. 91–97.
15. Никифорова Т.Е., Козлов В.А., Багровская Н.А. Изучение влияния ферментативной обработки короткого льняного волокна на его сорбционную способность \\ Химия растительного сырья, 2005. №4. С.45–52.
16. Nikiforova T.E., Vokurova D.A., Sofronov A.R. Extraction of copper ions by a sorbent based on flax fiber modified with L-Agrinine \\ From Chemistry Towards Technology Step-by-Step. 2022. №3. P. 76–86.
17. Nikiforova T.E., Kozlov V.A., Bagrovskaya N.A., Rodionova M.V. Sorption Properties of Ezymatically Modified Flax Fiber \\ Russian Journal of Applied Chemistry. 2007. №2. P. 236–240.

© Уваров Максим Михайлович (maxim-uvarov99@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.01

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ О МАССООБМЕНЕ В ОКРЕСТНОСТИ КАПЛИ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ОБТЕКАНИЯ И ОБЪЁМНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

COMPUTER SIMULATION OF THE PROBLEM OF MASS TRANSFER IN THE VICINITY OF A DROP, TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF FLOW AND A SECOND-ORDER VOLUMETRIC NONLINEAR CHEMICAL REACTION

R. Akhmetov

Summary. The stationary problem of convective diffusion near a drop streamlined by a liquid flow at low Reynolds numbers is considered, taking into account a nonlinear volumetric chemical reaction. A characteristic feature of the problem is the presence of two dimensionless parameters: the rate constants of the volumetric chemical reaction k_v and the Peclet number **Pe**, which determine the concentration distribution in the flow. The ratio of the rate constant of a volumetric chemical reaction and the number of Peclet is a constant value. The problem under consideration is a boundary value problem for a quasi-linear partial differential equation of elliptic type with a small parameter at high derivatives. A small parameter corresponds to large **Pe** baking numbers. The limiting equation, when the small parameter is zero, has special saddle-type points. Several boundary layers appear outside the drop. The asymptotic expansion of the solution is constructed by matching the asymptotic expansions. Coordination conditions for solutions are set at the borders between neighboring regions. The main terms of the asymptotic solution are constructed outside the drop in the case when a nonlinear chemical reaction has a second-order degeneracy. Previously, the case [1] was considered when the degeneracy structure was of the first order.

Keywords: asymptotic decomposition, mass transfer, matching method, Peclet number, rate constant of a volumetric chemical reaction.

Ахметов Рустям Гилимович
доктор физико-математических наук, профессор,
Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы
akrust@mail.ru

Аннотация. Рассматривается стационарная задача о конвективной диффузии около капли, обтекаемой потоком жидкости при малых числах Рейнольдса, с учетом нелинейной объёмной химической реакции. Характерной особенностью задачи является наличие двух безразмерных параметров: константы скорости объёмной химической реакции k_v и числа Пекле **Pe** , которые определяют распределение концентрации в потоке. Отношение константы скорости объёмной химической реакции и числа Пекле есть величина постоянная. Рассматриваемая задача представляет собой краевую задачу для квазилинейного уравнения в частных производных эллиптического типа с малым параметром при старших производных. Малый параметр соответствует большим числам Пекле **Pe.** Предельное уравнение, когда малый параметр равен нулю, имеет особые точки типа седла. Вне капли возникает несколько пограничных слоев. Асимптотическое разложение решения построено методом согласования асимптотических разложений. На границах между соседними областями задаются условия согласования для решений. Вне капли построены главные члены асимптотического решения в случае, когда нелинейная химическая реакция имеет вырождение второго порядка. Ранее был рассмотрен случай [1], [2], когда структура вырождения была первого порядка.

Ключевые слова: асимптотическое разложение, массообмен, метод согласования, число Пекле, константа скорости объёмной химической реакции.

Введение

Рассмотрим массообмен около сферической капли радиуса a, обтекаемой ламинарным потоком вязкой несжимаемой жидкости со скоростью U на бесконечности при наличии объемной химической реакции. Распределение концентрации в безразмерных переменных удовлетворяет уравнению (см., напр., [1], гл. 5, (6.1)–(6.3))

$$\Delta C = Pe\left(\bar{V}, \nabla\right)C + k_v H(C) \qquad (1)$$

где число Пекле $Pe = \frac{aU}{D}$, где D — коэффициент диффузии вещества во внешней фазе, k_v— константа скорости объемной химической реакции, Δ — оператор Лапласа, ∇ — оператор Гамильтона. В сферической системе координат r, θ — с началом в центре капли (угол θ отсчитывается от направления потока на бесконечности) поле скоростей жидкости вне сферической капли определяется из выражений ([2], стр.73)

$$\overline{V} = \left(\vartheta_r, \vartheta_\theta, 0\right), \vartheta_r = \frac{1}{r^2 \sin\theta}\frac{\partial\psi}{\partial\theta}, \vartheta_\theta = -\frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial\psi}{\partial r} \quad (2)$$

$$\psi(r,\theta) = (\sin\theta)^2 (r-1)\left(2r - \frac{\lambda}{\lambda+1}\left(1+\frac{1}{r}\right)\right) / 4 \quad (3)$$

где r,θ— сферические координаты, $\Psi(r,\theta)$— функция тока, постоянная $\lambda > 0$. Требуется найти асимптотику решения уравнения (1), удовлетворяющее граничным условиям

$$C = 1 \text{ при } r = 1; C \to 0 \text{ при } r \to \infty \quad (4)$$

Характерной особенностью задачи (1), (4) является наличие двух безразмерных параметров Pe, k_v, определяющих характер распределения концентрации в потоке. Известно (см., напр., [1], гл.5, (6.1) — (6.3)), что в предельных случаях $Pe \gg 1, k_v - const$, и $Pe - const, k_v \gg Pe$ решение задачи (1), (4) упрощается. В данной работе предполагается, что $Pe \to \infty, k_v \to \infty$ (или достаточно большие), а величина $\mu_0 = k_v / Pe$ — постоянная. При таких же предположениях, но в случае объемной химической реакции ($H(0) = 0, H'(0) > 0$) асимптотика вне частицы исследована в работе [3], внутри капли построена в работе [4]. В том случае асимптотика носит степенной характер. Исслеованию точных решений посвящены работы [5], [6].

В данной работе предполагается, что функция $H(u)$ удовлетворяет условиям

$$H : R^1 \to R^1, H(0) = 0, H'(0) = 0, 0 < H''(u) \quad (5)$$

и справедливо асимптотическое разложение

$$H(u) = u^2 + F_2 u^4 + F_3 u^6 + F_4 u^8 + F_5 u^{10} + O(u^{12}) \quad (6)$$

При $u \to 0$.

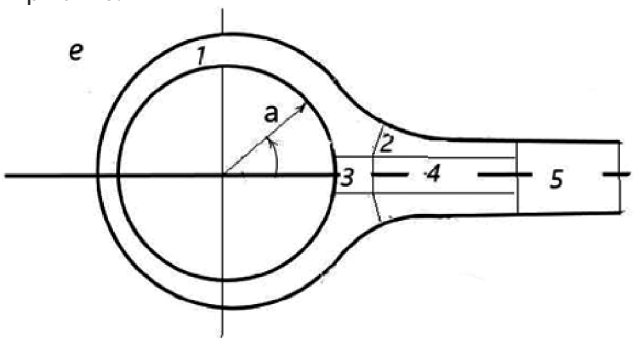


Рис. 1. Схема пограничных слоев вне сферической капли: *e* — внешний пограничный слой:
$D^{(e)} = \{\varepsilon \le r - 1, \varepsilon \le \Psi\}$;

1 — диффузионный пограничный слой: $D^{(1)} = \{0 \le r - 1 \le 2\varepsilon^{1-\alpha}, \varepsilon^\beta \le \theta \le \pi\}$;

2 — область конвективного пограничного слоя: $D^{(2)} = \{\varepsilon^{1-\alpha} \le r - 1 \le 2\varepsilon^{\alpha-1}, \varepsilon^{\gamma+1} \le \psi \le 2\varepsilon^\gamma\}$;

3 — область задней критической точки: $D^{(3)} = \{0 \le r - 1 \le 2\varepsilon^{1-\alpha}, 0 \le \theta \le 2\varepsilon^\beta\}$;

4 — внутренняя область диффузионного следа: $D^{(4)} = \{\varepsilon^{1-\alpha} \le r - 1 \le 2\varepsilon^{\alpha-1}, 0 \le \Psi \le 2\varepsilon^{\gamma+1}\}$;

5 — зона смешивания: $D^{(5)} = \{\varepsilon^{\alpha-1} \le r, \Psi \le 2\varepsilon^\gamma\}$.

1. Диффузионный пограничный слой

Уравнение (1), с учетом обозначений $\varepsilon = Pe^{-1/2}$ и $\mu_0 = k_v / Pe$, перепишем в

$$\mu^2 \Delta C - \frac{1}{r^2 \sin\theta}\left(\frac{\partial C}{\partial r}\frac{\partial\psi}{\partial\theta} - \frac{\partial C}{\partial\theta}\frac{\partial\psi}{\partial r}\right) - \mu_0 H(C) = 0 \quad (7)$$

В диффузном пограничном слое естественными переменными являются $t = \varepsilon^{-1}(r-1), \theta$. Асимптотику решения в диффузном пограничном слое ищем в виде ряда

$$c(t,\theta,\varepsilon) = c_0(t,\theta) + \varepsilon c_q(t,\theta) + \ldots \quad (8)$$

Функцию $H(c)$, а также функцию тока Ψ заменим главными членами разложения в окрестности $c_0(t,\theta)$ и подставим их, а также представление (8) в уравнение (7), приравниваем коэффициенты при одинаковых степенях ε. Тогда для определения $c_0(t,\theta)$ в области $0 < \theta < \pi, 0 < t$ получаем уравнение

$$\frac{\partial^2 c_0}{\partial t^2} - \frac{t\cos\theta}{\lambda+1}\frac{\partial c_0}{\partial t} + \frac{\sin\theta}{2(\lambda+1)}\frac{\partial c_0}{\partial\theta} - \mu_0 H(c_0(t,\theta)) = 0 \quad (9)$$

Из условий (4) и из условий симметрии получаем граничные условия:

$$c_0(0,\theta) = 1; c_0(t,\theta) \to 0 \text{ при } t \to \infty, \frac{\partial c_0}{\partial\theta}(t,\pi) = 0 \quad (10)$$

Ранее исследована задача (9), (10). При $\theta \ge \theta_0 > 0$.

Задача (9), (10) была исследована в [7].

Асимптотика функции $u_1(t,\theta)$при $\theta \to \pi$ имеет вид

$$u_1(t,\theta) = u_0(t) + O\left((\pi - \theta)^2 \exp(-\gamma t^2)\right) \quad (11)$$

для некоторого $\gamma > 0$ и в области $D^{(1)}$ формула

$$|u_1(t,\theta)| \le M \exp(-\gamma t^2) \quad (12)$$

справедливо при $D^{(1)}$для некоторого $\gamma \in (0,1)$и $M > 0$. Формулы (11), (12) были установлены в работе [8]. В случае, когда главный член разложения $H(u)$ — линейный, асимптотика при $\theta \to 0$исследована в работе [7].

Структура асимптотики функции $u_1(t,\theta)$ при $\theta \to 0$ различна для малых и больших значений θ. При малых θ асимптотика решения строится в переменных t и θ.

Асимптотика $c_0(t,\theta)$ при $\theta \to 0$ ищется в виде

$$\vartheta(x) + O(\theta^2), \tag{13}$$

где $x = t / \sqrt{\lambda+1}$. В случае, когда $H(\vartheta)$ удовлетворяет условиям (5), (6), при $\theta \to 0$ для определения $\vartheta(x)$ получаем уравнение

$$\upsilon''(x) - x\upsilon'(x) - \mu H(u) = 0 \tag{14}$$

где $\mu = \mu_0(\lambda+1)$, и граничные условия

$$\vartheta(0) = 1, \vartheta(x) = O(1) \text{при } x \to \infty \tag{15}$$

Теорема 1. Пусть $H(u)$ удовлетворяет условиям (5), (6). Тогда найдется $\mu_1 > 0$ такое, что для всех $\mu \in (0,\mu_1)$ существует решение задачи (14), (15), имеющие при $x \to +\infty$ асимптотическое разложение

$$v(x) = \sum_{k=1}^{n} \frac{b_{0,k}}{(\mu \ln(x) + C)^k} + O\left(\frac{1}{ln^{n+1}(x)}\right) \tag{16}$$

для некоторого C,

$$b_{0,1} = 1, b_{0,2} = const, b_{0,3} = b_{0,2}^2, b_{0,4} = 2F_2 b_{0,2} + b_{0,2}^3,$$
$$b_{0,5} = \frac{F_3 + 14F_2 b_{0,2}^2 + 3b_{0,2}^4}{3}, b_{0,6} = \frac{5}{3}F_3 b_{0,2} + \frac{25}{3}F_2 b_{0,2}^3 +$$
$$+ 2F_2^2 b_{0,2} + b_{0,2}^5,$$
$$b_{0,7} = b_{0,2}^6 + 13F_2 b_{0,2}^4 + \frac{152}{15}F_2^2 b_{0,2}^2 + 5F_3 b_{0,2}^2 +$$
$$+ \frac{4}{15}F_2F_3 + \frac{1}{5}F_4,$$
$$b_{0,8} = b_{0,2}^7 + \frac{168}{9}F_2 b_{0,2}^5 + \frac{1352}{45}F_2^2 b_{0,2}^3 + \frac{4}{3}F_2^3 b_{0,2} +$$
$$+\frac{105}{9}F_3 b_{0,2}^3 + \frac{184}{45}F_2F_3 b_{0,2} + \frac{7}{5}F_4 b_{0,2}, \tag{17}$$
$$b_{0,9} = b_{0,2}^8 + \frac{76}{3}F_2 b_{0,2}^6 + \frac{1036}{15}F_2^2 b_{0,2}^4 + \frac{496}{35}F_2^3 b_{0,2}^2 +$$
$$+\frac{70}{3}F_3 b_{0,2}^4 + \frac{6952}{315}F_3F_2 b_{0,2}^2 + \frac{16}{105}F_2^2F_3 + \frac{28}{5}F_4 b_{0,2}^2 +$$
$$+\frac{4}{35}F_2F_4 + \frac{19}{63}F_3^2 + \frac{1}{7}F_5,$$
$$b_{0,10} = b_{0,2}^9 + \frac{63}{2}F_2 b_{0,2}^7 + \frac{666}{5}F_2^2 b_{0,2}^5 + \frac{21262}{315}F_2^3 b_{0,2}^3 +$$
$$+ 42F_3 b_{0,2}^5 + \frac{2}{3}F_2^4 b_{0,2} + \frac{16379}{210}F_3F_2 b_{0,2}^3 + \frac{1664}{315}F_2^2F_3 b_{0,2} +$$
$$+\frac{84}{5}F_4 b_{0,2}^3 + \frac{219}{70}F_2F_4 b_{0,2} + \frac{19}{7}F_3^2 b_{0,2} + \frac{9}{7}F_5 b_{0,2}.$$

Справедливы неравенства $\vartheta > 0, \vartheta' < 0$ при $x > 0$. Такое решение единственно в классе ограниченных функций.

Пример численного решения краевой задачи (14), (15) и нахождения коэффициентов приведен в [8]. Далее, для изучения свойств раствора в диффузионном пограничном слое 1 в случае, когда значения функции $\psi(r,\theta)$ отделены от нуля, получим уравнение

$$Lu^{(1)}(t,\theta) = H_1\left(u^{(1)}(t,\theta)\right) \tag{18}$$

где

$$Lu(t,\theta) \equiv \frac{\partial^2 u(t,\theta)}{\partial t^2} - t\cos\theta\frac{\partial u(t,\theta)}{\partial t} +$$
$$+ \frac{1}{2}\sin\theta\frac{\partial u(t,\theta)}{\partial\theta}, \tag{19}$$
$$H_1(u) = \mu(\lambda+1)\cdot H(u). \tag{20}$$

В уравнении (18) перейдем к переменным

$$\tau = \frac{1}{2(\lambda+1)}\int_0^{\pi} sin^3 x dx =$$
$$= \left[\frac{2}{3} + \cos\theta - \left(cos^3\theta\right)/3\right] / 2(\lambda+1),,$$
$$\sigma = \left(tsin^2\theta\right) / 2(\lambda+1)$$

и обозначим

$$u(t,\theta) = Z(\sigma,\tau), H_1\left(u^{(1)}(t,\theta)\right), = h(\sigma,\tau).$$

Тогда получаем уравнение

$$Z(\sigma,\tau)_{\sigma\sigma} -, Z(\sigma,\tau)_{\tau} = q(\tau)h(\sigma,\tau) \tag{21}$$

$$Z \to 0 \text{ при } \psi_1 \to \infty; Z \to 0 \text{ при } \tau \to 0, \psi_1 > 0. \tag{22}$$

где $q(\tau) = O\left(\left(\tau_0 - \tau\right)^{-\frac{1}{2}}\right)$ как $\tau \to \tau_0$. Асимптотика функции $u_1(t,\theta)$ при $\theta \to 0$ для значений ψ отделенных от нуля строится в переменных σ,τ. Заметим, что исследованию в диффузионном пограничном слое посвящена также работа [8].

2. Область задней критической точки

Решение задачи в пограничном слое задней критической точки (область 3) строится в переменных $x = \varepsilon^{-1}(\lambda+1)^{-\frac{1}{2}}(r-1), \xi = \varepsilon^{-1}(\lambda+1)^{-\frac{1}{2}}\theta$. Главный член асимптотики строится как решение уравнения

$$\frac{\partial^2 u(x,\xi)}{\partial\xi^2} + \frac{\partial^2 u(x,\xi)}{\partial x^2} - x\frac{\partial u(x,\xi)}{\partial x} +$$
$$+\left(\frac{\xi}{2} + \frac{1}{\xi}\right)\frac{\partial u(x,\xi)}{\partial\xi} - \mu(\lambda+1)H(u(x,\xi)) = 0, \tag{23}$$

удовлетворяющие граничным условиям

$$u(0,\xi) = 1; \frac{\partial u(x,\xi)}{\partial \xi} = 0 \text{ при } \xi = 0, \quad (24)$$

и условию согласования:

$$u(x,\xi) - v(x) \to 0 \text{ при } \xi \to \infty. \quad (25)$$

Функция $v(x)$, построенная в теореме 1, удовлетворяет всем требуемым условиям (23)–(25).

3. Численное моделирование

Переходим к решению краевой задачи (14), (15). Здесь следует учесть, что в полученных разложениях (16) есть произвольная константа С. Для того чтобы удовлетворить первому из граничных условий (15), то есть $v(0) = 1$, применяем теорему о непрерывной зависимости решения от параметров. Уравнение (14) перепишем в виде системы

$$\begin{cases} v'(x) = z(x) \\ z'(x) = xz(x) + \mu H(v(x)). \end{cases} \quad (26)$$

Из условий устойчивости явных схем (см. [9]) следует, что следует интегрировать назад (т.е. с шагом $h < 0$). Функцию $H(v(x))$ перепишем в виде суммы $H(c_0) + H'(c_0)(v(x) - c_0)$. Начальные условия для системы (26) имеют вид

$$v(X_0) = v_0, z(X_0) = z_0, \quad (27)$$

где постоянные v_0, z_0 определяются из выражения (16) и ее производной, например, в точке $X_0 = 150$.

В качестве промежутка для C зададим (a,b), где, напр., $a = 0.01, b = 20$. Далее используем цикл с постусловием. Условие для цикла задаем: $|y_0 - 1| > \varepsilon$, где $y_0 = v_0(0)$. После указываем значение $X_0 = 150$ и переходим к коэффициентам, которые задаются из формул (17), а коэффициент С находим методом половинного деления, т.е., $C = (a + b) / 2$ и далее уточняем приближения.

Рассмотрим случай, когда $H(u) = u^2 - u^4$. Методом Рунге-Кутта получены следующие результаты: например, при

$$\mu = 0.5, y = 1.0000, z = -0.84684, C = 0.9626, \mu = 1,$$

получаем

$$y = 1.0000,\ z = -0.84684,\ C = 0.9345,\ \mu = 3,$$
$$y = 1.0000,\ z = -0.84684,\ C = 1.602.$$

4. Область конвективного пограничного слоя

В области $D^{(2)}$ решение строится в переменных $\psi_2 = \frac{\psi(r,\theta)}{\varepsilon}, r$. Учитывая, что

$$\psi(r,\theta) = h(y) \cdot sin^2\theta, h(y) =$$
$$= \frac{1}{4}(r-1) \cdot \left(2r - \frac{\lambda}{\lambda+1}\left(1 + \frac{1}{r}\right)\right)'$$

получаем уравнение для ведущего члена $u^{(2)}(\psi_2, r)$ разложения

$$\frac{2h(r)}{r^2} \cdot \frac{\partial u^{(2)}(\psi_2,r)}{\partial r} + \mu H\left(u^{(2)}(\psi_2,r)\right) = 0 \quad (28)$$

Решение уравнения должно удовлетворять условию согласования

$$u^{(2)}(\psi_2,r) - u^{(1)}(t,\theta) \to 0 \, as \, r \to 1 \quad (29)$$

в области $D^{(1)} \bigcap D^{(2)}$.

Рассмотрим сначала уравнение

$$\frac{2h(r)}{r^2} \cdot \frac{\partial V^{(2)}(\psi_2,r)}{\partial r} + \mu \cdot (V^{(2)}(\psi_2,r))^2 = 0 \quad (30)$$

Решение имеет вид:

$$V^{(2)} = \frac{1}{\mu(\lambda+1)\ln(r-1) + C} f(r,\lambda,\mu) \cdot F(\psi_2) \quad (31)$$

Где

$$V^{(2)} = \frac{1}{\mu(\lambda+1)\ln((r-1)+C} F(\psi_2) \cdot$$
$$\cdot 2^{\mu\frac{\lambda(2\lambda+1)}{4(\lambda+1)}} \cdot r^{-\mu\frac{3\lambda+2}{2(\lambda+1)}} \cdot e^{-\mu r} \text{ при } r \to \infty \quad (32)$$

Здесь $F(\psi_2)$ и явный вид функции $f(r,\lambda,\mu)$ строятся аналогично [2]. Функция $u^{(2)}(\psi_2,r)$ будет определяться из условия согласования с решением $u^{(1)}(t,\theta)$.

Здесь $F(\psi_2)$ и явный вид функции $f(r,\lambda,\mu)$ были построены в работе [5]. Функция $u^{(2)}(\psi_2,r)$ будет определена из условия соответствия с решением $u^{(1)}(t,\theta)$. Рассмотрим уравнение (21) с условиями (22), и из формулы (29) получим

$$V(\psi_1, d) = \varphi(\psi_1), V \to 0 \text{ при } \psi_1 \to \infty \quad (33)$$

где $\varphi(\psi_1)$ удовлетворяет оценке (12).

Уравнение вырождается при $\tau = \tau_0 \left(\tau_0 = \frac{2}{3(\lambda+1)}\right)$. Следовательно, уравнение (21) с условиями (22), (33) не-

обходимо исследовать дополнительно. Рассмотрим область

$$D_\varepsilon^{(1)} = \left\{(\psi_1, r), \psi_1 > \psi_1^0, \varepsilon < \tau_0 - \tau < \varepsilon^\nu\right\},$$
$$where\, \psi_1^0 = \varepsilon^{\alpha 1}, \nu, \alpha_1 \in (0,1).$$

Кроме того, для $\psi_1 = O\left(\varepsilon^{\alpha 1}\right)$ справедлива следующая оценка: $1 - \varepsilon^{\delta 2} \le \varphi(\psi_1) < 1$ для некоторого $\delta_2 \in (0,1)$. Для решения задачи (21), (22), (33), справедливо интегральное уравнение

$$V(\psi_1,\tau) = \int_0^\infty G(\psi_1, \tau - d, x)\varphi(x)dx +$$
$$+\int_d^\tau\int_0^\infty q(\zeta)\cdot H_1(V(x,\zeta)\cdot G(\psi_1,\tau-\zeta,x)dxd\zeta + \quad (34)$$
$$+\int_d^\tau \frac{1}{2\sqrt{\pi}}\cdot\frac{\psi_1}{(\tau-\zeta)^{\frac{3}{2}}}\cdot\exp\left(-\frac{\psi_1^2}{4(\tau-\zeta)}\right)d\zeta$$

Где

$$G(\psi_1,\tau,x) =$$
$$= \frac{1}{2\sqrt{\pi\tau}}\left[\exp\left(-\frac{(x-\psi_1)^2}{4\tau}\right) - \exp\left(-\frac{(x+\psi_1)^2}{4\tau}\right)\right] \quad (35)$$

для $\tau > 0$, $G = 0$ для $\tau \le 0$. Обратите внимание, что $G \in C^\infty$ *for* $\psi_1 \in \mathbb{R}, x \in \mathbb{R}, \tau > 0$.

Теорема 2. *Пусть $H(u)$ удовлетворяет условиям (5), (6) и дифференцируема. То есть число $\mu^* > 0$ и точкой $M^*(\psi_1^*,\tau^*)$, где $\psi_1^* > \psi_1^0, \tau^* \in (d,\tau_0), \tau_0 - d = \varepsilon^\alpha$ такой, что для $D_\varepsilon^* = \{(\psi_1,\tau), \psi_1 > \psi_1^*, |\tau - \tau^*| \le \varepsilon^\gamma\}$ для $\psi_1^0 = \varepsilon^{\alpha_1}$) и $\mu \in (0,\mu^*)$ справедливо асимптотическое представление*

$$V(\psi_1,\tau) = V_0(\psi_1) + O\left(\varepsilon^{\frac{\alpha}{8}}\right) \quad (36)$$

для $\gamma > 2\alpha$ и некоторого $\alpha \in (0,1)$, где

$$V_0(\psi_1^*) = \frac{1}{f(1,\lambda,\mu)} \quad (37)$$

и эта оценка справедлива

$$0 \le V_0(\psi_1) \le M_2\cdot\exp(-\gamma_2\psi_1^2), M_2 > 0, \gamma_2 > 0,$$

где C — та же константа, что и в теореме 1.

Доказательство. Доказательство теоремы проводится методом последовательных приближений. Пусть начальное приближение $V^{(0)} \equiv 0$, тогда из (34) находим

$$V^{(1)} = \varphi_1(\psi_1) + O\left((\tau_0 - \tau)\exp(-\gamma_1\psi_1^2)\right) \quad (38)$$

для некоторого $\gamma_1 > 0$. Далее из (34), (38) мы имеем

$$V^{(2)} - V^{(1)} = \int_d^\tau\int_0^\infty q(\zeta)\cdot H_1(V^{(0)}(x,\zeta)\cdot G\cdot dxd\zeta,$$
$$\varphi_2(\psi_1)(1 + O(\varepsilon^{\delta_1})d\zeta$$

Далее выберем d такое, что $\tau_0 - d = \varepsilon^\alpha$, и $\tau^* \in (d,\tau_0)$ так что

$$\tau_0 - \tau^* = \varepsilon^\alpha - \delta\varepsilon^\alpha, \tau^* - d = \delta\varepsilon^\alpha, |\tau^* - \tau| \le \varepsilon^{2\alpha}.$$

$$V^{(2)} - V^{(1)} = \int_d^\tau\int_0^\infty q(\zeta)\cdot H_1(V^{(0)}(x,\zeta)\cdot G\cdot dxd\zeta,$$

$$\left|V^{(2)} - V^{(1)}\right| \le \mu(\lambda+1)\int_d^\tau \frac{\varphi_2(\psi_1)(1+O(\varepsilon^{\delta_1})d\zeta}{(\tau_0-\zeta)^{\frac{1}{2}}\cdot\zeta^{\frac{1}{2}}} \le$$
$$\le M(\lambda+1)\cdot\varphi_2(\psi_1)\cdot(\tau-d)^{1/2}\cdot(\tau_0-\tau)^{-\frac{1}{2}}.$$

Сначала мы выбираем $\mu_0 < \frac{\alpha}{4(\lambda+1)}, \alpha \in (0,1)$.

Затем выберем d так, чтобы $\tau_0 - d = \varepsilon^\alpha$, и $\tau^* \in (d,\tau_0)$ так что

$$\tau_0 - \tau^* = \varepsilon^\alpha - \delta\varepsilon^\alpha, \tau^* - d = \delta\varepsilon^\alpha, |\tau^* - \tau| \le \varepsilon^{2\alpha}.$$

Тогда справедлива следующая оценка:

$$V^{(2)}(\psi_1,\tau) - V^{(1)}(\psi_1,\tau) \le$$
$$\le \mu(\lambda+1)M_2\varphi_2(\psi_1)\cdot$$
$$\cdot\left(\tau^* - d - (\tau^* - \tau)\right)^{1/2}(\tau_0 - \tau^* + \tau^* - \tau)^{-\frac{1}{2}} \le$$
$$\le \mu(\lambda+1)M_2\varphi_2(\psi_1)(1+\varepsilon^{\delta_1})\left(1 + O(\varepsilon^\alpha) + O\left(\varepsilon^{\frac{\alpha}{8}}\right)\right),$$

где $\delta_1 = 2\delta^{\frac{1}{2}}, |\varphi_2(\psi_1)| \le M\exp(-\gamma\psi_1^2)$, оценка порядка $O\left(\varepsilon^{\frac{\alpha}{8}}\right)$ получена в предположении $\frac{1}{\lambda+1} < \frac{1}{2}$.

Аналогично [3], мы получаем оценки

$$\left|V^{(n)}(\psi_1,\tau) - V^{(n-1)}(\psi_1,\tau)\right| \le$$
$$\le \left(\mu(\lambda_1+1)M\right)^{n-1}\cdot\varphi_n(\psi_1)\left(1 + O\left(\varepsilon^{\frac{\alpha}{8}}\right)\right).$$

Тогда существует $\mu^* < \mu_0$, $\mu^* > 0$ такое, что для всех $\mu \in (0;\mu^*)$ последовательность $\left\{V^{(n)}(\psi_1,\tau)\right\}$ имеет пре-

дел $V(\psi_1,\tau)$. Монотонность функции $V_0(\psi_1)$ следует из принципа максимума. Существование ψ_1^* следует из монотонности $V_0(\psi_1)$. Теорема доказана. Из теоремы следует, что в области $D^{(1)}\bigcap D^{(2)}$ выполняется следующая формула:

$$u^{(1)}(t,\theta) = V(\psi_1,\tau) \quad (39)$$

Поскольку $\theta \to 0$, мы имеем представление

$$u^{(1)}(t,\theta) = \\ = \frac{1}{\mu(\lambda+1)\ln\left(x\varepsilon(\lambda+1)^{1/2}\right)+C}\cdot f(r,\lambda,\mu)\cdot V_0(\psi_2) \quad (40)$$

на $D^{(1)}\bigcap D^{(2)}$. $V_0(\psi_1)$ — та же функция, что и в теореме 2, где $\psi_2 = \psi_1 + O(\varepsilon^\delta), \delta \in (0,1)$.

Таким образом, из представлений (39), (40) мы получаем условия соответствия

$$u^{(2)}(\psi_2,r) - u^{(1)}(t,\theta) = O(\varepsilon^\delta) \text{ на } D^{(1)}\bigcap D^{(2)} \quad (41)$$

обратите внимание, что

$$u^{(3)}(t,\xi) \to \frac{1}{\mu(\lambda+1)\ln(r-1)+C} \text{ при } t \to \infty \quad (42)$$

$$u^{(1)}(t,\theta) - u^{(3)}(t,\xi) \to 0$$

для $\theta \to 0$ в области $D^{(1)}\bigcap D^{(3)}$

$$u^{(1)}(t,\theta) - u_1(t) \to 0$$

Это значит при $\theta \to 0$ в области $D^{(1)}\bigcap D^{(3)}$,

где $u_1(t)$ — та же функция, что и в теореме 1.

Решение $u^{(2)}(\psi_2,r)$ имеет аналогичную структуру (см. (34), (35)), что и функция $V^{(2)}(\psi_2,\tau)$. Условие соответствия (44) будет выполнено, если выполнено условие (40).

Таким образом, функция $u^{(2)}(\psi_2,r)$ имеет вид

$$u^{(2)} = \frac{1}{\mu(\lambda+1)\ln(r-1)+C}\cdot f(r,\lambda,\mu)\cdot V_0(\psi_2) \quad (43)$$

Замечание 1. В теореме 2 было доказано существование функции $V_0(\psi_2)$. В качестве главного члена разложения в области $D^{(2)}$ следует выбрать

$$V_0(\psi_2) \sim f(1,\lambda,\mu)^{-1}\cdot\frac{1}{2\sqrt{\pi}}\times \\ \times\int_d^{\tau_0}\cdot\frac{\psi_2}{(\tau_0-\zeta)^{\frac{3}{2}}}\exp\left(-\frac{\psi_2^2}{4(\tau_0-\zeta)}\right)d\zeta \quad (44)$$

Чтобы получить оценку (44), следует использовать интегральное уравнение (34), соответствующие условия (41), (42) и формулу (40).

5. Внутренняя область диффузионного следа

В области $D^{(4)}$ мы записываем уравнение (1) в переменных $r,\varphi = \frac{\theta}{\varepsilon}$ и сохраняем главные члены уравнения

$$\frac{1}{2}\left(2-\frac{3\lambda+2}{\lambda+1}\cdot\frac{1}{r}+\frac{\lambda}{\lambda+1}\cdot\frac{1}{r^3}\right)\frac{\partial u^{(4)}}{\partial r} - \\ -\frac{1}{4r}\left(4-\frac{3\lambda+2}{\lambda+1}\cdot\frac{1}{r}-\frac{\lambda}{\lambda+1}\frac{1}{r^3}\right)\varphi\cdot\frac{\partial u^{(4)}}{\partial\varphi} = \quad ((45) \\ = \frac{1}{r^2\varphi}\cdot\frac{\partial}{\partial\varphi}\varphi\frac{\partial u^{(4)}}{\partial\varphi} - \mu(u^{(4)})^2$$

Мы будем использовать соответствующие условия

$$u^{(4)}(\varphi,r) - u^{(3)}(t,\xi) = O(\varepsilon^{\alpha_1}) \text{ на } D^{(3)}\bigcap D^{(4)} \quad (46)$$

$$u^{(4)}(\varphi,r) - u^{(2)}(\psi_2,r) = O(\varepsilon^{\alpha_2}) \text{ на } D^{(2)}\bigcap D^{(4)} \quad (47)$$

для некоторых $\alpha_1,\alpha_2 \in (0,1)$. Тогда, принимая во внимание оценки

$$u^{(3)}(t,\xi) \sim \frac{1}{\mu(\lambda+1)\ln(r-1)+C} as\, t \to \infty \quad (48)$$

$$u^{(2)}(\psi_2,r) \sim \\ \sim \frac{1}{\mu(\lambda+1)\ln(r-1)+C}\cdot\frac{f(r,\lambda,\mu)}{f(1,\lambda,\mu)} as\, \psi_2 \to 0 \quad (49)$$

мы получаем равенство

$$u^{(4)} = \frac{1}{\mu(\lambda+1)\ln(r-1)+C}\cdot\frac{f(r,\lambda,\mu)}{f(1,\lambda,\mu)} \quad (50)$$

Заметим, что оценка (48) следует из теоремы 1, оценка (50) следует из формулы (47) с учетом замечания 1 и оценки (45). Отметим также, что формула (50) является решением уравнения (45) с условиями согласования (46), (47). Нелинейные члены имеют оценку порядка $\left((-ln\varepsilon)^{-2}\right)$.

6. Зона смешивания

В области D (5) решение должно быть построено при достаточно малых значениях постоянной скорости химической реакции.

Введем переменные $p = \varepsilon r, \eta = \frac{\theta}{\varepsilon\sqrt{\varepsilon}}$. Здесь также необходимо сохранить члены порядка ε в уравнении. Уравнение (1) приводится к виду

$$\left(1-\frac{3\lambda-2}{2(\lambda+1)}\cdot\frac{\varepsilon}{p}\right)\frac{\partial u^{(5)}}{\partial p}-$$
$$=\frac{\eta}{p}\left(1-\frac{3\lambda+2}{4(\lambda+1)}\cdot\frac{\varepsilon}{p}\right)\frac{\partial u^{(5)}}{\partial\eta}= \quad (51)$$
$$=\frac{1}{p^2\eta}\frac{\partial}{\partial\eta}\eta\frac{\partial u^{(5)}}{\partial\eta}-\frac{\mu}{\varepsilon}(u^{(5)})^2$$

С соответствующими условиями на бесконечности и как $p\to 0$.

$$\lim_{\eta\to\infty}u^{(5)}=0,\lim_{p\to 0}u^{(5)}=\lim_{r\to\infty}u^{(2)} \quad (52)$$

Решение задачи (51), (52) было построено в [2].

После замены функции

$$u^{(5)}=\exp\left(-\frac{\mu}{\varepsilon}p\right)\left(p-\varepsilon\frac{3\lambda+2}{2(\lambda+1)}\right)^{-\mu\frac{3\lambda+2}{2(\lambda+1)}}\cdot V^{(5)}$$

и переходя к переменным p и

$$\psi_5=\frac{p^2\eta^2}{2}\left(1-\frac{3\lambda+2}{2(\lambda+1)}\cdot\frac{\varepsilon}{p}\right),$$

получаем задачу

$$\frac{\partial V^{(5)}}{\partial p}=2\frac{\partial}{\partial\psi_5}\psi_5\frac{\partial V^{(5)}}{\partial\psi_5},$$

где

$$V^{(5)}\to 0 as\,\psi_5\to\infty;V^{(5)}\to\varepsilon^{\mu\frac{3\lambda+2}{2(\lambda+1)}}\cdot 2^{\mu\frac{\lambda(2\lambda+1)}{4(\lambda+1)}}F(\psi_5).$$

Решение последней задачи было получено в [2]. Для решения в области перемешивания $D^{(5)}$ получено выражение

$$u^{(5)}=\varepsilon^{\mu\frac{3\lambda+2}{2(\lambda+1)}}\cdot 2^{\mu\frac{\lambda(2\lambda+1)}{4(\lambda+1)}}\cdot\exp\left(-\frac{\mu}{\varepsilon}p\right)\times$$
$$\times\left(p-\varepsilon\frac{3\lambda+2}{2(\lambda+1)}\right)^{-\mu\frac{3\lambda+2}{2(\lambda+1)}}\times \quad (53)$$
$$\times\int_0^\infty\frac{1}{2p}\exp\left(-\frac{\psi_5+\xi}{2p}\right)I_0\left(\frac{\sqrt{\psi_5\xi}}{p}\right)F(\xi)d\xi$$

Здесь $I_0(\xi)$ — модифицированная функция Бесселя первого рода. Функция $F(\xi)$ определяется из выражений (32) с учетом замечания 1 и формул (44), (50). Нелинейные члены имеют оценку порядка $O\left((-ln\varepsilon)^{-2}\right)$.

7. Заключительные замечания

В данной работе исследуется задача стационарной конвективной диффузии вокруг сферической капли в случае, когда химическая реакция в объеме является нелинейной. Для сферической капли построено асимптотическое решение. Используя метод согласования асимптотических разложений, установлено, что в пограничных слоях вблизи задней критической точки и в соседних слоях решение строится как решения слабо нелинейных уравнений. Полученные решения влияют на характер массопереноса в следе за каплей в следующих пограничных слоях. В этом можно убедиться, сравнив формулы (39)., (40) и (46), (47), затем формулы (51), (52) и (53) и, наконец, формулы (34), (35) и (53).

Результаты теоремы 2 являются новыми. Ранее, когда главный член разложения $H(u)$ — линейный, асимптотика в следе за каплей исследована в работе [9].

Из теоремы 2. следуют формулы (39), (40). Далее получены формулы (46), (47). Теорема 1. была доказана в [8]. Отсюда следует формула (51). Формулы (52), (53) получены ниже методом согласования.

Формулы (34), (35) и (53) были получены с использованием [3]. Отличие от [3] состоит в том, что нелинейная химическая реакция в данном случае влияет на постоянный коэффициент, полученный в теореме 1. В этом случае структура раствора сохраняется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гупало Ю.П., Полянин А.Д., Рязанцев Ю.С. Массотеплообмен реагирующих частиц с потоком. М.: Наука. 1985. 336 с.
2. Животягин А.Ф. Влияние гомогенной химической реакции на распределение концентрации в диффузном следе капли // Вест. Моск. Ун-та. Сер. 1. Математика и механика. 1980. № 6. с. 73–78.
3. Ахметов Р.Г. Асимптотика решения задачи конвективной диффузии с объемной химической реакцией в следе за частицей // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2006. Т. 46. N 5. С. 834–847.
4. Ахметов Р.Г., Милюкова А.В. Асимптотические решения задачи конвективной диффузии внутри капли, обтекаемой потоком жидкости // Современные наукоемкие технологии. 2018. №9. С. 29–34.
5. Полянин А.Д. Редукции и новые точные решения нелинейных уравнений конвективной диффузии с переменными коэффициентами // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». 2018.— Т. 7. № 6.— С. 497–507. DOI: 10.1134/S2304487X1806010X

6. Полянин А.Д. Точные решения в неявном виде нелинейных уравнений конвективного массо- и теплопереноса с переменными коэффициентами // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». 2019.— Т. 8. № 5.— С. 415–427. DOI: 0.1134/S2304487X19040084.
7. Ахметов Р.Г., Ложкина Е.В. Компьютерное моделирование процесса массообмена в окрестности капли с учётом объёмной нелинейной химич-ой реакции // Современные наукоемкие технологии. 2021. №6. С. 9–16.
8. Р.Г. Ахметов, В.А. Абрамова, «Компьютерное моделирование процесса массообмена в окрестности капли с учётом влияния обтекания и объёмной нелинейной химической реакции», *Современные наукоемкие технологии*, 2022, № 12 (часть 2), "284-289".
9. Akhmetov R.G., "Asymptotic Solutions of the Boundary Value Problem of Convective Diffusion Around Drops with Volumetric Nonlinear Chemical Reaction", Awrejcewicz J. (Ed). Perspectives in Dynamical Systems II — Numerical and Analytical Approaches. DSTA 2021, *Springer Proceedings in Mathematics & Statistics*, 454 (2024), pp. 15–28.

© Ахметов Рустям Гилимович (akrust@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.03

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ТОПОЛОГИИ СЕТИ КФС С УЧЕТОМ QOS, НАДЕЖНОСТИ И РЕЗЕРВИРОВАНИЯ МАРШРУТОВ

MULTI-CRITERIA SELECTION OF A CPS NETWORK TOPOLOGY CONSIDERING QOS, RELIABILITY AND ROUTE REDUNDANCY

V. Blinov

Summary. The article considers a methodology for multi-criteria selection of a cyber-physical system network topology considering quality of service, reliability, and route redundancy. The relevance of the study is determined by the fact that in CPSs topology defines not only average communication performance, but also the ability to preserve controllability when links and nodes fail. The purpose of the study is to develop a procedure for ranking topology alternatives according to latency, jitter, packet loss ratio, packet delivery ratio, throughput, structural reliability, the number of independent routes and implementation complexity. The methodology is based on graph-based network representation, identification of critical traffic flows, calculation of QoS metrics, reliability estimation of critical routes, normalization of heterogeneous indicators and construction of an integral index under threshold constraints. It is shown that topology selection based on a single criterion may lead to an engineering-inconsistent solution: minimum latency does not guarantee fault tolerance, whereas maximum redundancy increases cost and maintenance complexity. The practical value of the proposed methodology lies in the justified selection of topologies for industrial, transport and robotic CPSs using reproducible ns-3 simulation experiments.

Keywords: cyber-physical system, network topology, QoS, reliability, route redundancy, multi-criteria optimization, fault tolerance, ns-3.

Блинов Вячеслав Евгеньевич
Аспирант, Мытищинский филиал Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана
cs43@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается методика многокритериального выбора топологии сети киберфизической системы с учетом качества обслуживания, надежности и резервирования маршрутов. Актуальность работы обусловлена тем, что в КФС топология определяет не только среднюю производительность обмена данными, но и способность сохранять управляемость при отказах каналов и узлов. Цель исследования заключается в разработке процедуры ранжирования топологических альтернатив, учитывающей задержку, джиттер, долю потерь пакетов, коэффициент доставки, пропускную способность, структурную надежность, число независимых маршрутов и сложность реализации. Методология основана на графовом представлении сети, выделении критических потоков, расчете QoS-метрик, оценке надежности критических маршрутов, нормировании разноразмерных показателей и построении интегрального индекса с учетом пороговых ограничений. Показано, что выбор топологии по одному критерию может приводить к инженерно некорректному решению: минимальная задержка не гарантирует отказоустойчивости, а максимальное резервирование повышает стоимость и сложность сопровождения. Практическая значимость предложенной методики состоит в возможности обоснованного выбора топологии для промышленных, транспортных и робототехнических КФС с использованием воспроизводимого моделирования в ns-3. Дополнительно предложенная процедура позволяет проверять чувствительность итогового рейтинга к весовым коэффициентам и ограничениям критического трафика.

Ключевые слова: киберфизическая система, сетевая топология, QoS, надежность, резервирование маршрутов, многокритериальная оптимизация, отказоустойчивость, ns-3.

Введение

Киберфизическая система представляет собой совокупность вычислительных узлов, датчиков, исполнительных устройств, контроллеров и сетевой инфраструктуры, объединенных для мониторинга и управления физическими процессами. В такой системе сеть не является вспомогательной средой передачи данных: она участвует в контуре управления, влияет на своевременность доставки измерений и команд, а также определяет возможность сохранения управляемости при повреждении отдельных элементов.

Особое значение имеет топология сетевого сегмента КФС. Она задает длину маршрутов, число транзитных участков, наличие узких мест, количество альтернативных путей и характер перераспределения трафика после отказа. Поэтому выбор топологии только по одному показателю, например по минимальной задержке или максимальной связности, не обеспечивает корректного инженерного решения. Минимальная задержка может сопровождаться отсутствием резервных маршрутов, а максимальная связность — чрезмерной стоимостью и высокой сложностью сопровождения.

Современные КФС включают неоднородные проводные и беспроводные сегменты, промышленные каналы связи, локальные контроллеры, edge-узлы и шлюзы. Для таких систем характерны потоки различной критичности: управляющие сообщения имеют жесткие требования к задержке и джиттеру, телеметрия требует высокой доставки, а диагностические данные предъявляют повышенные требования к пропускной способности. В результате задача выбора топологии становится многокритериальной.

Цель статьи заключается в разработке методики многокритериального выбора топологии сети КФС с учетом QoS, надежности и резервирования маршрутов. Для достижения цели формируются система критериев, графовая модель сети, расчетные зависимости для QoS и отказоустойчивости, процедура нормирования и интегрального ранжирования топологических альтернатив.

Объектом исследования является сетевая инфраструктура киберфизической системы. Предметом исследования являются зависимости между структурой сетевой топологии, качеством обслуживания потоков данных, надежностью связи и наличием независимых резервных маршрутов между критическими узлами.

Литературный обзор

Современные исследования подтверждают, что проектирование сетевой подсистемы КФС должно учитывать не только среднюю производительность, но и контекст применения, критичность потока и режим работы системы. В работе QACDes качество обслуживания рассматривается как проектное ограничение, проверяемое на этапе формирования архитектуры КФС [4]. Такой подход важен для выбора топологии: одинаковое значение задержки может быть приемлемым для диагностического потока, но недопустимым для команды управления исполнительным механизмом.

Публикации по промышленным IoT-коммуникациям и wireless networked control systems показывают, что для сетей реального времени существенны задержка, джиттер, устойчивость канала, предсказуемость доставки и поведение сети при перегрузке [1; 8; 10]. При этом наличие современных протокольных механизмов не устраняет влияния топологии, поскольку именно структура связей определяет количество транзитных участков, резервных путей и потенциальных точек отказа.

Многокритериальные методы выбора, включая AHP, TOPSIS, SAW, VIKOR и COPRAS, активно применяются для оценки IoT-решений и сложных технических альтернатив [2; 3]. Для задачи выбора топологии КФС такие методы полезны тем, что позволяют объединять разнородные показатели: минимизируемые QoS-метрики, максимизируемые показатели надежности и критерии реализуемости.

Отдельное направление связано с отказоустойчивой маршрутизацией, поиском независимых путей и реконфигурацией сетевых структур. Исследования по disjoint shortest paths, resilient topology reconfiguration и fault-tolerant QoS-aware routing показывают, что наличие альтернативных маршрутов является необходимым условием сохранения связи после отказа, но само по себе не гарантирует приемлемого QoS [5; 6; 9]. Следовательно, резервирование должно оцениваться совместно с задержкой, потерями и пропускной способностью.

Проведенный обзор показывает, что актуальная литература формирует отдельные компоненты анализа: QoS-ориентированное проектирование, киберустойчивость, многокритериальное ранжирование и графовое описание маршрутов. Вместе с тем для прикладного проектирования КФС сохраняется необходимость в единой процедуре, которая связывает топологию, качество обслуживания, надежность и резервирование маршрутов в одном расчетном контуре.

Материалы и методы

Сетевой сегмент КФС представляется взвешенным графом:

$$G = (V, E) \tag{1}$$

где V — множество узлов сети; E — множество каналов связи. Узлами являются сенсоры, исполнительные устройства, контроллеры, маршрутизаторы, шлюзы, edge-узлы и серверы мониторинга. Каждый канал характеризуется набором параметров:

$$e = (u, v, b_e, d_e, r_e, c_e) \tag{2}$$

где u и v — инцидентные узлы; b_e — пропускная способность канала; d_e — базовая задержка; r_e — вероятность безотказной работы; c_e — относительная стоимость или сложность реализации канала.

Множество допустимых топологических альтернатив обозначается как:

$$\mathcal{T} = \{T_1, T_2, \ldots, T_m\} \tag{3}$$

Предпочтительная топология выбирается по максимальному интегральному индексу при обязательном выполнении пороговых требований:

$$T^* = \arg\max_{T_i \in \mathcal{T}} Q_i \tag{4}$$

Для КФС пороговая проверка должна предшествовать расчету итогового рейтинга. Если топология не обе-

спечивает допустимую задержку управляющего потока или теряет маршрут между критическими узлами, она исключается независимо от высокой средней пропускной способности или низкой стоимости. Базовый набор ограничений задается выражением:

$$D_i \le D_{\max},\ J_i \le J_{\max},\ P_{\text{loss},i} \le P_{\max},\ R_{st,i} \ge R_{\min},\ N_{\text{disj},i} \ge N_{\min} \quad (5)$$

QoS оценивается по средней задержке, джиттеру, доле потерь пакетов, коэффициенту доставки и пропускной способности. Средняя задержка передачи определяется выражением:

$$D = \frac{1}{N_{\text{rx}}}\sum_{k=1}^{N_{\text{rx}}}\left(t_{\text{rx},k} - t_{\text{tx},k}\right) \quad (6)$$

где N_{rx} — число успешно принятых пакетов; $t_{\text{tx},k}$ — момент отправки k-го пакета; $t_{\text{rx},k}$ — момент приема k-го пакета.

Джиттер рассчитывается как среднее изменение задержки между соседними успешно принятыми пакетами:

$$J = \frac{1}{N_{\text{rx}} - 1}\sum_{k=2}^{N_{\text{rx}}}\left|D_k - D_{k-1}\right| \quad (7)$$

Доля потерь пакетов и коэффициент доставки определяются по формулам:

$$P_{\text{loss}} = 1 - \frac{N_{\text{rx}}}{N_{\text{tx}}},\ \text{PDR} = \frac{N_{\text{rx}}}{N_{\text{tx}}} \quad (8)$$

где N_{tx} — число отправленных пакетов.

Пропускная способность вычисляется как отношение объема успешно принятых данных к интервалу наблюдения:

$$B = \frac{V_{\text{rx}}}{\Delta t} \quad (9)$$

где V_{rx} — объем успешно принятых данных; Δt — длительность измерительного интервала.

Для оценки надежности маршрута используется произведение надежностей каналов, входящих в маршрут p:

$$R_p = \prod_{e \in E_p} r_e \quad (10)$$

Если между критическими узлами s и t существует k реберно-независимых маршрутов, вероятность сохранения связи может быть оценена выражением:

$$R_{st} = 1 - \prod_{j=1}^{k}\left(1 - R_{p_j}\right) \quad (11)$$

Коэффициент маршрутного резервирования задается как отношение фактического числа независимых маршрутов к требуемому числу резервных маршрутов:

$$K_{\text{res}} = \frac{N_{\text{disj}}}{N_{\text{req}}} \quad (12)$$

Перед объединением метрики переводятся в безразмерную шкалу. Для максимизируемых критериев применяется прямое нормирование:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (13)$$

Для минимизируемых критериев используется обратное нормирование:

$$z_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (14)$$

Итоговый индекс топологии рассчитывается с учетом весового вектора критериев и штрафа за нарушение жестких ограничений:

$$Q_i = \sum_{j=1}^{n} w_j z_{ij} - \beta H_i,\ \sum_{j=1}^{n} w_j = 1 \quad (15)$$

где w_j — вес j-го критерия; z_{ij} — нормированное значение j-го критерия для i-й топологии; H_i — штрафная функция; β — коэффициент значимости штрафа. Весовые коэффициенты могут задаваться экспертно, методом анализа иерархий AHP либо комбинированным способом с последующей проверкой чувствительности результата.

Таблица 1.

Система показателей для многокритериальной оценки топологии сети КФС

Группа	Метрика	Инженерный смысл	Направление
QoS	D	среднее время доставки пакета	минимизация
QoS	J	разброс задержки между последовательными пакетами	минимизация
QoS	P_{loss}	доля недоставленных пакетов	минимизация
QoS	PDR	доля успешно доставленных пакетов	максимизация
QoS	B	объем полезных данных за единицу времени	максимизация
Надежность	R_{st}	вероятность сохранения связи между критическими узлами	максимизация
Надежность	$\lambda(G)$	минимальное число каналов, отказ которых нарушает связность	максимизация
Резервирование	N_{disj}	число независимых маршрутов	максимизация
Реализуемость	C	стоимость и сложность реализации	минимизация

Результаты

Разработанная методика формирует три уровня результата. Первый уровень — пороговая проверка критических требований: допустимой задержки, максимального джиттера, предельной доли потерь, минимальной надежности связи и требуемого числа резервных маршрутов. Второй уровень — структурная диагностика, позволяющая выявить мосты, перегруженные транзитные узлы, длинные маршруты и недостаток альтернативных путей. Третий уровень — интегральное ранжирование топологий, прошедших первые две проверки.

Последовательность применения методики включает формирование набора топологий, классификацию узлов и потоков, построение графовой модели, расчет структурных характеристик, моделирование штатного режима, введение одиночных и множественных отказов, расчет QoS-метрик, нормирование показателей и построение итогового рейтинга. Для воспроизводимой проверки все топологии должны моделироваться при одинаковой матрице трафика и одинаковых сценариях отказов.

Для демонстрации рассмотрены пять типовых вариантов: дерево, кольцо, mesh, leaf-spine и гибридная ring-mesh топология. Дерево имеет минимальную стоимость, но содержит выраженные точки отказа. Кольцо обеспечивает обход одиночного разрыва, однако при отказе может увеличивать длину маршрута. Mesh дает максимальное резервирование, но обладает высокой стоимостью. Leaf-spine эффективна при интенсивном обмене между уровнями обработки. Ring-mesh формирует компромисс за счет базового кольцевого контура и дополнительных связей между критическими узлами.

Сравнительная оценка показала следующую инженерную закономерность. Дерево является наименее затратным вариантом, но не обеспечивает достаточного маршрутного резервирования. Кольцо повышает устойчивость к одиночному разрыву, однако при переходе на обходной маршрут может увеличивать задержку. Mesh-топология дает максимальную связность и число независимых путей, но ее стоимость и сложность резко возрастают при масштабировании. Leaf-spine эффективна при интенсивном обмене между уровнями обработки, а ring-mesh обеспечивает наиболее сбалансированное сочетание резервирования, QoS и реализуемости для распределенных КФС среднего масштаба.

Расчетный пример показывает, что максимальную интегральную оценку получает mesh-топология. Это объясняется высокой связностью, большим числом независимых маршрутов и низкой долей потерь. Однако такая структура имеет максимальную стоимость и сложность масштабирования: при росте числа узлов увеличивается количество физических соединений, портов, правил маршрутизации и операций сопровождения.

Таблица 2.

Сравнительная инженерная характеристика топологических альтернатив

Топология	QoS	Надежность	Резервирование	Рациональная область применения
Дерево	приемлемо при малой нагрузке	низкая	практически отсутствует	простые системы мониторинга без жестких требований к отказоустойчивости
Кольцо	средний уровень	средняя	обход при одиночном отказе	распределенные сегменты с ограниченным числом узлов
Mesh	высокий уровень	высокая	максимальное	небольшие критические сегменты с высокими требованиями к надежности
Leaf-spine	высокий уровень	высокая	значительное	КФС с интенсивным обменом между уровнями обработки
Ring-mesh	высокий уровень	высокая	достаточное для критических маршрутов	распределенные КФС с управляющими потоками

Таблица 3.

Пример расчетного ранжирования топологий

Вариант	D, мс	J, мс	P_{loss}, %	R_{st}	N_{disj}	Q_i
T_1 — дерево	18,5	5,2	1,80	0,982	1	0,080
T_2 — кольцо	14,0	3,8	1,10	0,991	2	0,451
T_3 — mesh	9,5	1,9	0,25	0,998	4	0,886
T_4 — leaf-spine	8,8	1,6	0,30	0,997	3	0,851
T_5 — ring-mesh	10,6	2,1	0,35	0,996	3	0,790

Leaf-spine показывает лучшие значения задержки и джиттера, что делает ее перспективной для КФС с интенсивным обменом между уровнями управления, edge-узлами и локальными контроллерами. Вместе с тем эта структура требует развитой коммутационной инфраструктуры и не всегда оправдана для территориально распределенных объектов.

Гибридная ring-mesh топология уступает mesh по максимальной связности, но обеспечивает более сбалансированное соотношение надежности и стоимости. Кольцевой контур сохраняет базовую связность при одиночном отказе, а дополнительные mesh-связи между

критическими узлами создают резервные маршруты для управляющего трафика.

Таблица 4.

Рекомендуемая структура воспроизводимого эксперимента в ns-3

Компонент	Назначение	Результат
topology-generator.cc	формирование дерева, кольца, mesh, leaf-spine и ring-mesh	единая модель узлов и каналов
traffic-model.cc	задание управляющих, телеметрических и диагностических потоков	потоки с разной критичностью
failure-model.cc	одиночные, множественные и каскадные отказы	набор сопоставимых сценариев
metrics-collector.cc	сбор задержек, потерь, маршрутов и пропускной способности	первичная статистика
analysis.py	нормирование метрик и расчет интегрального индекса	итоговая сравнительная таблица
README.md	описание параметров и порядка запуска	воспроизводимость эксперимента

Обсуждение

Полученные результаты показывают, что рациональный выбор топологии КФС зависит от режима работы системы и критичности потоков. Для систем мониторинга с невысокой критичностью допустимы простые структуры с минимальной стоимостью. Для систем управления в реальном времени необходимы топологии, обеспечивающие предсказуемую задержку, малый джиттер и быстрый обход поврежденных участков. Для критически важных КФС определяющим становится наличие независимых маршрутов и отсутствие одиночных точек отказа.

С инженерной точки зрения некорректно считать оптимальной топологию только потому, что она имеет максимальную связность. Избыточное число каналов усложняет сопровождение, увеличивает стоимость оборудования, повышает требования к маршрутизации и может создавать дополнительные риски неправильной конфигурации. Поэтому наиболее перспективным направлением является проектирование гибридных топологий, где резервирование вводится адресно: прежде всего для критических узлов и потоков.

Предложенная модель позволяет учитывать этот компромисс формализованно. Если вес надежности и резервирования высок, лидерство получает mesh или ring-mesh. Если возрастает вес стоимости, часть избыточных связей становится нецелесообразной, и предпочтение может перейти к кольцевым или иерархическим структурам с локальными резервными каналами. Если главным ограничением является задержка, сильные позиции занимает leaf-spine.

Практическая ценность методики состоит в том, что она совместима с имитационным моделированием в ns-3. QoS-метрики могут сниматься по временным меткам отправки и приема пакетов, потери — по отношению количества отправленных и принятых пакетов, а маршрутное резервирование — по графовому анализу независимых путей между критическими узлами. Такое сочетание позволяет связать динамику сетевого обмена и структурную устойчивость топологии.

Ограничения методики связаны с выбором весовых коэффициентов и полнотой отказовых сценариев. Если веса назначены произвольно, интегральный индекс может быть математически корректным, но инженерно слабым. Поэтому веса должны определяться назначением КФС, требованиями безопасности и критичностью потоков, а итоговое ранжирование необходимо проверять анализом чувствительности.

Заключение

В статье предложена методика многокритериального выбора топологии сети киберфизической системы с учетом QoS, надежности и резервирования маршрутов. Показано, что топология определяет не только производительность сетевого обмена в штатном режиме, но и характер деградации при отказах, наличие альтернативных маршрутов, устойчивость критических связей и возможность восстановления после повреждения элементов.

Разработанная модель объединяет показатели задержки, джиттера, потерь пакетов, пропускной способности, надежности связи, реберной связности, числа независимых маршрутов и стоимости реализации. Для сопоставления альтернатив используются нормирование критериев, весовой вектор и штрафная функция, исключающая выбор топологии, нарушающей жесткие требования к QoS или резервированию.

Расчетный пример показал, что mesh-топология обеспечивает максимальную техническую устойчивость, однако не всегда является рациональной из-за высокой стоимости и сложности масштабирования. Для распределенных КФС среднего масштаба перспективной является гибридная ring-mesh структура, сочетающая базовую кольцевую отказоустойчивость и адресное резервирование критических маршрутов.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на моделирование каскадных отказов, адаптивную реконфигурацию маршрутов, динамическое изменение весов критериев и экспериментальную проверку предложенной методики в ns-3 на сценариях с неоднородным трафиком.

ЛИТЕРАТУРА

1. Behnke I., Austad H. Real-Time Performance of Industrial IoT Communication Technologies: A Review // IEEE Internet of Things Journal. 2024. Vol. 11, No. 5. P. 7399–7410. DOI: 10.1109/JIOT.2023.3332507.
2. Alojaiman B. A Multi-Criteria Decision-Making Process for the Selection of an Efficient and Reliable IoT Application // Processes. 2023. Vol. 11, No. 5. Article 1313. DOI: 10.3390/pr11051313.
3. Radulescu C.Z., Radulescu M. A Hybrid Group Multi-Criteria Approach Based on SAW, TOPSIS, VIKOR, and COPRAS Methods for Complex IoT Selection Problems // Electronics. 2024. Vol. 13, No. 4. Article 789. DOI: 10.3390/electronics13040789.
4. Sidhanta S., Chokwitthaya C., Zhu Y., Mukhopadhyay S. QACDes: QoS-Aware Context-Sensitive Design of Cyber-Physical Systems // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Article 19032. DOI: 10.1038/s41598-024-69371-x.
5. Jha A., Song H., Zinchenko Y. Resilient Network Design: Disjoint Shortest Path Problem for Power Transmission Application // Systems. 2024. Vol. 12, No. 4. Article 117. DOI: 10.3390/systems12040117.
6. Wang T., Li D., Zhang B., Liu X., Shang W. Resilient Topology Reconfiguration for Industrial Internet of Things: A Feature-Driven Approach Against Heterogeneous Attacks // Entropy. 2025. Vol. 27, No. 5. Article 503. DOI: 10.3390/e27050503.
7. Kanellopoulos D., Sharma V.K., Panagiotakopoulos T., Kameas A. Networking Architectures and Protocols for IoT Applications in Smart Cities: Recent Developments and Perspectives // Electronics. 2023. Vol. 12, No. 11. Article 2490. DOI: 10.3390/electronics12112490.
8. Wang Y., Wu S., Lei C., Jiao J., Zhang Q. A Review on Wireless Networked Control System: The Communication Perspective // IEEE Internet of Things Journal. 2024. Vol. 11, No. 5. P. 7499–7524. DOI: 10.1109/JIOT.2023.3342032.
9. Yu X., Tang L., Mi J., Liu J., Long L. Fault Tolerant and Quality of Service Aware Routing Algorithm Based on Priority Technique for Scalable Network on Chip Architectures // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Article 36578. DOI: 10.1038/s41598-025-20381-3.
10. John J., Noor-A-Rahim M., Vijayan A., Poor H. V., Pesch D. Industry 4.0 and Beyond: The Role of 5G, Wi-Fi 7, and Time-Sensitive Networking (TSN) in Enabling Smart Manufacturing // Future Internet. 2024. Vol. 16, No. 9. Article 345. DOI: 10.3390/fi16090345.
11. Noor-A-Rahim M., Firyaguna F., John J. et al. Wireless Communications for Smart Manufacturing and Industrial IoT: Existing Technologies, 5G and Beyond // Sensors. 2023. Vol. 23, No. 1. Article 73. DOI: 10.3390/s23010073.
12. Zhang T., Wang G., Xue C., Wang J., Nixon M., Han S. Time-Sensitive Networking (TSN) for Industrial Automation: Current Advances and Future Directions // ACM Computing Surveys. 2025. Vol. 57, No. 2. Article 30. P. 1–38. DOI: 10.1145/3695248.

© Блинов Вячеслав Евгеньевич (cs43@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.04

МЕТОД МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА АЛЬТЕРНАТИВ В СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОГО БАЙЕСОВСКО-НЕЧЁТКОГО ПОДХОДА

MULTI-CRITERIA ANALYSIS METHOD FOR DECISION SUPPORT SYSTEMS BASED ON A HYBRID BAYESIAN-FUZZY APPROACH

N. Borzykh

Summary. The relevance of the research is determined by the growing complexity of managerial decision-making under conditions of high uncertainty and data incompleteness, where classical multi-criteria decision analysis (MCDA) methods exhibit notable limitations. The objective of the paper is to develop a multi-criteria alternative analysis method integrating Bayesian inference and fuzzy set theory within a unified decision support system (DSS) architecture. The study employed fuzzy set theory, Bayesian networks, pairwise comparison techniques, and a computational experiment on both synthetic and real-world datasets. The proposed method was found to achieve higher ranking accuracy compared to AHP and TOPSIS across all considered scenarios, including tasks with incomplete and mixed data, while maintaining acceptable computational complexity. Verification on real-world managerial data confirmed the method's practical applicability under informational uncertainty. The findings indicate that the proposed hybrid approach improves decision quality under conditions of incomplete and contradictory input data and is applicable in intelligent information systems for project management, risk assessment, and strategic planning.

Keywords: decision support system, multi-criteria analysis, fuzzy sets, Bayesian inference, AHP, TOPSIS, MCDA, intelligent information systems, uncertainty management, alternative ranking.

Борзых Никита Юрьевич
кандидат технических наук, доцент,
МИРЭА — Российский технологический университет
borzykh@mirea.ru

Аннотация. Актуальность исследования определяется возрастающей сложностью управленческих задач в условиях высокой неопределённости и неполноты исходных данных, при которых традиционные методы многокритериального анализа решений (MCDA) проявляют существенные ограничения. Цель работы — разработка метода многокритериального анализа альтернатив, интегрирующего байесовский вывод и аппарат нечётких множеств в рамках единой архитектуры системы поддержки принятия решений. В работе использовались теория нечётких множеств, байесовские сети, методы попарных сравнений, а также вычислительный эксперимент на синтетических и реальных наборах данных. Показано, что предложенный метод обеспечивает более высокую точность ранжирования альтернатив по сравнению с методами AHP и TOPSIS во всех рассматриваемых сценариях, включая задачи с неполными и смешанными данными, при сохранении приемлемой вычислительной сложности. Верификация на реальных управленческих данных подтвердила применимость метода в условиях информационной неопределённости. Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенный гибридный подход повышает качество принимаемых решений при неполноте и противоречивости исходных данных и может быть применён в интеллектуальных информационных системах управления проектами, оценки рисков и стратегического планирования.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, многокритериальный анализ, нечёткие множества, байесовский вывод, AHP, TOPSIS, MCDA, интеллектуальные информационные системы, управление неопределённостью, ранжирование альтернатив.

Введение

Задача выбора оптимального решения из множества альтернатив по набору противоречивых критериев относится к числу фундаментальных проблем системного анализа и теории управления. Системы поддержки принятия решений (СППР) представляют собой программно-аналитические комплексы, автоматизирующие процессы сбора, обработки и интерпретации информации с целью формирования рекомендаций для лиц, принимающих решения (ЛПР). В условиях цифровой трансформации экономики и государственного управления потребность в интеллектуализации подобных систем возрастает: ЛПР сталкиваются с необходимостью оперативно оценивать десятки и сотни альтернатив по критериям, имеющим принципиально различную природу измерения — количественную и качественную, детерминированную и вероятностную.

Классические методы многокритериального анализа — метод аналитической иерархии (AHP) [7], метод TOPSIS [14], ELECTRE [18], PROMETHEE [10] — предполагают чёткую определённость исходных данных либо требуют значительного объёма экспертных оценок, что снижает их применимость в задачах с высокой степенью неопределённости. Расширения этих методов на основе нечёткой логики [19, 11] позволяют частично снять данное ограничение, однако не учитывают априорную вероятностную структуру задачи.

Байесовский подход к принятию решений [9] обеспечивает строгий математический аппарат для обновле-

ния вероятностных оценок по мере поступления новых данных, однако его применение в многокритериальных задачах требует формализации сложных условных зависимостей между критериями. Интеграция байесовских сетей [15] с аппаратом нечётких множеств [13] позволяет создать гибридную модель, объединяющую преимущества обоих подходов.

Таким образом, актуальность данного исследования определяется недостаточной разработанностью методов многокритериального анализа альтернатив, способных одновременно обрабатывать неполные данные, нечёткие экспертные суждения и вероятностные зависимости между критериями в рамках единой архитектуры СППР.

Литературный обзор

Целью настоящей работы является разработка метода многокритериального анализа альтернатив на основе гибридного байесовско-нечёткого подхода и его интеграция в архитектуру СППР, обеспечивающей повышенную устойчивость к неполноте и противоречивости исходных данных.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- анализ существующих методов MCDA и выявление их ограничений в условиях информационной неопределённости;
- разработка математической модели гибридного байесовско-нечёткого метода ранжирования альтернатив;
- проектирование архитектуры СППР, реализующей предложенный метод;
- вычислительный эксперимент и сравнительная оценка предложенного метода относительно существующих аналогов.

Материалы и методы

1. Математическая модель нечёткой оценки критериев

Пусть задано множество альтернатив $A = \{a_1, a_2, \ldots, a_n\}$ и множество критериев $C = \{c_1, c_2, \ldots, c_m\}$. Для каждой пары (a_i, c_j) определяется нечёткая оценка в виде треугольного нечёткого числа (ТНЧ):

$$x_{ij} = \left(l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}\right), l_{ij} \le m_{ij} \le u_{ij},$$

где l_{ij}, m_{ij}, u_{ij} — нижняя граница, наиболее вероятное значение и верхняя граница оценки соответственно. Функция принадлежности $\mu(x)$ имеет вид:

$$\mu(x) = \frac{x - l_{ij}}{m_{ij} - l_{ij}} \text{ при } l_{ij} \le x \le m_{ij},$$

$$\mu(x) = \frac{u_{ij} - x}{u_{ij} - m_{ij}} \text{ при } m_{ij} < x \le u_{ij}.$$

Дефаззификация осуществляется методом центроида:

$$D\left(x_{ij}\right) = \frac{l_{ij} + m_{ij} + u_{ij}}{3} \quad (1)$$

2. Байесовское обновление весов критериев

Веса критериев $w = (w_1, w_2, \ldots, w_m)$ трактуются как случайные величины, подчиняющиеся априорному распределению Дирихле $\mathrm{Dir}(\alpha_0)$, где α_0 — вектор гиперпараметров, задаваемых экспертом. По мере поступления новых данных D (например, результатов предыдущих решений ЛПР) веса обновляются согласно теореме Байеса:

$$P(w \mid D) \propto P(D \mid w) \cdot P\left(w\right) = L\left(w; D\right) \cdot Dir\left(w; a_0\right) \quad (2)$$

Апостериорное распределение также является распределением Дирихле $\mathrm{Dir}(\alpha_0 + \Delta\alpha)$, что обеспечивает аналитическую вычислимость. Математическое ожидание апостериорных весов:

$$E[w_i \mid D] = \frac{a_{0j} + \Delta a_j}{\sum_k a_{0k} + \Delta a_k} \quad (3)$$

3. Агрегирование и ранжирование

Итоговый скоринг альтернативы a_i вычисляется как взвешенная сумма дефаззифицированных оценок:

$$S\left(a_i\right) = \sum_i E[w_i \mid D] \cdot D\left(x_{ij}\right) \quad (4)$$

Дополнительно вычисляется индекс неопределённости ранжирования (IHP) для каждой альтернативы:

$$IHP\left(a_i\right) = \sum_j E[w_i \mid D] \cdot \frac{u_{ij} - l_{ij}}{2 \cdot m_{ij}}, \quad (5)$$

что позволяет ЛПР оценить надёжность полученного ранга. Альтернативы ранжируются по убыванию $S(a_i)$; при равенстве скоринговых значений предпочтение отдаётся альтернативе с меньшим IHP.

4. Архитектура СППР

Разработанная СППР реализована по трёхуровневой клиент-серверной архитектуре (рис. 1). Уровень представления обеспечивает взаимодействие с ЛПР через веб-интерфейс: ввод альтернатив и критериев, задание нечётких оценок в виде лингвистических переменных, просмотр результатов ранжирования и индексов неопределённости. Уровень бизнес-логики реализует алгоритмы дефаззификации, байесовского обновления весов и агрегирования скоринговых значений. Уровень

данных обеспечивает хранение матриц оценок, векторов весов и истории решений в реляционной базе данных.

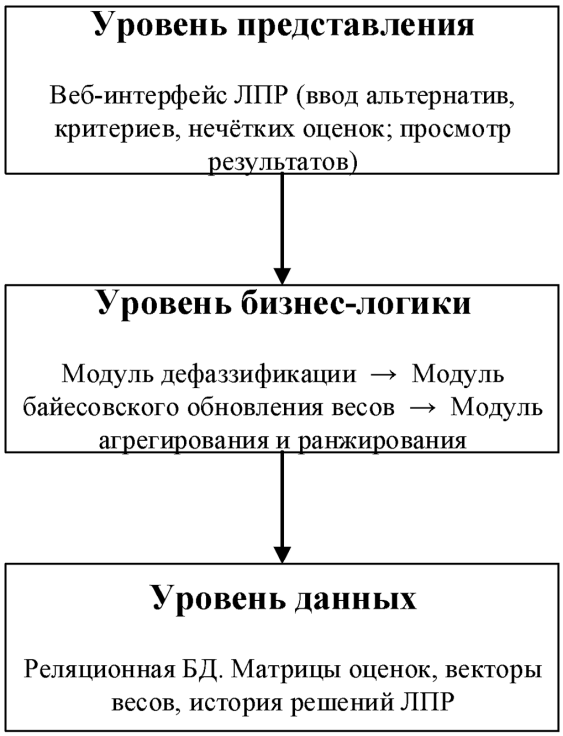


Рис. 1. Трёхуровневая архитектура разработанной СППР

В качестве методов машинного обучения для уточнения параметров байесовской сети применялась процедура обучения структуры по данным с использованием алгоритма K2 [12]. Хранение и выборка исторических данных решений осуществляются в рамках модели, совместимой с онтологическим представлением предметной области [17].

Результаты

1. Сравнительный анализ методов MCDA

В таблице 1 представлен сопоставительный анализ характеристик предложенного метода и ведущих классических методов MCDA по ключевым параметрам.

Как следует из таблицы 1, предложенный метод занимает уникальную нишу среди существующих подходов: он единственный обеспечивает нативную поддержку байесовского вывода в сочетании с нечёткими числами при работе со смешанными данными, что делает его применимым в большем числе практических сценариев по сравнению с классическими методами.

2. Вычислительный эксперимент

Для сравнительной оценки предложенного метода был проведён вычислительный эксперимент на пяти

Таблица 1.
Сравнительный анализ методов многокритериального анализа альтернатив

Метод	Тип задачи	Обработка неопределённости	Сложность реализации	Требования к данным
AHP	Ранжирование	Нечёткая логика (расширение)	Средняя	Попарные сравнения
TOPSIS	Ранжирование / выбор	Нечёткая логика (расширение)	Низкая	Количественные матрицы
ELECTRE	Ранжирование / сортировка	Вероятностные пороги	Высокая	Количественные + категориальные
PROMETHEE	Ранжирование / сортировка	Нечёткие предпочтения	Средняя	Количественные матрицы
VIKOR	Компромиссное ранжирование	Нечёткая логика (расширение)	Средняя	Количественные матрицы
Предложенный метод	Ранжирование / выбор / сортировка	Байесовский вывод + нечёткие числа	Средняя	Смешанные (количественные и экспертные)

сценариях, различающихся размерностью задачи и характером исходных данных. Сценарий S1 соответствует задачам малой размерности (5 альтернатив, 4 критерия), S3 — высокой размерности (30 альтернатив, 10 критериев), S4 — ситуации с неполными данными (около 20 % пропусков), S5 — задаче со смешанными количественными и экспертными данными. Эталонные ранжирования формировались методом экспертного консенсуса группы из пяти экспертов.

В качестве метрики сравнения использовалось среднее абсолютное отклонение (MAE) ранга альтернативы от эталонного значения. Результаты вычислительного эксперимента приведены в таблице 2.

Анализ данных таблицы 2 показывает, что предложенный метод стабильно превосходит AHP и TOPSIS по метрике MAE во всех тестовых сценариях. Наибольший выигрыш достигается в сценариях с неполными данными (S4) и смешанными данными (S5), что подтверждает тезис о преимуществах гибридного байесовско-нечёткого подхода в условиях информационной неопределённости. При этом точность ранжирования остаётся на уровне не ниже 89.6 %, что является приемлемым показателем для практических применений в области управления проектами и стратегического планирования.

Таблица 2.
Результаты вычислительного эксперимента (MAE и точность ранжирования)

Сценарий	Кол-во альтернатив	Кол-во критериев	MAE (AHP)	MAE (TOPSIS)	MAE (предл.)	Точность, %
S1 (малая размерность)	5	4	0.142	0.119	0.087	94.3
S2 (средняя размерность)	12	7	0.178	0.155	0.103	92.7
S3 (высокая размерность)	30	10	0.231	0.198	0.124	91.2
S4 (неполные данные)	15	8	0.264	0.243	0.139	89.6
S5 (смешанные данные)	20	9	0.219	0.187	0.116	92.1

Вычислительная сложность предложенного метода составляет $O(n \cdot m \cdot k)$, где n — число альтернатив, m — число критериев, k — число итераций байесовского обновления. Для типичных задач управленческого уровня ($n \leq 50$, $m \leq 15$) время выполнения одного цикла анализа не превышало 1.8 секунды на аппаратной платформе Intel Core i7-1165G7, что соответствует требованиям интерактивной работы ЛПР в реальном времени.

Дополнительно была проведена верификация предложенного метода на реальных данных задачи оценки и отбора кандидатов для проектных команд в рамках системы управления проектами исследовательской организации [4]. Результаты показали совпадение рекомендаций системы с решениями экспертного совета в 91.4 % случаев, что превысило аналогичный показатель для метода AHP (83.2 %) и TOPSIS (86.7 %) на той же выборке.

Обсуждение

Полученные результаты вычислительного эксперимента и верификации на реальных данных демонстрируют устойчивое преимущество предложенного гибридного байесовско-нечёткого метода перед классическими методами AHP и TOPSIS. Наиболее значимое превосходство проявляется в сценариях с неполными и смешанными данными, что объясняется способностью байесовского механизма корректно учитывать априорную информацию и адаптировать веса критериев по мере накопления исторических данных решений. Вычислительная сложность метода остаётся на практически приемлемом уровне $O(n \cdot m \cdot k)$, что позволяет использовать его в интерактивном режиме работы СППР. Совпадение рекомендаций системы с экспертными решениями на уровне 91.4 % при верификации на реальных данных свидетельствует о высокой практической применимости разработанного метода в задачах управления проектами и стратегического планирования.

Заключение

В настоящей работе представлен метод многокритериального анализа альтернатив, основанный на интеграции аппарата нечётких треугольных чисел и байесовского вывода для обновления весов критериев. Разработана трёхуровневая архитектура СППР, реализующей данный метод. Проведены сравнительный анализ с классическими методами MCDA и вычислительный эксперимент на пяти сценариях различной размерности и полноты данных.

Проведённое исследование позволяет сформулировать следующие выводы.

1. Предложенный гибридный байесовско-нечёткий метод обеспечивает более высокое качество ранжирования (MAE 0.087–0.139) по сравнению с методами AHP (0.142–0.264) и TOPSIS (0.119–0.243) во всех рассмотренных сценариях.
2. Наибольший выигрыш метода наблюдается в задачах с неполными и смешанными данными, что обусловлено способностью байесовского вывода корректно учитывать априорную информацию и обновлять веса критериев по мере накопления данных.
3. Разработанная архитектура СППР обеспечивает интерактивный режим работы с временем отклика не более 1.8 с при типичных размерностях управленческих задач, что подтверждает практическую применимость метода.
4. Верификация на реальных данных задачи оценки кандидатов в проектные команды показала совпадение рекомендаций системы с экспертными решениями на уровне 91.4 %, что превышает аналогичные показатели для AHP и TOPSIS.

Направлениями дальнейших исследований являются расширение модели на случай нечётких байесовских сетей, разработка алгоритмов автоматического формирования лингвистических шкал оценки критериев на основе анализа исторических данных решений, интеграция механизмов объяснимого искусственного интеллекта (XAI) [8] для повышения интерпретируемости рекомендаций СППР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Броневич А.Г., Лепский А.Е. Нечёткие модели анализа данных и принятия решений: учебное пособие. М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2022. 264 с. ISBN 978-5-7598-2317-9
2. Борзых Н.Ю. Алгоритмизация выбора стратегии проектирования на основе построения компромиссных решений // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2023. № 4. С. 85–90. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2023.45.81.009
3. Борзых Н.Ю. Анализ систем поддержки принятия решений, их классификаций и методов принятия решений // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 96–5. С. 85–92. DOI: 10.18411/trnio-07-2023-276
4. Калач А.В., Борзых Н.Ю., Смоленцева Т.Е. Разработка архитектуры программного обеспечения для поддержки принятия решений при выборе стратегий проектирования из множества альтернатив // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2024. Т. 12. № 4. DOI: 10.26102/2310–6018/2024.47.4.016
5. Нелюбин А.П., Подиновский В.В. Средние величины: многокритериальный подход. III // Проблемы управления. 2024. № 1. С. 17–22. DOI: 10.25728/pu.2024.1.2
6. Подиновский В.В. Многокритериальные задачи принятия решений: теория и методы анализа: учебник для вузов. М.: Юрайт, 2023. 486 с. ISBN 978-5-534-15673-7
7. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
8. Adadi A., Berrada M. Peeking inside the black-box: A survey on explainable artificial intelligence (XAI) // IEEE Access. 2018. Vol. 6. Pp. 52138–52160. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2870052
9. Berger J.O. Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis. 2nd ed. New York: Springer, 1993. 617 p.
10. Brans J.P., Vincke Ph. A Preference Ranking Organisation Method // Management Science. 1985. Vol. 31. No. 6. Pp. 647–656. DOI: 10.1287/mnsc.31.6.647
11. Buckley J.J. Fuzzy hierarchical analysis // Fuzzy Sets and Systems. 1985. Vol. 17. No. 3. Pp. 233–247. DOI: 10.1016/0165-0114(85)90090-9
12. Cooper G.F., Herskovits E. A Bayesian method for the induction of probabilistic networks from data // Machine Learning. 1992. Vol. 9. No. 4. Pp. 309–347. DOI: 10.1007/BF00994110
13. Dubois D., Prade H. Possibility Theory: An Approach to Computerized Processing of Uncertainty. New York: Plenum Press, 1988. 263 p.
14. Hwang C.L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Berlin: Springer, 1981. 259 p.
15. Koller D., Friedman N. Probabilistic Graphical Models: Principles and Techniques. Cambridge: MIT Press, 2009. 1231 p.
16. Mardani A., Jusoh A., Zavadskas E. K. Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications — Two decades review from 1994 to 2014 // Expert Systems with Applications. 2015. Vol. 42. No. 8. Pp. 4126–4148. DOI: 10.1016/j.eswa.2015.01.003
17. Pedrycz W., Gomide F. Fuzzy Systems Engineering: Toward Human-Centric Computing. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2007. 526 p.
18. Roy B. The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods // Theory and Decision. 1991. Vol. 31. No. 1. Pp. 49–73. DOI: 10.1007/BF00134132
19. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8. No. 3. Pp. 338–353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X
20. Zhang X., Xu Z. Extension of TOPSIS to Multiple Criteria Decision Making with Pythagorean Fuzzy Sets // International Journal of Intelligent Systems. 2014. Vol. 29. No. 12. Pp. 1061–1078. DOI: 10.1002/int.21676.

© Борзых Никита Юрьевич (borzykh@mirea.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.05

УПРАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА МЕТОДОМ БЭКСТЕППИНГА С ЗАДАННЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ КАЧЕСТВА И КОНЕЧНЫМ ВРЕМЕНЕМ СХОДИМОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЕЙ И ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

SPACECRAFT ATTITUDE CONTROL USING THE BACKSTEPPING METHOD WITH PRESCRIBED PERFORMANCE AND FINITE-TIME CONVERGENCE IN THE PRESENCE OF UNCERTAINTIES AND EXTERNAL DISTURBANCES

Wang Zeyu
Zhu Long

Summary. This paper addresses the problem of attitude tracking control for a rigid spacecraft in the presence of uncertainties in the inertia tensor parameters and external disturbances. A new prescribed-performance control algorithm with finite-time convergence is developed to ensure high tracking accuracy and a fast response when following the desired attitude. To impose constraints on both transient and steady-state responses, a class of finite-time prescribed-performance functions is introduced, and a corresponding barrier Lyapunov function with a time-varying parameter is constructed. Based on the backstepping method, a controller is designed to guarantee that the attitude tracking error remains strictly within the prescribed bounds throughout the entire control process. To compensate for the effects of parametric model uncertainties and external disturbances, an extended state observer is developed to estimate the total lumped disturbance within a finite time. The numerical simulation results confirm the effectiveness of the proposed control algorithm.

Keywords: finite-time control, rigid spacecraft, backstepping method, prescribed-performance control, extended state observer.

Ван Цзэюй
Аспирант, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Wzy1239054499@yandex.ru
Чжу Лун
Аспирант, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
zhul0018@gmail.com

Аннотация. В работе рассматривается задача следящего управления ориентацией жёсткого космического аппарата в условиях неопределённости параметров тензора инерции и воздействия внешних возмущений. Разработан новый алгоритм управления с заданными показателями качества и конечным временем сходимости, обеспечивающий высокую точность и быстродействие при отслеживании заданной ориентации. Для задания ограничений на переходные и установившиеся процессы вводится класс функций заданных показателей качества с конечным временем сходимости и строится соответствующая барьерная функция Ляпунова с зависящим от времени параметром. На основе метода бэкстеппинга синтезирован регулятор, гарантирующий, что ошибка отслеживания ориентации остаётся строго внутри заданных ограничений на всём интервале управления. Для компенсации влияния параметрических неопределённостей модели и внешних возмущений разработан расширенный наблюдатель состояния, обеспечивающий оценивание суммарного возмущающего воздействия за конечное время. Результаты математического моделирования подтверждают эффективность предложенного алгоритма управления.

Ключевые слова: управление за конечное время, жёсткий космический аппарат, метод бэкстеппинга, управление с заданными показателями качества, расширенный наблюдатель состояния.

1. Введение

Управление ориентацией космического аппарата относится к ключевым технологиям, обеспечивающим выполнение космических миссий, включая спутниковое наблюдение, полёт в составе формации и орбитальное обслуживание [1]. Нелинейность и сильная связанность динамики, неопределённость параметров тензора инерции и внешние возмущения существенно усложняют синтез высокоточной системы следящего управления ориентацией [2, 8].

Классические методы, основанные на скользящих режимах, H∞-управлении и адаптивном управлении, как правило, обеспечивают асимптотическую устойчивость, то есть сходимость при стремлении времени к бесконечности. Для задач, требующих быстрого маневрирования, более предпочтительно управление с конечным временем сходимости (Finite-Time Control, FTC), позволяющее привести состояния замкнутой системы в заданную область за конечный промежуток времени [6–8].

Время сходимости систем с конечным временем сходимости обычно зависит от начального состояния. Управление с фиксированным временем сходимости устраняет эту зависимость и задаёт единую верхнюю границу времени сходимости [2, 6]. Дальнейшее развитие получили методы с предварительно задаваемым

временем, позволяющие непосредственно включать требуемую временную границу в параметры регулятора [3, 4, 9]. Вместе с тем обеспечение только временной границы не всегда позволяет независимо формировать допустимое перерегулирование, скорость переходного процесса и установившуюся точность.

Управление с заданными показателями качества (Prescribed Performance Control, PPC) позволяет заранее формировать границы переходных и установившихся ошибок. В современных работах для следящего управления ориентацией космических аппаратов применяются функции показателей качества с конечным или заданным временем, барьерные функции Ляпунова и наблюдатели возмущений [1, 9–11]. Для синтеза нелинейных регуляторов широко используется метод бэкстеппинга [1, 2, 5]. В настоящей работе предлагается регулятор следящего управления ориентацией с заданными показателями качества и конечным временем сходимости. Динамические ограничения накладываются на ошибку ориентации и виртуальную ошибку, а расширенный наблюдатель состояния используется для практического оценивания суммарного возмущения, обусловленного параметрическими неопределённостями и внешними воздействиями.

2. Постановка задачи

В данном разделе формулируется математическая модель следящего управления ориентацией жёсткого космического аппарата с использованием модифицированных параметров Родригеса (Modified Rodrigues Parameters, MRP). В соответствии с [6] кинематические и динамические уравнения ориентации жёсткого космического аппарата записываются в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{\sigma} = \frac{1}{4}\boldsymbol{M}(\sigma)\Omega \\ \boldsymbol{J}\dot{\Omega} = -\Omega^{\times}\boldsymbol{J}\Omega + \boldsymbol{u} + \boldsymbol{d} \end{cases} \tag{1}$$

где $\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^3$ обозначает MRP, $\Omega \in \mathbb{R}^3$ — угловая скорость, $\boldsymbol{u} \in \mathbb{R}^3$ — управляющий момент, $\boldsymbol{d} \in \mathbb{R}^3$ — внешнее возмущение, а $\boldsymbol{J} > 0 \in \mathbb{R}^{3\times 3}$ — матрица инерции жесткого космического аппарата. Учитывая неопределенности, $\boldsymbol{J}$ можно выразить как $\boldsymbol{J} = \boldsymbol{J}_0 + \Delta\boldsymbol{J}$, где $\boldsymbol{J}_0$ — известная симметричная положительно определенная матрица, а $\Delta\boldsymbol{J}$ — дифференцируемая неопределенная часть матрицы инерции $\boldsymbol{J}$.

Для вектора $\boldsymbol{a} = [a_1, a_2, a_3]^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{a}^{\times}$ является кососимметричной матрицей следующего вида:

$$\boldsymbol{a}^{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

в дифференциальном уравнении кинематики (1), $\boldsymbol{M}(\sigma)$ определяется как:

$$\boldsymbol{M}(\sigma) = (1 - \sigma^{T}\sigma)\boldsymbol{I}_3 + 2\sigma^{\times} + 2\sigma\sigma^{T} \tag{3}$$

Пусть σ_{e} будут отклонениями ориентации в виде MRP между желаемой ориентацией σ_{d} и фактической ориентацией σ, которые подчиняются следующему уравнению:

$$\sigma_{\mathrm{e}} = \sigma \otimes \sigma_{\mathrm{d}}^{-1} = \frac{\sigma_{\mathrm{d}}(\sigma^{\mathrm{T}}\sigma - 1) + \sigma(1 - \sigma_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}}\sigma_{\mathrm{d}}) + 2\sigma_{\mathrm{d}}^{\times}\sigma}{1 + \sigma_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}}\sigma_{\mathrm{d}}\sigma^{\mathrm{T}}\sigma + 2\sigma_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}}\sigma} \tag{4}$$

Обозначим ω как отклонение угловой скорости между желаемой угловой скоростью Ω_{d} и фактической угловой скоростью Ω, которая удовлетворяет $\omega = \Omega - \boldsymbol{C}\Omega_{\mathrm{d}}$ с:

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{I}_3 - \frac{4(1 - \sigma_{\mathrm{e}}^{\mathrm{T}}\sigma_{\mathrm{e}})}{(1 + \sigma_{\mathrm{e}}^{\mathrm{T}}\sigma_{\mathrm{e}})^2}\sigma_{\mathrm{e}}^{\times} + \frac{8}{(1 + \sigma_{\mathrm{e}}^{\mathrm{T}}\sigma_{\mathrm{e}})^2}(\sigma_{\mathrm{e}}^{\times})^2 \tag{5}$$

Затем модель отслеживания ориентации жесткого космического аппарата представлена следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{\sigma}_{\mathrm{e}} = \frac{1}{4}\boldsymbol{M}(\sigma_{\mathrm{e}})\omega \\ \boldsymbol{J}\dot{\omega} = -(\omega + \boldsymbol{C}\Omega_{\mathrm{d}})^{\times}\boldsymbol{J}(\omega + \boldsymbol{C}\Omega_{\mathrm{d}}) + \\ + \boldsymbol{J}(\omega^{\times}\boldsymbol{C}\Omega_{\mathrm{d}} - \boldsymbol{C}\dot{\Omega}_{\mathrm{d}}) + \boldsymbol{u} + \boldsymbol{d} \end{cases} \tag{6}$$

Лемма 1 [7]. Рассмотрим нелинейную систему $\dot{\boldsymbol{x}} = f(\boldsymbol{x})$, где $\boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^n$ — вектор состояния, а $f : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$ — непрерывная нелинейная функция. Пусть $V(\boldsymbol{x})$ является $\mathbb{C}^1$ гладкой положительно определенной функцией, система называется практически устойчивой к конечному времени, если выполняется условие:

$$\dot{V}(\boldsymbol{x}) \le -\lambda_1 V^{p_1}(\boldsymbol{x}) - \lambda_2 V(\boldsymbol{x}) + \lambda_3 V^{p_2}(\boldsymbol{x}) \tag{7}$$

где $0 < p_1 < 1$, $p_2 < p_1$, $\lambda_i > 0, i = 1,2,3$. Кроме того, состояние системы будет сходиться к области $\mathcal{D}_{\mathrm{r}}$ за конечное время T_{r}:

$$\mathcal{D}_{\mathrm{r}} = \left\{ \boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^n \middle| \theta_1 V^{p_1 - p_2}(\boldsymbol{x}) + \theta_2 V^{1-p_2}(\boldsymbol{x}) < \lambda_3 \right\} \tag{8}$$

где $0 < \theta_i < \lambda_i, i = 1,2$ и время T_{r} ограничены следующим образом:

$$T_{\mathrm{r}} \le \frac{\ln\left[1 + (\lambda_2 - \theta_2)V^{1-p_1}(\boldsymbol{x}_0) / (\lambda_1 - \theta_1)\right]}{(\lambda_2 - \theta_2)(1 - p_1)} \tag{9}$$

3. Синтез системы следящего управления ориентацией

Во-первых, мы предлагаем функция предустановленной производительности:

$$\rho_i(t) = \begin{cases} c_i\left[\left(\rho_{0i} - \frac{t}{T_i}\right)\exp\left(1 - \frac{T_i}{T_i - t}\right) + \rho_{Ti}\right], & t \in [0, T_i) \\ c_i\rho_{Ti}, & t \in [T_i, +\infty) \end{cases} \quad (10)$$

где $T_i > 0, i = 1,2$ — заданное время регулировки; $\rho_{0i} \geq 1, \rho_{Ti} > 0, c_i > 0, i = 1,2$.

В данной работе с помощью функции заданных показателей качества с конечным временем сходимости ρ_1 формируется динамическое зависящее от времени ограничение для вектора состояния σ_e, обеспечивающее желаемое поведение $0 < \|\sigma_e\| < \rho_1$. Для состояния σ_e сконструирована следующая функция Lyapunov:

$$V_1 = \frac{1}{2}\ln\frac{\rho_1^2}{\rho_1^2 - \sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e} \quad (11)$$

Дифференцируя V_1 по времени, можно получить:

$$\dot{V}_1 = \frac{1}{2}\frac{\rho_1^2 - \sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e}{\rho_1^2}\frac{-\rho_1^2\left(2\rho_1\dot{\rho}_1 - 2\sigma_e^{\mathrm{T}}\dot{\sigma}_e\right)}{\left(\rho_1^2 - \sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e\right)^2} = \delta_1\left(-\frac{\dot{\rho}_1}{\rho_1}\sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e + \frac{1}{4}\sigma_e^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}(\sigma_e)\omega\right) \quad (12)$$

где $\delta_1 = \left(\rho_1^2 - \sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e\right)^{-1}$.

Зададим виртуальное управляющее воздействие ω^* в виде:

$$\omega^* = -4\boldsymbol{K}_1\sigma_e + \frac{4\dot{\rho}_1}{\rho_1\left(1 + \sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e\right)}\sigma_e \quad (13)$$

где $\boldsymbol{K}_1 = \mathrm{diag}(k_{11}, k_{12}, k_{13}), k_{1i} > 0, i = 1,2,3$. Определим виртуальное отклонение отслеживания $\alpha = \omega - \omega^*$, тогда формула (12) может быть представлена следующим образом:

$$\dot{V}_1 = \delta_1\left[-\frac{\dot{\rho}_1}{\rho_1}\sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e + \frac{1}{4}\sigma_e^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}(\sigma_e)(\omega^* + \alpha)\right] = -\boldsymbol{K}_1\delta_1\left(1 + \sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e\right)\sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e + \frac{1}{4}\delta_1\left(1 + \sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e\right)\sigma_e^{\mathrm{T}}\alpha \quad (14)$$

Далее, с использованием функции заданных показателей качества с конечным временем сходимости ρ_2 на виртуальное отклонение слежения α накладывается временно-зависимое ограничение производительности $0 < \|\alpha\| < \rho_2$. Предлагается следующая форма функции Lyapunov:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}\ln\frac{\rho_2^2}{\rho_2^2 - \alpha^{\mathrm{T}}\alpha} \quad (15)$$

Дифференцируя V_2, можно получить:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + \frac{1}{2}\frac{\rho_2^2 - \alpha^{\mathrm{T}}\alpha}{\rho_2^2}\frac{2\rho_2\dot{\rho}_2\left(\rho_2^2 - \alpha^{\mathrm{T}}\alpha\right) - \rho_2^2\left(2\rho_2\dot{\rho}_2 - 2\alpha^{\mathrm{T}}\dot{\alpha}\right)}{\left(\rho_2^2 - \alpha^{\mathrm{T}}\alpha\right)^2} = \dot{V}_1 + \delta_2\left(-\frac{\dot{\rho}_2}{\rho_2}\alpha^{\mathrm{T}}\alpha + \alpha^{\mathrm{T}}\dot{\alpha}\right) \quad (16)$$

где $\delta_2 = \left(\rho_2^2 - \alpha^{\mathrm{T}}\alpha\right)^{-1}$.

На основе формул (6) и (13) можно вывести систему отклонений относительно α следующим образом:

$$\dot{\alpha} = \dot{\omega} - \dot{\omega}^* = \boldsymbol{F} + \boldsymbol{f} + \boldsymbol{J}_0^{-1}\boldsymbol{u} \quad (17)$$

где выражения для $\boldsymbol{F}$ и $\boldsymbol{f}$ следующие:

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{J}_0^{-1}\begin{bmatrix} -\left(\omega + \boldsymbol{C}\Omega_d\right)^{\times}\boldsymbol{J}_0\left(\omega + \boldsymbol{C}\Omega_d\right) + \\ +\boldsymbol{J}_0\left(\omega^{\times}\boldsymbol{C}\Omega_d - \boldsymbol{C}\dot{\Omega}_d\right) \end{bmatrix} - \dot{\omega}^* \quad (18)$$

$$\boldsymbol{f} = \boldsymbol{J}_0^{-1}\begin{bmatrix} -\left(\omega + \boldsymbol{C}\Omega_d\right)^{\times}\Delta\boldsymbol{J}\left(\omega + \boldsymbol{C}\Omega_d\right) + \\ +\Delta\boldsymbol{J}\boldsymbol{J}^{-1}\left(\omega + \boldsymbol{C}\Omega_d\right)^{\times}\boldsymbol{J}\left(\omega + \boldsymbol{C}\Omega_d\right) - \\ -\Delta\boldsymbol{J}\boldsymbol{J}^{-1}\boldsymbol{u} + \left(\boldsymbol{I}_3 - \Delta\boldsymbol{J}\boldsymbol{J}^{-1}\right)\boldsymbol{d} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Тогда формула (16) может быть записана как:

$$\dot{V}_2 = -\boldsymbol{K}_1\delta_1\left(1 + \sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e\right)\sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e + \delta_2\alpha^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{J}_0^{-1}\boldsymbol{u} + \boldsymbol{h} + \boldsymbol{f}\right) - \frac{\gamma^2}{2}\delta_2^2\alpha^{\mathrm{T}}\alpha \quad (20)$$

где $\boldsymbol{h} = \frac{\delta_1}{4\delta_2}\left(1 + \sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e\right)\sigma_e - \frac{\dot{\rho}_2}{\rho_2}\alpha + \boldsymbol{F} + \frac{\gamma^2}{2}\delta_2\alpha, \gamma > 0$.

Нетрудно заметить, что функция $\boldsymbol{f}$ в уравнении (20) включает все элементы системы, содержащие неопределённости и внешние возмущения. Таким образом, $\boldsymbol{f}$ может рассматриваться как обобщённое возмущение системы. На практике обобщённое возмущение $\boldsymbol{f}$ не может быть измерено напрямую. Для решения этой проблемы в данном разделе вводится нелинейный расширенный наблюдатель состояния, предназначенный для оценки обобщённого возмущения.

Допущение.1. Первая производная обобщённого возмущения $\boldsymbol{f}$, обозначаемая как $\boldsymbol{g}(t) = [g_1(t), g_2(t), g_3(t)]^{\mathrm{T}}$, является ограниченной, а $g_i(t), i = 1,2,3$ удовлетворяет неравенству $|g_i(t)| \leq \bar{g}$, где $\bar{g}$ — неизвестная положительная постоянная.

Определим $\boldsymbol{x}_1 = \alpha$, $\boldsymbol{x}_2 = \boldsymbol{f}$, $\boldsymbol{g} = \dot{\boldsymbol{f}}$, тогда уравнение (17) может быть переписано в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}_1 = \boldsymbol{J}_0^{-1}\boldsymbol{u} + \boldsymbol{F} + \dot{\boldsymbol{x}}_2 \\ \dot{\boldsymbol{x}}_2 = \boldsymbol{g} \end{cases} \quad (21)$$

Обозначим выходные переменные наблюдателя как $\boldsymbol{z}_1$ и $\boldsymbol{z}_2$, а отклонения наблюдения $\boldsymbol{e}_1 = \boldsymbol{x}_1 - \boldsymbol{z}_1$ и $\boldsymbol{e}_2 = \boldsymbol{x}_2 - \boldsymbol{z}_2$ соответственно. В данной работе расширенный наблюдатель состояния (ESO) спроектирован в следующей форме:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{z}}_1 = \boldsymbol{J}_0^{-1}\boldsymbol{u} + \boldsymbol{F} + \boldsymbol{z}_2 + a_1\left[\boldsymbol{e}_1 + \mathrm{sig}^{b_1}(\boldsymbol{e}_1)\right] \\ \dot{\boldsymbol{z}}_2 = a_2\left[\boldsymbol{e}_1 + \mathrm{sig}^{b_2}(\boldsymbol{e}_1) + 2\mathrm{sig}^{b_1}(\boldsymbol{e}_1)\right] \end{cases} \quad (22)$$

где $a_1, a_2 > 0, \frac{1}{2} < b_1 < 1, b_2 = 2b_1 - 1$.

Динамика отклонения наблюдателя, соответствующая уравнению (22), выражается следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{e}}_1 = -a_1\left[\boldsymbol{e}_1 + \mathrm{sig}^{b_1}(\boldsymbol{e}_1)\right] + \boldsymbol{e}_2 \\ \dot{\boldsymbol{e}}_2 = -a_2\left[\boldsymbol{e}_1 + 2\mathrm{sig}^{b_1}(\boldsymbol{e}_1) + \mathrm{sig}^{b_2}(\boldsymbol{e}_1)\right] + \boldsymbol{g} \end{cases} \quad (23)$$

Для обеспечения сходимости ESO вводятся новые переменные состояния $\varepsilon_1 = \boldsymbol{e}_1 + \mathrm{sig}^{b_1}(\boldsymbol{e}_1)$ и $\varepsilon_2 = \boldsymbol{e}_2$. Функция $\mathrm{sig}^r(\boldsymbol{x})$ определяется следующим образом:

$$\mathrm{sig}^r(\boldsymbol{x}) = \begin{bmatrix} |\boldsymbol{x}_1|^r \ \mathrm{sign}(\boldsymbol{x}_1) \mid \boldsymbol{x}_2|^r \ \mathrm{sign}(\boldsymbol{x}_2)\cdots \\ \cdots \mid \boldsymbol{x}_n|^r \ \mathrm{sign}(\boldsymbol{x}_n) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \quad (24)$$

Дифференцируя $\varepsilon_i, i = 1,2$, получаем:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_1 = b_1\mathrm{diag}\left(|\boldsymbol{e}_1|^{b_1-1}\right)\dot{\boldsymbol{e}}_1 + \dot{\boldsymbol{e}}_1 \\ \dot{\varepsilon}_2 = -a_2\left[\boldsymbol{e}_1 - 2\mathrm{sig}^{b_1}(\boldsymbol{e}_1) - \mathrm{sig}^{b_2}(\boldsymbol{e}_1)\right] + \boldsymbol{g} \end{cases} \quad (25)$$

Обозначим $\chi = \left[\varepsilon_1^{\mathrm{T}} \quad \varepsilon_2^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}}$, тогда уравнение (25) может быть представлено в следующем виде:

$$\dot{\chi} = \Gamma\boldsymbol{A}_1\chi + \boldsymbol{A}_2\chi + \Lambda \quad (26)$$

где

$$\boldsymbol{A}_1 = \begin{bmatrix} -a_1b_1\boldsymbol{I}_3 & b_1\boldsymbol{I}_3 \\ -a_2\boldsymbol{I}_3 & 0_3 \end{bmatrix}, \boldsymbol{A}_2 = \begin{bmatrix} -a_1\boldsymbol{I}_3 & \boldsymbol{I}_3 \\ -a_2\boldsymbol{I}_3 & 0_3 \end{bmatrix},$$
$$\Gamma = \begin{bmatrix} \mathrm{diag}\left(|\boldsymbol{e}_1|^{b_1-1}\right) & 0_3 \\ 0_3 & \mathrm{diag}\left(|\boldsymbol{e}_1|^{b_1-1}\right) \end{bmatrix}, \Lambda = \begin{bmatrix} 0_3 \\ \boldsymbol{g} \end{bmatrix}.$$

Поскольку параметры a_1, a_2, b_1 являются положительными постоянными, согласно критерию Routh–Hurwitz система (26) является устойчивой. Следовательно, матрица коэффициентов $\boldsymbol{A}_1, \boldsymbol{A}_2$ в уравнении (26) является матрицей Hurwitz. Таким образом, для любой заданной положительно определённой матрицы $\boldsymbol{Q} \in \mathbb{R}^{6\times6}$ существует положительно определённая матрица $\boldsymbol{P} \in \mathbb{R}^{6\times6}$, удовлетворяющая следующему уравнению Lyapunov:

$$\boldsymbol{A}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P} + \boldsymbol{P}\boldsymbol{A}_i = -\boldsymbol{Q}_i, i = 1,2 \quad (27)$$

Рассмотрим функцию Lyapunov:

$$V_0 = \chi^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\chi \quad (28)$$

Дифференцируя её по времени, получаем:

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 &= \dot{\chi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\chi + \chi^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\dot{\chi} \\ &= \chi^{\mathrm{T}}\Gamma\left(\boldsymbol{A}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P} + \boldsymbol{P}\boldsymbol{A}_1\right)\chi + \chi^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{A}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P} + \boldsymbol{P}\boldsymbol{A}_2\right)\chi + 2\chi^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\Lambda \\ &\le -e_{\max}^{b_1-1}\lambda_{\min}(\boldsymbol{Q}_1)\|\chi\|^2 - \lambda_{\min}(\boldsymbol{Q}_2)\|\chi\|^2 + 2\chi^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\Lambda \end{aligned} \quad (29)$$

где $e_{\max} = \max\{|e_{1i}|, i = 1,2,3\}$, обозначим $\lambda_{\min}(\boldsymbol{Q}_i), i = 1,2$ как минимальное собственное значение матрицы $\boldsymbol{Q}_i$.

Теорема 1. Для системы (26) существуют параметры проектирования $a_1, a_2, b_1 > 0$, при которых состояние системы χ входит в окрестности нуля за конечное время T_e, задаваемую множеством:

$$\mathcal{D}_e = \{\chi \in \mathbb{R}^6 \mid \theta_1 V^{\iota_1-\iota_2}(\chi) + \theta_2 V^{1-\iota_2}(\chi) < \lambda_3\} \quad (30)$$

где

$$\begin{cases} \lambda_1 = \lambda_{\min}(\boldsymbol{Q}_1)\lambda_{\max}^{-\frac{3}{2}+\frac{1}{2b_1}}(\boldsymbol{P}), \lambda_2 = \lambda_{\min}(\boldsymbol{Q}_2)\lambda_{\max}^{-1}(\boldsymbol{P}), \\ \lambda_3 = 2\sqrt{3}\bar{g}\lambda_{\min}^{-\frac{1}{2}}(\boldsymbol{P})\|\boldsymbol{P}\|, \\ \iota_1 = \frac{3}{2} - \frac{1}{2b_1}, \iota_2 = \frac{1}{2}, 0 < \theta_i < \lambda_i, i = 1,2. \end{cases}$$

Кроме того, конечное время T_e удовлетворяет следующему условию:

$$T_e \le \frac{\ln\left[1 + (\lambda_2 - \theta_2)V(\chi_0)^{1-\iota_1} / (\lambda_1 - \theta_1)\right]}{(\lambda_2 - \theta_2)(1 - \iota_1)} \quad (31)$$

Доказательство. Согласно допущение 1, $\|\boldsymbol{g}\| \le \sqrt{3}\bar{g}$. Отсюда следует:

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 &\le -e_{\max}^{b_1-1}\lambda_{\min}(\boldsymbol{Q}_1)\|\chi\|^2 - \lambda_{\min}(\boldsymbol{Q}_2)\|\chi\|^2 + \\ &+ 2\sqrt{3}\bar{g}\|\chi\|\|\boldsymbol{P}\| \end{aligned} \quad (32)$$

На основании $e_{\max} \le \boldsymbol{e}_1 \le \|\chi\|^{\frac{1}{b_1}}, \forall b_1 \in \left(\frac{1}{2}, 1\right)$ и $\lambda_{\max}^{-1}(\boldsymbol{P})V_0 \le \|\chi\|^2 \le \lambda_{\min}^{-1}(\boldsymbol{P})V_0$, уравнение (32) может быть окончательно представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 &\le -\lambda_{\min}(\boldsymbol{Q}_1)\|\chi\|^{3-\frac{1}{b_1}} - \lambda_{\min}(\boldsymbol{Q}_2)\|\chi\|^2 + 2\sqrt{3}\bar{g}\|\chi\|\|\boldsymbol{P}\| \\ &\le -\lambda_{\min}(\boldsymbol{Q}_1)\lambda_{\max}^{-\frac{3}{2}+\frac{1}{2b_1}}(\boldsymbol{P})V_0^{\frac{3}{2}-\frac{1}{2b_1}} - \lambda_{\min}(\boldsymbol{Q}_2)\lambda_{\max}^{-1}(\boldsymbol{P})V_0 \\ &+2\sqrt{3}\bar{g}\lambda_{\min}^{-\frac{1}{2}}(\boldsymbol{P})\|\boldsymbol{P}\|V_0^{\frac{1}{2}} = -\lambda_1V_0^{\iota_1} - \lambda_2V_0 + \lambda_3V_0^{\iota_2} \end{aligned} \quad (33)$$

Согласно лемме 1, состояния системы (26) сходятся в ограниченную окрестность $\mathcal{D}_e$ нуля за конечное время T_e.

Разработанный в настоящей работе регулятор с заданными показателями качества и конечным временем сходимости (Finite-Time Prescribed Performance Controller, FTPPC) может быть спроектирован следующим образом:

$$\boldsymbol{u} = -\boldsymbol{J}_0\left(\boldsymbol{K}_2\alpha + \boldsymbol{h} + \boldsymbol{z}_2\right) \tag{34}$$

где $\boldsymbol{K}_2 = \mathrm{diag}\left(k_{21}, k_{22}, k_{23}\right), k_{2i} > 0, i = 1,2,3.$

Теорема 2. Под воздействием регулятора с заданными показателями качества и конечным временем сходимости (34), основанного на ESO (22), система ошибок отслеживания ориентации космического аппарата (6), учитывающая неопределённости параметров тензора инерции и внешние возмущения, достигает следующих двух целей управления: 1) Нормы отклонения MRP σ_e и виртуальной отклонения слежения α ограничены временно-зависимыми множествами $\rho_i(t), i = 1,2$, заданными предписанными функциями производительности $\mathcal{B}_i, i = 1,2.$

$$\mathcal{B}_1 = \left\{\left\|\sigma_e\right\| \in \mathbb{R} \mid \left\|\sigma_e\right\| < \rho_1\right\},\ \mathcal{B}_2 = \left\{\left\|\alpha\right\| \in \mathbb{R} \mid \left\|\alpha\right\| < \rho_2\right\}.$$

2) Существует константа $\mu_i > 0, i = 1,2$, такая что отклонение MRP σ_e и отклонение угловой скорости ω сходятся к нулю за заранее заданное конечное время $t \in \left(0, +\infty\right). \left\|\sigma_e\right\| \le \mu_1, \left\|\omega\right\| \le \mu_2, \forall t \ge T.$

Доказательство. Подставляя регулятор (34) в уравнение (20), получаем:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_2 &= -\boldsymbol{K}_1\delta_1\left(1 + \sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e\right)\sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e - \boldsymbol{K}_2\delta_2\alpha^{\mathrm{T}}\alpha - \\
&-\frac{\gamma^2}{2}\delta_2^2\alpha^{\mathrm{T}}\alpha + \delta_2\alpha^{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}_2 \le \\
&\le -\boldsymbol{K}_1\delta_1\left(1 + \sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e\right)\sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e - \boldsymbol{K}_2\delta_2\alpha^{\mathrm{T}}\alpha + \frac{1}{2\gamma^2}\boldsymbol{e}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}_2 \le \\
&\le -k_1\delta_1\sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e - k_2\delta_2\alpha^{\mathrm{T}}\alpha + \frac{1}{2\gamma^2}\boldsymbol{e}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}_2 \le \\
&\le -k_1\delta_1\sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e - k_2\delta_2\alpha^{\mathrm{T}}\alpha + \eta
\end{aligned} \tag{35}$$

где $k_i = \min\left\{k_{ij}, j = 1,2,3\right\}, i = 1,2, \eta = \frac{v}{2\gamma^2} > 0.$

На основании неравенств $\ln\frac{\rho_1^2}{\rho_1^2 - \sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e} \le \delta_1\sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e$ и $\ln\frac{\rho_2^2}{\rho_2^2 - \alpha^{\mathrm{T}}\alpha} \le \delta_2\alpha^{\mathrm{T}}\alpha$, уравнение (35) может быть записано в следующем виде:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_2 &\le -k_1\ln\frac{\rho_1^2}{\rho_1^2 - \sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e} - k_2\ln\frac{\rho_2^2}{\rho_2^2 - \alpha^{\mathrm{T}}\alpha} + \eta \le \\
&\le -kV_2 + \eta
\end{aligned} \tag{36}$$

где $k = \min\left\{2k_i, i = 1,2\right\}$. Из уравнения (36) следует $V_2\left(t\right) \le e^{-kt}V_2\left(0\right) + \frac{\eta}{k}\left(1 - e^{-kt}\right)$, откуда видно, что верхняя граница функции V_2 удовлетворяет $\limsup_{t\to\infty} V_2(t) \le \frac{\eta}{k}$, и, следовательно, получаем:

$$\begin{cases}
\limsup_{t\to\infty}\left\|\sigma_e\right\| \le \rho_1\sqrt{1 - e^{-2\eta/k}} \\
\limsup_{t\to\infty}\left\|\alpha\right\| \le \rho_2\sqrt{1 - e^{-2\eta/k}}
\end{cases} \tag{37}$$

Из уравнения (37) видно, что под действием регулятора замкнутая система (6) достигает цели 1) из Теоремы 2. Далее, обозначим $T_3 = \max\left\{T_1, T_2\right\}$, согласно уравнению (37) получаем:

$$\begin{cases}
\left\|\sigma_e\right\| \le \rho_{T1}\sqrt{1 - e^{-2\eta/k}} = \mu_1, \quad \forall t \ge T_3 \\
\left\|\alpha\right\| \le \rho_{T2}\sqrt{1 - e^{-2\eta/k}} = v_1, \quad \forall t \ge T_3
\end{cases} \tag{38}$$

Отклонение угловой скорости ω удовлетворяет следующему неравенству:

$$\begin{aligned}
\left\|\omega\right\| &\le \left|-4\bar{k}_1 + \frac{4\dot{\rho}_1}{\rho_1\left(1 + \sigma_e^{\mathrm{T}}\sigma_e\right)}\right|\mu_1 + v_1 \le \left|-4\bar{k}_1\right|\mu_1 + v_1 \\
&= \left(4\bar{k}_1\rho_{T1} + \rho_{T2}\right)\sqrt{1 - e^{-2\eta/k}} = \mu_2, \forall t \ge T_3
\end{aligned} \tag{39}$$

где $\bar{k}_1 = \max\left\{k_{1i}, i = 1,2,3\right\}$. Из уравнений (38) и (39) видно, что под действием регулятора (34) все состояния замкнутой системы сходятся за заранее заданное конечное время. Таким образом, цель 2) из Теоремы 2 достигается.

4. Результат

Рассмотрим жёсткий космический аппарат с номинальной матрицей инерции [8]:

$$\boldsymbol{J}_0 = \begin{bmatrix} 20 & 1.2 & 0.9 \\ 1.2 & 17 & 1.4 \\ 0.9 & 1.4 & 15 \end{bmatrix} \mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^2 \tag{40}$$

Неопределённость задаётся

$$\Delta\boldsymbol{J} = \mathrm{diag}\left(\sin\left(0.1t\right), 2\sin\left(0.2t\right), 3\sin\left(0.3t\right)\right)\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^2,$$

внешнее периодическое возмущение предполагается следующим образом:

$$\boldsymbol{d}\left(t\right) = \begin{bmatrix} 1 + 5\cos\left(0.1t\right), 2 + 5\cos\left(0.2t\right), \\ 1 - 5\sin\left(0.1t\right) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \times 10^{-4}\mathrm{N}\cdot\mathrm{m} \tag{41}$$

Начальное угловое положение $\sigma\left(0\right) = \left[-0.1579, 0.1368, 0.0947\right]^{\mathrm{T}}$, а начальная угловая скорость $\Omega\left(0\right) = \left[0,0,0\right]^{\mathrm{T}}\mathrm{rad/s}$. Заданное угловое положение составляет

$$\sigma_d(t) = 0.01\left[\cos(0.2t), \sin(0.3t), \sin(0.4t)\right]^T.$$

Кроме того, начальные значения наблюдателя расширенного состояния (ESO) предполагаются равными $\boldsymbol{z}_i = \left[0.01, 0.01, 0.01\right]^T, i = 1,2$. Параметры ESO выбраны следующим образом: $a_1 = 2, a_2 = 0.5, b_1 = 0.8, b_2 = 0.6$.

Параметры регулятора (34) выбраны следующим образом:

$$\boldsymbol{K}_1 = \mathrm{diag}(0.04, 0.04, 0.04),$$
$$\boldsymbol{K}_2 = \mathrm{diag}(0.45, 0.45, 0.45), \gamma = 0.01'$$

предустановленные параметры времени:

$$\rho_{01} = \rho_{02} = 1, \rho_{T1} = \rho_{T2} = 0.001,$$
$$c_1 = c_2 = 0.3, T_1 = T_2 = 15.$$

Далее проводится сравнение предложенного в данной работе регулятора с регулятором с фиксированным временем сходимости (Fixed-Time Controller, FTC), представленным в работе Zou et al. [2]. Результаты моделирования показаны на рис. 1–4.

Из рис. 1 и 2 видно, что под действием регулятора FTPPC время сходимости MRP и угловой скорости космического аппарата не превышает 15 секунд, тогда как при использовании регулятора FTC сходимость достигается примерно за 20 секунд и сопровождается большим перерегулированием.

Кроме того, как видно из рис. 3, максимальный управляющий момент регулятора FTPPC немного меньше, чем у регулятора FTC. На основе вышеуказанных результатов моделирования можно сделать вывод, что регулятор FTPPC способен успешно выполнять задачу слежения за ориентацией жёсткого космического аппарата с неопределёнными параметрами тензора инерции и внешними возмущениями в течение заданного времени установления, обеспечивая при этом меньший управляющий момент, меньшее перерегулирование и более высокую точность отслеживания.

5. Заключение

В работе разработан метод следящего управления ориентацией жёсткого космического аппарата при неопределённости параметров тензора инерции и воздействии внешних возмущений. Функции заданных показателей качества с конечным временем сходимости формируют допустимые границы переходных и установившихся ошибок. На основе метода бэкстеппинга и барьерных функций Ляпунова синтезирован регулятор, обеспечивающий нахождение ошибки ориентации и виртуальной ошибки внутри заданных границ. Расширенный наблюдатель состояния обеспечивает практиче-

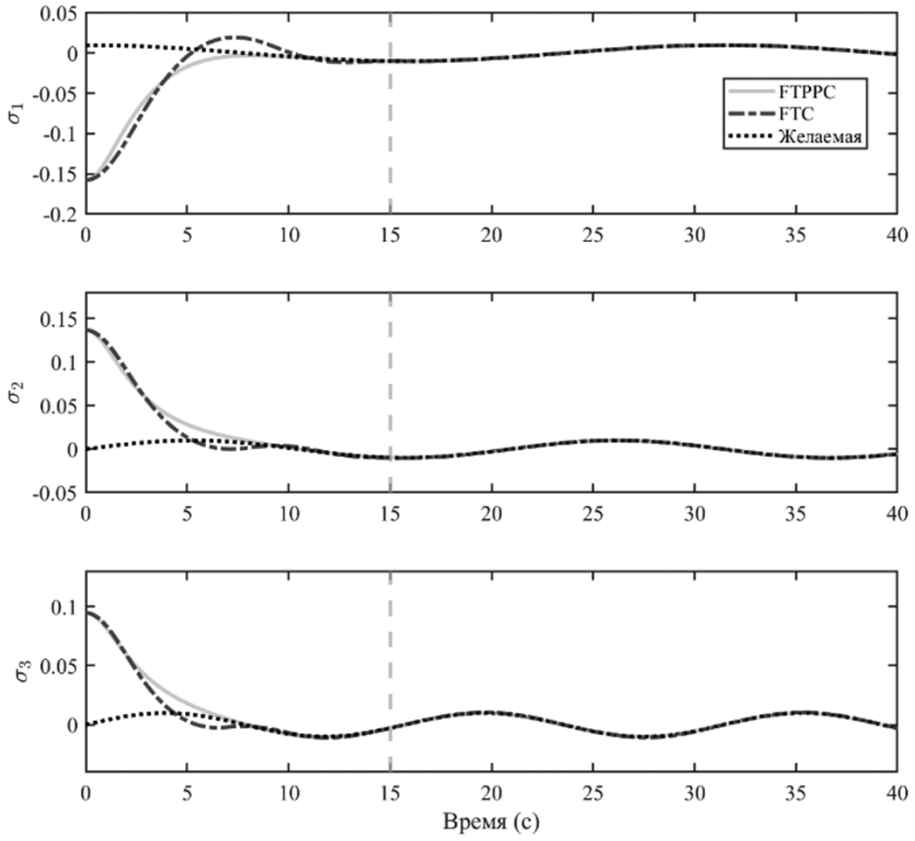


Рис. 1. Отслеживание ориентации космического аппарата в параметрах MRP

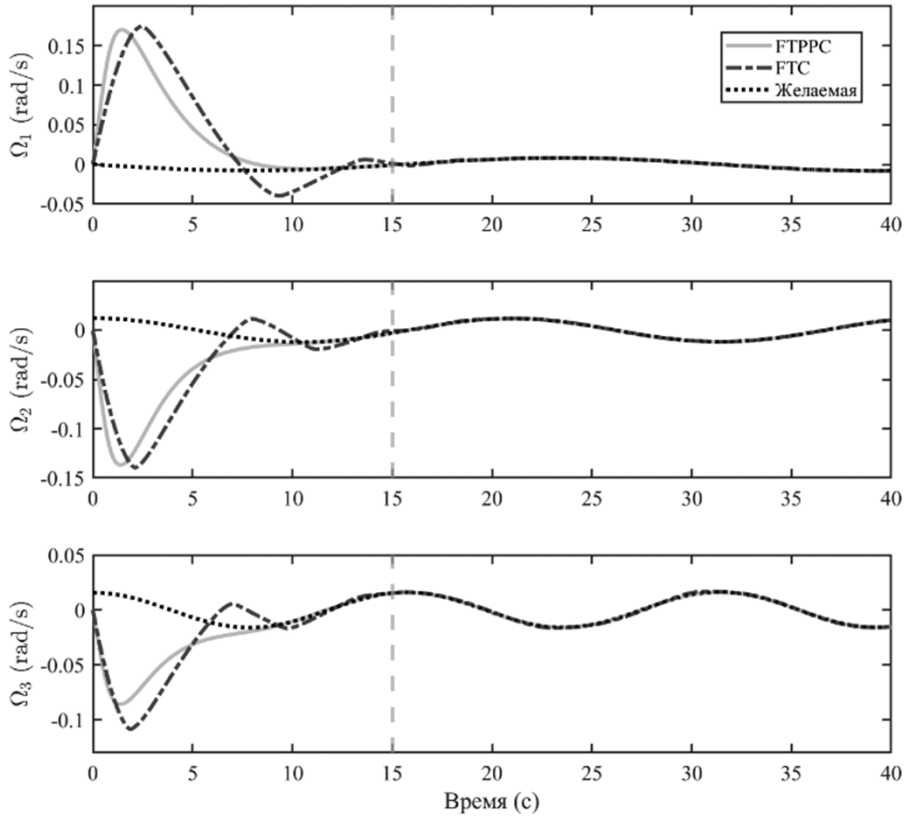


Рис. 2. Отслеживание угловой скорости космического аппарата

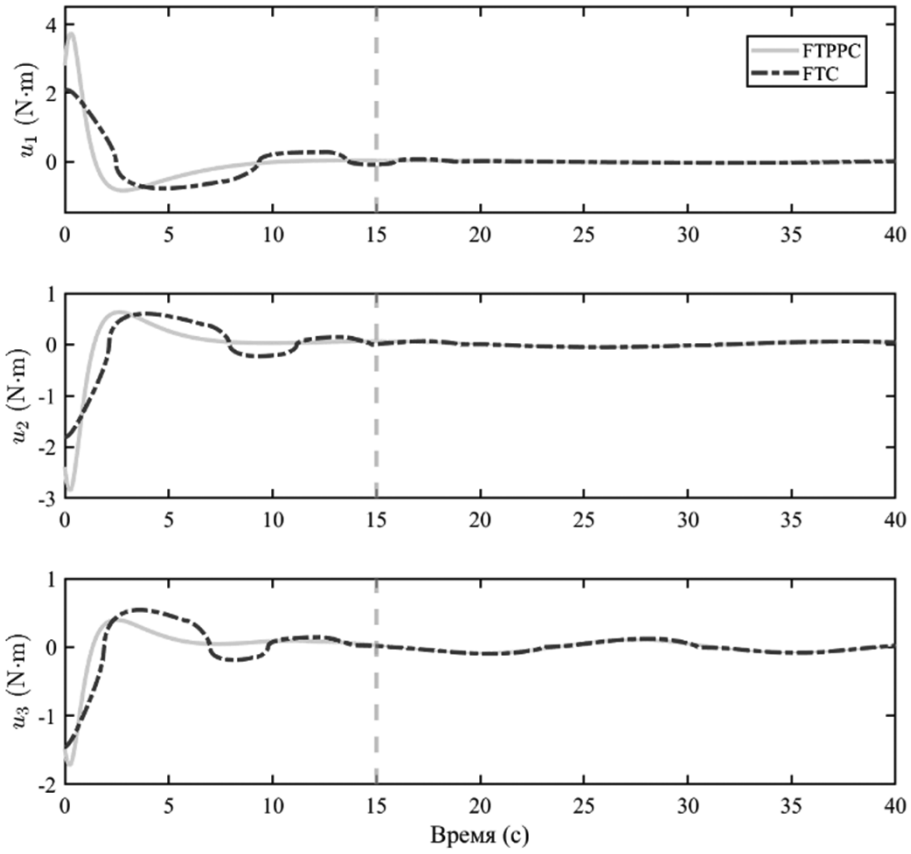


Рис. 3. Сравнение управляющих моментов регуляторов FTPPC и FTC

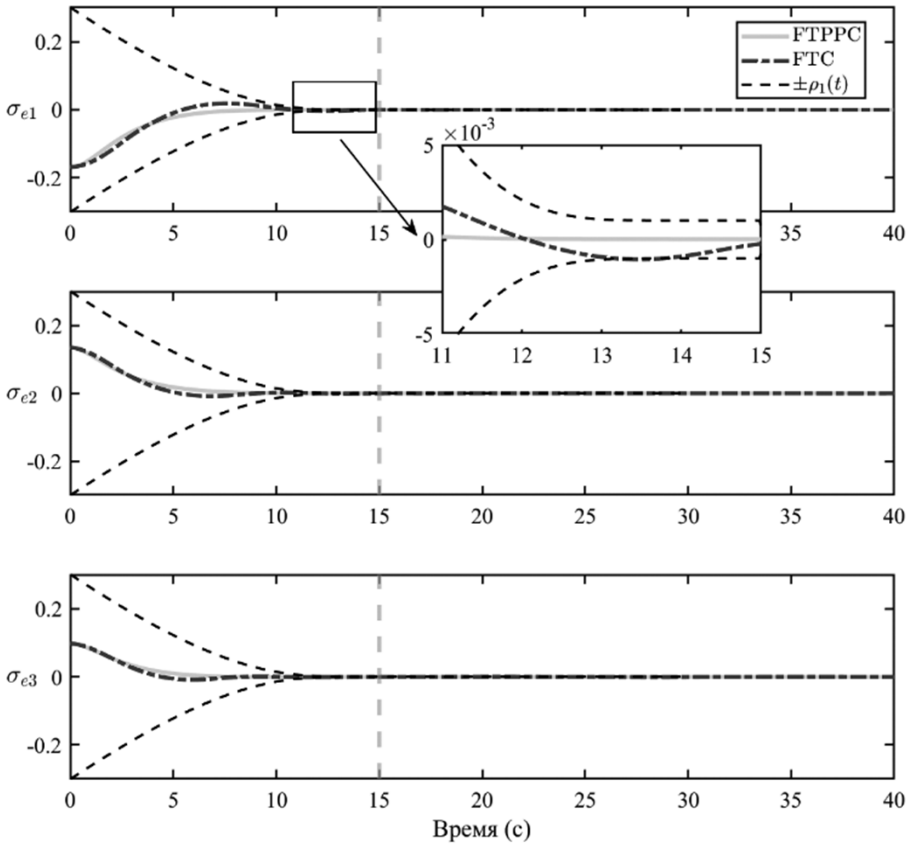


Рис. 4. Сравнение ошибок ориентации в параметрах MRP для регуляторов FTPPC и FT

ское оценивание суммарного возмущения за конечное время и используется для его компенсации в законе управления. Результаты моделирования показывают, что по сравнению с регулятором с фиксированным временем сходимости предложенный FTPPC обеспечивает меньшее перерегулирование, меньший максимальный управляющий момент и более высокую точность отслеживания при заданном времени установления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gao S., Liu X., Jing Y., Dimirovski G. M. A novel finite-time prescribed performance control scheme for spacecraft attitude tracking // Aerospace Science and Technology. 2021. Т. 118. Ст. 107044.
2. Zou A. M., Kumar K. D., de Ruiter A. H. J. Fixed-time attitude tracking control for rigid spacecraft // Automatica. 2020. Т. 113. Ст. 108792.
3. Ye D., Zou A. M., Sun Z. Predefined-time predefined-bounded attitude tracking control for rigid spacecraft // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2022. Т. 58. № 1. С. 464–472.
4. Yang J., Guo T., Yu Y., Dong Q., Jia Y. Enhanced predefined-time control for spacecraft attitude tracking: A dynamic predictive approach // Sensors. 2024. Т. 24. № 16. Ст. 5127.
5. Kojima H. Backstepping-based steering control for spacecraft attitude control using two-skewed control moment gyroscopes // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2023. Т. 46. № 1. С. 80–96.
6. Du H., Zhang J., Wu D., Zhu W., Li H., Chu Z. Fixed-time attitude stabilization for a rigid spacecraft // ISA Transactions. 2020. Т. 98. С. 263–270.
7. Zhang J., Zhao W., Shen G., Xia Y. Disturbance observer-based adaptive finite-time attitude tracking control for rigid spacecraft // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2021. Т. 51. № 11. С. 6606–6613.
8. Wu Y.-Y., Zhang Y., Wu A.-G. Attitude tracking control for rigid spacecraft with parameter uncertainties // IEEE Access. 2020. Т. 8. С. 38663–38672.
9. Chen R., Wang Z., Che W. Adaptive sliding mode attitude-tracking control of spacecraft with prescribed time performance // Mathematics. 2022. Т. 10. № 3. Ст. 401.
10. Niu Z., Dai M.-Z., Gao J., Zhang C., Wu J. Prescribed performance spacecraft attitude tracking with disturbance observer: A performance-adjustable policy // Advances in Space Research. 2022. Т. 70. № 8. С. 2357–2368.
11. Zhang X., Zhu Z. H., Xie S., Gao H., Li G. Barrier function-based prescribed-performance adaptive attitude tracking control for spacecraft with uncertainties // Journal of the Franklin Institute. 2023. Т. 360. № 12. С. 8075–8095.

© Ван Цзэюй (Wzy1239054499@yandex.ru); Чжу Лун (zhul0018@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.07

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ ПОДХОДОВ К ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ЗАДАЧ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ДАЛЬНЕМ ГРАНИЧНОМ СЛОЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ ВЫСОКОНАГРУЖЕННОЙ СИСТЕМЫ

EXPERIMENTAL COMPARISON OF TASK DISPATCHING APPROACHES FOR NEURAL NETWORK COMPUTATIONS IN THE FAR EDGE LAYER OF A HETEROGENEOUS HIGH-LOAD SYSTEM

N. Vetoshkin

Summary. The article experimentally compares four approaches to dispatching neural network computation tasks among worker nodes of the far edge layer: Round-Robin, adaptive node selection based on a penalty function, queue control based on Lyapunov optimization, and learning-based node selection in the contextual multi-armed bandit setting. Experiments on scaling, stepwise load change and node failure were carried out on a testbed with a Khadas VIM3 Pro coordinator and ESP32-S3 worker nodes (up to eight). At saturation and under node heterogeneity the adaptive and learning approaches reduce p95 tail latencies by a factor of 1.9–3 compared to Round-Robin without throughput loss; recommendations for choosing a dispatching approach are given.

Keywords: edge computing, distributed system, task dispatching, neural network inference, Lyapunov function, multi-armed bandit, tail latency.

Ветошкин Никита Владимирович
Аспирант, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, г. Москва
nikita@vetoshkin.info

Аннотация. В работе рассматривается сравнение четырех способов диспетчеризации задач нейросетевого вычисления между рабочими узлами дальнего граничного слоя сети, таких как круговое распределение, адаптивный выбор узла по функции штрафа, управление очередями на основе оптимизации по Ляпунову и обучающийся выбор узла в постановке контекстного многорукого бандита. Серии экспериментов (масштабирование, ступенчатое изменение нагрузки, отказ узла) проведены на экспериментальном стенде, состоящем из одноплатного компьютера Khadas VIM3 Pro и до восьми рабочих узлов на микроконтроллерах ESP32-S3. По результатам экспериментов показано, что при умеренной нагрузке системы подходы практически эквивалентны, а при нагрузке в режиме насыщения и при гетерогенности узлов адаптивные и обучающийся подходы снижают хвостовые задержки p95 в 1,9–3 раза относительно кругового распределения без потери пропускной способности. По итогам даны рекомендации по выбору подхода.

Ключевые слова: граничные вычисления, распределённая система, диспетчеризация задач, нейросетевые вычисления, функция Ляпунова, многорукий бандит, хвостовые задержки.

Введение

Экстенсивный рост глобальных моделей искусственного интеллекта на базе крупных центров обработки данных порождает проблемы пропускной способности каналов связи, безопасности и юридических ограничений на передачу чувствительных данных. Эти проблемы может решить размещение вычислений искусственного интеллекта на дальнем граничном слое, вблизи источника данных [1], однако такие решения сопряжены с ограниченностью ресурсов узлов и нестабильностью сети. При высоких нагрузках требуются алгоритмы, поддерживающие уровень качества обслуживания при деградации узлов, росте сетевых задержек и отказах. Качество работы такой системы определяется не столько средним временем обработки, сколько поведением наиболее медленных задач: его описывают квантили $p95$ и $p99$ — значения задержки, не превышаемые для 95 % и 99 % задач соответственно [2].

В обзорных статьях по граничному искусственному интеллекту утверждается, что время обработки задачи и стабильность показателей задержек зависят от процесса организации таких вычислений, а также от расходов на коммуникацию между устройствами [1, 3]. Так, для моделей на микроконтроллерах применяются среды исполнения, например TensorFlow Lite Micro [4]. Балансировка задач в гетерогенных системах и организация распределенных вычислений на базе облачных, туманных, граничных архитектур активно рассматриваются и в отечественных работах [5, 6]. Однако сравнение законов диспетчеризации на реальном стенде маломощных граничных устройств в указанных работах не проводится.

При приближении к насыщению растут не только средние задержки, но и хвостовые, особенно $p95$/$p99$ [2, 7]. Для управления нагрузкой применяются методы на основе функций Ляпунова (Drift-Plus-Penalty [8]) и об-

учающиеся методы выбора [9], для которых критично корректное определение функции награды.

Работа является продолжением предыдущей публикации об архитектуре дальнего граничного слоя гетерогенной распределенной системы [10]. Цель работы — экспериментально сравнить подходы к диспетчеризации задач нейросетевых вычислений в гетерогенной системе граничных устройств в условиях высокой нагрузки, динамического изменения входного потока задач и отказов. Выбор узла рассматривается как управляющее воздействие, а нагрузка, ошибки и ожидания — как состояния и возмущения системы.

Материалы и методы

Экспериментальный стенд, представленный на рисунке 1, состоит из узла координатора и рабочих узлов. Координатор — одноплатный компьютер Khadas VIM3 Pro, который выполняет роль диспетчера: получение потока задач (изображений дорожных знаков для классификации), выбор узла согласно подходу диспетчеризации, контроль метрик и таймаутов, повторные отправки, сбор измерений по каждой задаче. Рабочие узлы — микроконтроллеры ESP32-S3 выполняют следующие функции: принимают задания, отправляют результат и сообщают координатору свои метрики и состояние; количество узлов доходит до 8. Обмен между координатором и узлами идёт при помощи локального канала беспроводной сети Wi-Fi 2,4 ГГц через постоянное двунаправленное соединение (WebSocket), по которому передаются задания, результаты вычислений, метрики узлов и признаки их доступности. В каждый рабочий узел загружена нейросетевая модель (среда TensorFlow Lite Micro, вход 48×48×1, 4 класса дорожных знаков), преобразующая входной тензор в вероятностные метки класса. Задача нейросетевого вычисления подробно описана в предыдущей статье [10]. Точность классификации выступает только в качестве контроля корректности работы модели. Во всех экспериментах она составила 98,3 %. На каждом узле одновременно обслуживается не более 2 задач; таймаут одной исполняемой задачи составляет 10 с.

Метрики можно разделить на две основные группы. Первая группа — метрики задач, такие как полная задержка обработки (от создания задачи на координаторе до получения ответа от рабочего узла), сетевое время обмена, время вычисления модели на узле, время ожидания отправки. Вторая группа — агрегированные показатели: квантили $p50$, $p95$, $p99$; пропускная способность (успешные задачи в секунду); повторные попытки; коэффициент вариации распределения задач между узлами; показатели восстановления после отказа; таймауты и ошибки. Первичные измерения сохраняются вместе с файлами конфигурации, что обеспечивает воспроизводимость экспериментов.

Круговое распределение (Round-Robin) — базовый алгоритм, в котором выбор узла не зависит от состояния системы, а определяется заранее известным правилом чередования; рассматривается как эталонная схема для сравнения. Правило назначения задач записывается как

$$i(j) = \big((j-1)\bmod N\big) + 1, \qquad (1)$$

где $i(j)$ — индекс узла для j-й задачи, N — число узлов. Узлы, признанные координатором недоступными или полностью занятые (заняты оба слота обслуживания задач), пропускаются: выбор ведется из множества доступных узлов $Na(t) \subseteq N$. Это система с открытым контуром, без обратной связи: в гетерогенной системе алгоритм не адаптируется к деградации узла, что приводит к росту полной задержки и показателей $p95$, $p99$.

Адаптация по оценке качества узла — метод с обратной связью: для каждого узла вычисляется функция штрафа, характеризующая то, насколько не нужно направлять данному узлу задачи. Координатор выбирает узел с минимальным штрафом, поэтому ухудшение



Рис. 1. Архитектурная схема стенда: координатор и рабочие узлы, замкнутые обратной связью по метрикам качества обслуживания

параметров узла ведет к уменьшению доли направляемых на него задач. Для подавления шумов измерения сглаживаются экспоненциальным скользящим средним. Функция штрафа формируется по сглаженным показателям:

$$S_i(t) = \hat{s}_i(t) + \alpha_{rtt}\tilde{t}_i^{net}(t) + \beta_{err}\tilde{e}_i(t)p_{err}, \quad (2)$$

где $\hat{s}_i(t)$ — оценка времени обслуживания узла, $\tilde{t}_i^{net}(t)$ — сглаженное сетевое время, $\tilde{e}_i(t)$ — частота ошибок и таймаутов, p_{err} — штраф за ошибки, α_{rtt}, β_{err} — веса. В методе выбирается узел с минимальным $S_i(t)$ среди доступных. В экспериментах $\alpha_{rtt} = 1{,}0$; $\beta_{err} = 1{,}0$; $p_{err} = 1000$ мс, коэффициент сглаживания 0,45. Метод чувствителен к весам и может ухудшать равномерность распределения нагрузки ради задержек.

Стохастическое управление очередями (Drift-Plus-Penalty) рассматривает диспетчеризацию как управление динамической системой при возмущениях: состояние узла $Q_i(t)$ — накопленная нагрузка (число обслуживаемых и ожидающих задач), устойчивость системы характеризуется квадратичной функцией Ляпунова $L(Q)=1/2\sum Q_i^2$, неограниченный рост которой означает перегрузку.iМетод совместно минимизирует ожидаемый рост накопленной нагрузки (дрейф функции Ляпунова) и штраф качества обслуживания [8]. Правило выбора узла имеет вид

$$i^*(t) = \arg\min_{i\in\mathcal{N}a(t)} \left(Q_i(t)\hat{s}_i(t) + V\hat{p}_i(t)\right) \quad (3)$$

где $\hat{s}_i(t)$ — оценка времени обслуживания, $\hat{p}_i(t)$ — штраф качества (тот же, что в методе оценки узла), $V > 0$ — параметр компромисса между устойчивостью и качеством. В экспериментах $V = 0{,}35$, что приоритизирует стабилизацию очередей. Учет состояния $Q_i(t)$ позволяет избегать перегруженных узлов и сдерживать рост задержек при приближении к насыщению.

Обучающийся выбор узла основан на контекстной задаче многорукого бандита: правило выбора не задается явно, а формируется из накопленного опыта. В момент времени t наблюдается контекст x_t (время вычисления на узлах, задержки, частоты ошибок, загрузка, доступность), выбирается действие $a_t \in Na(t)$, после чего рассчитывается награда

$$r_t = -\left(\lambda_1 f(D_t) + \lambda_2 E_t + \lambda_3 R_t\right),\ f(D) = D^{1,5}, \quad (4)$$

где D_t — полная задержка задачи, $E_t \in \{0, 1\}$ — признак ошибки или таймаута, R_t — сетевое время, λ_k — веса. Функция $f(D) = D^{1,5}$ усиливает штраф за хвостовые задержки, что ориентирует обучение на подавление неблагоприятных случаев обслуживания. Баланс исследования (пробных назначений на узлы с неопределённой оценкой) и эксплуатации обеспечивает томпсоновское выборочное моделирование: ожидаемая награда узла моделируется линейно по контексту, на каждом шаге из апостериорного распределения параметров берется случайная выборка, и задача назначается узлу с максимальным прогнозом награды. В экспериментах ($\lambda_1 = 1{,}0$; $\lambda_2 = 2000$; $\lambda_3 = 1{,}2$) первые 50 задач распределяются круговым правилом распределения (разогрев). История забывается экспоненциально с коэффициентом 0,999.

Сценарии экспериментов

Параметры конфигурации системы и таймаутов во всех запусках одинаковы. Каждая конфигурация выполнялась трижды ($n = 3$), примерно по 4500–5000 задач за прогон. Показатели в результатах отображаются как средние по повторам, для ключевых величин дополнительно указано стандартное отклонение. Серия A (масштабирование): число узлов $N \in \{1, 2, 4, 8\}$, прогон 60 с, интенсивность входящего потока (N, λ) = (1, 3), (2, 6), (4, 10), (8, 20) задач/с для умеренной нагрузки и (1, 5), (2, 12), (4, 24), (8, 48) задач/с для нагрузки, близкой к насыщению. Каждая конфигурация выполнялась в двух сценариях — однородном и гетерогенном. В гетерогенный один узел деградируется искусственно добавлением задержки обработки +800 мс (производительность узла снижается примерно до 1 задачи/с). Серия B (ступенчатая нагрузка): 8 узлов, прогон 120 с, ступени входящей нагрузки на систему 20, 36, 48 и 56 задач/с по 30 с. Последняя ступень соответствует загрузке около 99 % суммарной обслуживающей способности (насыщение). Серия C (отказ узла): 8 узлов, входящий поток 42 задачи/с, прогон 120 с. На 45-й секунде один из узлов исключается до конца прогона, далее фиксируются показатели до и после отказа.

Результаты

Серия A — масштабирование. Показатели задержки $p95$ при нагрузке системы, близкой к насыщению, представлены в таблице 1. При рассмотрении результатов в рамках умеренной нагрузки пропускная способность во всех конфигурациях приблизительно совпадает с заданной интенсивностью входного потока, показатель задержки $p95$ в однородном сценарии составляет от 0,24 до 0,37 с, независимо от метода диспетчеризации. Но при нагрузке системы в режиме, близком к состоянию насыщения, в однородном сценарии пропускная способность следует за входным потоком (5,0; 11,9–12,0; 23,9; 47,4–47,9 задач/с при $N = 1, 2, 4, 8$), показатель задержки $p95$ возрастает и находится в диапазоне от 0,40 до 1,05 с, различия между подходами перекрываются разбросом повторов. В гетерогенном сценарии деградированный узел существенно снижает суммарную обслуживающую способность системы по обработке

задач. При $N = 2$ система переходит в устойчивую перегрузку (от 8,0 до 8,2 задач/с при потоке 12 задач/с, $p95$ = 42–48 с), при $N = 4$ обслуживается примерно 87 % потока ($p95$ от 13,6 до 13,9 с) — в режиме перегрузки закон диспетчеризации не способен компенсировать дефицит обслуживающей способности, и задержки всех подходов практически совпадают. При $N = 8$ система близка к насыщению, но не перегружена (45,2–45,6 задач/с), в этом режиме $p95$ составляет от 4,4 до 5,6 с, наименьшие значения оказались у оптимизации по Ляпунову.

Таблица 1.

Полная задержка $p95$ (с) при нагрузке системы, близкой к насыщению (серия A, среднее по $n = 3$)

Режим	Подход	N = 1	N = 2	N = 4	N = 8
Однородный	Круговое	0,30	0,49	0,42	0,47
	Оценка узла	0,25	0,40	0,66	0,40
	Ляпунов	0,25	0,94	0,50	0,60
	Обучающийся	0,25	0,64	1,05	0,45
Гетерогенный	Круговое	0,28	47,99	13,91	5,58
	Оценка узла	0,27	45,44	13,62	5,34
	Ляпунов	0,30	45,17	13,85	4,42
	Обучающийся	0,34	42,25	13,82	5,32

Наиболее информативным оказался гетерогенный сценарий при умеренной нагрузке, когда все еще есть запас обслуживающей способности у системы. Круговое распределение назначает деградированному узлу ту же долю задач, что и работоспособным, и его $p95$ определяется временем обработки на деградированном узле и составляет от 1,01 до 1,06 с при $N = 2, 4, 8$. Подходы с обратной связью подавляют назначения на деградированный узел. Методы оценки качества узла и оптимизации по Ляпунову дают $p95$ от 0,27 до 0,55 с, то есть показатели почти в 3 раза ниже, при той же пропускной способности (по сравнению с круговым распределением). Обучающийся выбор занимает промежуточное положение от 0,63 до 1,05 с, так как за период прогона лишь частично исключает деградированный узел. Коэффициент вариации распределения задач у адаптивных подходов (с наличием обратной связи) закономерно выше (от 0,28 до 0,94 против от 0,12 до 0,39 у кругового распределения), неравномерность здесь выступает как средство улучшения качества обслуживания.

Серия B — ступенчатая нагрузка. Сводные значения задержки $p95$ представлены в таблице 2, график динамики задержки $p95$ от времени в однородном режиме представлен на рисунке 2. На входящих нагрузках 20, 36 и 48 задач/с пропускная способность следует за интенсивностью входного потока во всех подходах, показатель $p95$ находится в диапазоне от 0,29 до 0,52 с. При нагрузке 56 задач/с, в режиме насыщения, пропускная способность ограничивается функциональной ёмкостью системы и составляет 50,7–52,2 задач/с для всех подходов. Однако $p95$ монотонно нарастает при такой нагрузке вследствие накопления очереди. На рисунке 2 этот эффект демонстрируется: 4,30 ± 2,49 с у кругового распределения против от 2,25 до 2,75 с у адаптивных методов. У показателей p99 порядок тот же (8,8 с против от 4,2 до 5,5 с). В режиме насыщения подходы с обратной связью снижают хвостовые задержки в 1,6–1,9 раза при схожей пропускной способности.

В гетерогенном сценарии на ступенях 20 и 36 задач/с подтверждается эффект серии A, с демонстрацией лучших значений у адаптивных методов по сравнению с круговым распределением. При входной нагрузке в 56 задач/с гетерогенная система перегружена, и $p95$ всех подходов сближается к значениям от 5,6 до 6,1 с.

Таблица 2.

Полная задержка $p95$ (мс) по ступеням нагрузки (серия B, среднее по n = 3; для 56 задач/с — среднее ± стандартное отклонение).

Режим	Подход	20 задач/с	36 задач/с	48 задач/с	56 задач/с
Однородный	Круговое	377	304	520	4297 ± 2487
	Оценка узла	295	321	452	2403 ± 497
	Ляпунов	299	312	392	2752 ± 1144
	Обучающийся	299	285	379	2245 ± 878
Гетерогенный	Круговое	992	966	700	6063 ± 333
	Оценка узла	332	315	736	5555 ± 269
	Ляпунов	344	338	408	6079 ± 328
	Обучающийся	449	505	557	5841 ± 197

Серия C — отказ узла. Сводные показатели эксперимента представлены в таблице 3, график зависимости показателя задержки $p95$ от времени в гетерогенном режиме представлен на рисунке 3. В однородном сценарии после отказа одного узла входящий поток в 42 задачи/с остается ниже потенциальной пропускной ёмкости семи оставшихся узлов, система работает практически без деградации: пропускная способность от 41,7 до 41,9 задач/с, $p95$ после отказа от 0,33 до 0,59 с, p99 — от 0,60 до 1,29 с. Отказ обнаруживается по разрыву событийного канала, узел исключается из множества доступных. Задачи не были потеряны ни в одном подходе.

В гетерогенном сценарии отказ переводит систему в режим, близкий к насыщению: пропускная ёмкость системы из оставшихся узлов (шесть работоспособных и один деградированный) лишь незначительно пре-

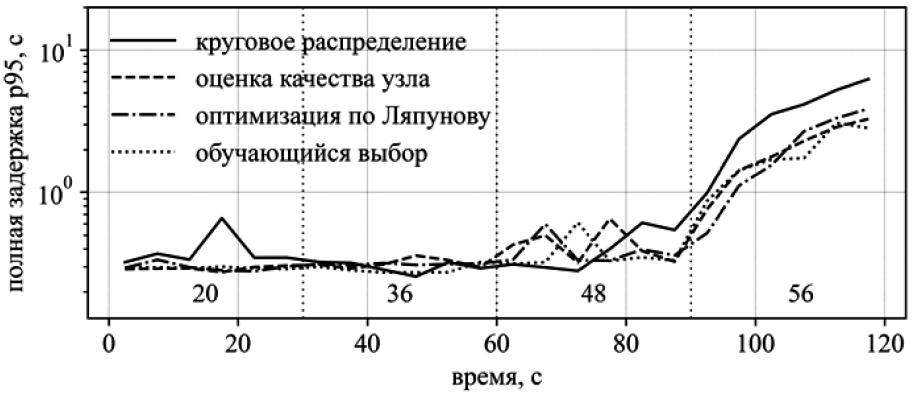


Рис. 2. Полная задержка *p*95 в серии B (однородный сценарий, логарифмическая шкала)

Таблица 3.
Метрики серии C: пропускная способность (задач/с) и задержки (с); среднее по n = 3, для *p*99 — ± стандартное отклонение

Режим	Подход	До отказа	После отказа	p95 после	p99 после	Максимум
Однородный	Круговое	42,0	41,9	0,33	0,60 ± 0,25	1,9
	Оценка узла	41,8	41,7	0,36	0,66 ± 0,22	2,3
	Ляпунов	41,9	41,7	0,59	1,29 ± 1,08	3,4
	Обучающийся	41,7	41,7	0,38	0,76 ± 0,33	2,7
Гетерогенный	Круговое	42,0	39,5	6,74	12,20 ± 0,99	28,2
	Оценка узла	41,9	39,4	6,86	12,61 ± 0,51	29,3
	Ляпунов	41,9	39,5	7,09	12,65 ± 0,89	25,4
	Обучающийся	41,9	39,5	6,64	11,79 ± 0,82	28,0

вышает входной поток задач. Пропускная способность снижается с 42,0 до 39,5 задач/с (около 94 % от заданной) и удерживается в стабильном режиме, а хвостовые задержки значительно возрастают: *p*95 в течение 30–40 с после отказа монотонно нарастает до установившегося уровня от 8 до 9 с, что можно увидеть на рисунке 3. Средние значения *p*95 после отказа составляют от 6,6 до 7,1 с, а для *p*99 — от 11,8 до 12,7 с. Максимальные задержки достигают от 25 до 29 с. Рост задержек обусловлен прежде всего ожиданием назначения задач на узлы при сократившейся обслуживающей способности системы, а не потерями.

Обсуждение

Влияние закона диспетчеризации существенно зависит от режима работы системы. В режимах вдали от насыщения при однородных узлах все четыре подхода эквивалентны, и в этих случаях оправдано применение кругового распределения. Различия более явно проявляются при гетерогенности узлов, когда обратная связь дает выигрыш адаптивных подходов по *p*95 в 2–3 раза, и вблизи насыщения системы, когда каждое решение о назначении влияет на накопление очереди, в этом случае выигрыш обучающегося подхода в 1,9 раза по сравнению с круговым распределением. При перегруженном режиме задержки всех подходов сближаются и определяются накоплением ожидания выполнения задач. Для решения данной проблемы нужны механизмы другого уровня, например, раннее обнаружение деградации и глобальное упорядочивание ожидающих задач (централизованная очередь на координаторе), что является перспективным продолжением работы.

Отдельно требуется отметить функцию награды обучающегося подхода. В ранних конфигурациях с линей-

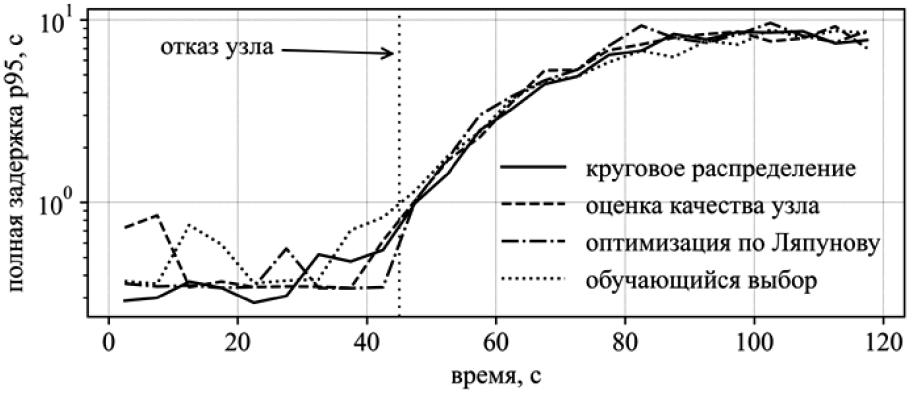


Рис. 3. Полная задержка *p*95 в серии C (гетерогенный сценарий, отказ узла на 45-й секунде, логарифмическая шкала)

ным штрафом задержки алгоритм работал несколько хуже других адаптивных методов: уменьшал задержки за счет недообслуживания входного потока задач. Нелинейный штраф за хвостовые задержки $f(D) = D^{1,5}$ в сочетании со штрафом за ошибки устранил такое поведение метода. Во всех сериях экспериментов обучающийся выбор держит пропускную способность наравне с остальными. Корректная постановка критерия обучения — необходимое условие применимости обучающихся законов.

По итогу можно выделить следующие рекомендации по применению различных законов диспетчеризации. Во-первых, круговое распределение — базовый режим однородных систем при умеренной нагрузке. Во-вторых, при неоднородности узлов следует применять метод по оценке качества узла. В-третьих, при нестационарной нагрузке использовать метод оптимизации по Ляпунову. В-четвертых, в режимах насыщения при корректной награде использовать метод обучающегося выбора. Ограничениями исследования можно выделить то, что использовался один тип микроконтроллера (гетерогенность моделировалась программно), всего было 8 узлов, использовалась локальная сеть, количество прогонов равное трем, координатор может служить единой точкой отказа управления.

Заключение

В работе выполнено экспериментальное исследование распределённого исполнения нейросетевой модели намаломощныхграничныхустройствахподуправлениемцентрализованного узла-координатора. Основные выводы.

1. Разработан стенд распределённого выполнения нейросетевых вычислений (координатор Khadas VIM3 Pro, до 8 рабочих узлов ESP32-S3) с полным набором метрик и измерений по каждой задаче.
2. Пропускная способность растет линейно с числом узлов и не зависит от подхода диспетчеризации. Различия проявляются в квантилях $p95$/$p99$ при гетерогенности узлов (пока есть запас ёмкости) либо вблизи насыщения. В гетерогенных режимах адаптивные подходы снижают $p95$ в 2–3 раза за счет подавления назначений на деградированный узел.
3. В режиме насыщения наименьшие хвостовые задержки даёт обучающийся выбор ($p95$ составляет около 2,25 с против 4,30 с у кругового) при схожих показателях пропускной способности, но при этом есть необходимое условие, функция награды должна быть с нелинейным штрафом хвостов.
4. При перегрузке и при отказе узла в насыщенной гетерогенной системе задержки всех подходов схожи (p99 после отказа от 11,8 до 12,7 с) и определяются дефицитом обслуживающей ёмкости системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shi W., Cao J., Zhang Q. [et al.] Edge computing: Vision and challenges // IEEE Internet of Things Journal. 2016. Vol. 3, № 5. P. 637–646.
2. Dean J., Barroso L.A. The tail at scale // Communications of the ACM. 2013. Vol. 56, № 2. P. 74–80.
3. Singh R., Gill S.S. Edge AI: A survey // Internet of Things and Cyber-Physical Systems. 2023. Vol. 3. P. 71–92.
4. David R., Duke J., Jain A. [et al.] TensorFlow Lite Micro: Embedded machine learning for TinyML systems // Proc. of Machine Learning and Systems. 2021. Vol. 3. P. 800–811.
5. Алексеев И.А., Егунов В.А., Панюлайтис С.В. [и др.] Методы и средства балансировки нагрузки в неоднородных вычислительных системах // Инженерный вестник Дона. 2020. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2020/6667.
6. Черепенин В.А., Пантелеев Д.С., Воробьев С.П. Графовая модель распределённых вычислительных систем на базе облачных, туманных и граничных технологий для оптимизации потоков данных // Инженерный вестник Дона. 2025. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2025/10536.
7. Harchol-Balter M. Performance Modeling and Design of Computer Systems: Queueing Theory in Action. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 574 p.
8. Neely M.J. Stochastic Network Optimization with Application to Communication and Queueing Systems. San Rafael: Morgan & Claypool Publishers, 2010. 211 p.
9. Chu W., Li L., Reyzin L. [et al.] Contextual bandits with linear payoff functions // Proc. of the 14th Int. Conf. on Artificial Intelligence and Statistics. 2011. Vol. 15. P. 208–214.
10. Ветошкин Н.В. Моделирование применения комплексного искусственного интеллекта в дальнем граничном слое гетерогенной распределённой системы // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2024. №11. С. 44–50. DOI: 10.37882/2223–2966.2024.11.06.

© Ветошкин Никита Владимирович (nikita@vetoshkin.info)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.09

МЕТОДЫ СТАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОНТРОЛЛЕРОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ НАРУШЕНИЙ ТРЕБОВАНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ

METHODS OF STATIC ANALYSIS OF INDUSTRIAL CONTROLLER SOFTWARE TO IDENTIFY SAFETY REQUIREMENT VIOLATIONS

S. Gaurgov

Summary. His article examines issues relating to the reliability and security verification of industrial controller software. It identifies quantitative parameters and metrics for software verification. It also formulates clear and verifiable requirements for methods of static analysis of industrial controller software. A graph model has been developed which formalises the three-phase cyclic semantics of programmes and serves as a basis for the deterministic search for their vulnerabilities.

Keywords: industrial controller, security, graph model, static analysis.

Гаургов Сергей Сергеевич
ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
sergeygaurgov@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы проверки надежности и защищенности программного обеспечения промышленных контролеров. Выделены количественные параметры и метрики верификации программного обеспечения. Также сформулированы четкие и верифицируемые требования к методам статического анализа программного обеспечения промышленных контроллеров. Разработана графовая модель, которая формализует трехфазную циклическую семантику программ и служит основой для детерминированного поиска их уязвимостей.

Ключевые слова: промышленный контролер, безопасность, графовая модель, статический анализ.

Промышленные системы управления состоят из взаимосвязанных кибернетических и физических компонентов, которые взаимодействуют и управляют физическими процессами, такими как распределение электроэнергии, воды и газа, производство и другие критически важные инфраструктуры [1]. Датчики и исполнительные механизмы этих систем обычно управляются вычислительными устройствами, называемыми программируемыми логическими контроллерами (ПЛК).

В настоящее время системы промышленной автоматизации прошли путь от изолированных установок до высокосетевых сред, которые основываются на сложном и масштабном программном обеспечении. Однако в связи с ростом этой сложности возникает необходимость в использовании передовых инструментов и методов программной инженерии для повышения производительности и качества управления, а также снижения затрат на него. Кроме того, этот сдвиг привёл к появлению новых уязвимостей. ПЛК теперь сталкиваются с такими угрозами, как непроверенные входные данные, логические «бомбы», отсутствие проверок безопасности и арифметические переполнения [2]. Разработчики могут непреднамеренно ввести условия конкуренции, дублировать присвоения выходов или создавать некорректные переходы состояний. Данные процессы изменения структуры программного обеспечения и численные параметры сопутствующих дефектов зафиксированы в статистических метриках. Количественные показатели верификации управляющих программ приведены в таблице ниже.

Таблица 1.

Количественные параметры и метрики верификации программного обеспечения ПЛК [3,4]

Объект / фактор анализа	Количественный показатель / метрика	Научно-техническое обоснование
Сложность программного обеспечения управляющих систем	Рост объема кода промышленных контроллеров за пять лет: ×2,5–3,0. Число связей в графе вызовов: $O(N^2)$	Экспоненциальное расширение пространства состояний автоматизированных систем управления технологическими процессами. Выход за пределы возможностей ручной детерминированной верификации.
Плотность дефектов безопасности	2,1–4,5 критических уязвимостей на одну тысячу строк кода	Наличие скрытых каналов утечки данных и нарушений целостности в контурах управления
Этапы внесения уязвимостей	Доля дефектов, вносимых на стадиях проектирования и кодирования: 65–70%	Необходимость превентивного контроля безопасности на предкомпиляционном этапе методами сигнатурного и абстрактного анализа

Объект / фактор анализа	Количественный показатель / метрика	Научно-техническое обоснование
Эффективность поиска нарушений	Полнота покрытия путей графа потока управления: статический анализ: →100 %; динамический анализ: <45 %	Динамическое тестирование не обеспечивает обход логических условий специализированных языков программирования без полной симуляции технологических процессов
Ресурсная емкость устранения дефектов	Рост стоимости исправления нарушений на этапе эксплуатации относительно этапа кодирования: ×30–100	Оптимизация временных и вычислительных затрат при автоматизированном синтезе ограничений безопасности на ранних стадиях
Погрешность существующих подходов	Уровень ложноположительных срабатываний лексических анализаторов: 40–60 %	Необходимость применения математических моделей на базе абстрактной интерпретации и исчисления предикатов для снижения энтропии оценки

Обеспечение безотказности программного обеспечения ПЛК обычно осуществляется посредством тестирования, которое является дорогостоящим для сложных систем с высокими требованиями к надежности, но при этом все равно не позволяет доказать невозможность сбоя. В решении этой задачи могут помочь формальные методы, такие как проверка моделей, доказательство теорем и статический анализ.

Методы и инструменты статического анализа кода широко распространены и активно используются при разработке программных систем. Их основное преимущество заключается в повышении качества кода на ранних этапах разработки [5]. Сегодня, существует множество методов и инструментов статического анализа кода для таких распространенных языков программирования, как C/C++, Java, C# и многих других.

Таким образом, рассмотрение возможностей использования статического анализа для проверки надежности и работоспособности промышленных контроллеров составляет актуальную научную задачу, решению которой и посвящена данная статья.

Основные преимущества статического анализа кода, которые заключаются в повышении качества программного обеспечения за счет выявления потенциальных дефектов и проблемных конструкций кода на ранних этапах разработки, детально описывают в своих трудах Кубрин Г.С., Зегжда Д.П., Бахадуров Б., Dejan Baca, Bengt Carlsson, Kai Petersen.

Над разработкой архитектуры формальной верификации для обнаружения «лестничных логических бомб» — класса атак, направленных на нарушение нормальной работы программируемых логических контроллеров, трудятся Жильцов Е.А., Брагин К.Д., Левчук М.В., Макеева О.В., Сартаков М.В., Osamu Mizuno, Michi Nakai.

Развитие инструментов автоматической проверки исходного кода на текущем этапе не снимает неопределенности в вопросах адаптации методов анализа к специфике архитектуры встроенных систем и жестким ограничениям промышленной автоматизации. В качестве актуальной исследовательской задачи выделяется снижение частоты ложноположительных срабатываний (Type I errors) при одновременном сохранении высокой чувствительности алгоритмов к латентным опасным состояниям в программных модулях реального времени.

Анализ и верификация программного обеспечения ПЛК детерминированы необходимостью верификации специфических свойств, среди которых критическими являются безопасность, предотвращение взаимных блокировок и обеспечение валидности выходных сигналов. В настоящей работе фокус смещен в сторону прецизионности выходных данных при фиксированных параметрах на входе. Данный приоритет продиктован технологической спецификой киберфизических комплексов, где малейшая девиация выходного значения способна инициировать каскадные нарушения безопасности и техногенные риски в индустриальном секторе.

Среды кооперативной верификации оперируют гетерогенным стеком инструментов статического анализа, дифференцируемых по методологии и целевым объектам контроля.

1. Инструмент ARCADE реализует статическую проверку логики функционирования ПЛК.
2. Архитектура VETPLC ориентирована на построение причинно-следственных графов для детекции скрытых аномалий [6].
3. Открытые компиляторы MATIEC и RuSTy обеспечивают валидацию синтаксических конструкций и рефакторинг кода на языке Structured Text (ST) [7].

Однако, поведение программ для ПЛК отличает их от других парадигм программирования, таких как C или Java. Все это обуславливает необходимость сформулировать требования к выбору методов статического анализа программного обеспечения промышленных контроллеров (табл. 2).

Таким образом, выстроенная в таблице 2 система научно-методических требований, задает математическую основу, на которую можно опереться при создании специализированных алгоритмов верификации управляющего программного обеспечения ПЛК. Если эти критерии последовательно реализовать, становится возможным сместить акцент с эмпирического, во

Таблица 2.

Требования к методам статического анализа программного обеспечения ПЛК

Критерий анализа	Формализованное содержание требования	Алгоритмический и математический базис реализации
Моделирование операционной семантики бесконечного цикла	Построение графа потока управления, отображающего жесткую смену изолированных фаз (ввод, вычисление, вывод) и гарантирующего возврат к начальному состоянию	Формализмы теории расширенных временных конечных автоматов, упорядоченные ориентированные графы с выделенными межциклическими дугами
Вычисление межцикличе-ских инвариантов памяти	Отслеживание эволюции значений глобальных переменных и внутренних состояний программных блоков, сохраняющих предысторию между итерациями цикла	Метод абстрактной интерпретации на полурешетках интервалов или знаков, применение операторов расширения и сужения для нахождения неподвижной точки
Унификация гетерогенных языковых структур	Трансляция параллельно исполняемых графических диаграмм и последовательного структурированного текста в единое промежуточное представление	Преобразование исходного кода в статическую единичную форму присваивания, построение единого графа потоков данных и зависимостей управления
Верификация временной детерминированности путей	Статическая оценка времени выполнения наихудшего сценария в рамках одной дискретной итерации для исключения аппаратных сбоев.	Алгоритмы поиска критического пути на взвешенных графах, методы целочисленного линейного программирования для максимизации временной функции.
Аппроксимация физических ограничений среды	Включение математического описания динамики объекта управления в предикаты анализа для отсечения недостижимых состояний переменных	Теория гибридных автоматов, использование решателей выполнимости формул с учетом контекста линейной арифметики вещественных чисел
Детекция специфических логических аномалий	Выявление дублирования перезаписи физических адресов выходов и условий гонки сигналов между независимыми задачами контроллера	Алгоритмический анализ информационных зависимостей (построение цепей определения-использования), проверка пересечения множеств записи данных

Составлено автором

многом «поискового» выявления уязвимостей на более детерминированное и логически обоснованное обнаружение, где учитывается поведение реального технологического процесса и те жесткие временные рамки, в которых работают ПЛК.

Практически воплотить описанную систему научно-методических требований вряд ли получится, если не опереться на формальное и при этом достаточно точное описание топологии тех программ, которые исследуются. Для превентивного выявления возможных нарушений безопасности предлагаем взять в качестве математической основы специализированное графовое представление кода, которое позволяет рассматривать программу как связанную структуру, а не набор разрозненных фрагментов.

Разработанная структурная схема графа циклического функционирования управляющего программного обеспечения показана на рисунке 1.

Задачу детерминированного выявления нарушений требований безопасности целесообразно решать посредством формальной абстракции управляющего программного обеспечения. В качестве такой концептуальной формы выступает специализированный ориентированный граф потока управления:

$$G = V, E, T, M$$

В рамках данного кортежа конечное множество операторов отображается вершинами V, тогда как направленные дуги E задают топологию переходов. Динамические свойства системы учитываются через функцию времени выполнения операторов T, сопряженную с математической моделью памяти M. Процедура декомпозиции множества V на три изолированных подмножества $\left(V = V_{in} \bigcup V_{calc} \bigcup V_{out}\right)$ продиктована циклическим регламентом функционирования промышленных контроллеров.

Начальную стадию — чтение входных сигналов (V_{in}) — формируют процессы опроса физических каналов ввода и фильтрации данных. Напротив, фаза вычисления управляющей логики (V_{calc}) ориентирована на непосредственную реализацию технологических алгоритмов и расчет переменных. Завершает итерацию подмножество обновления физических выходов (V_{out}), обеспечивающее фиксацию сформированных векторов управления в исполнительных механизмах.

Структурирование множества дуг $\left(E = E_{local} \bigcup E_{loop}\right)$ предполагает выделение двух различных типов связей. Если внутрициклические потоки E_{local} детерминируют



Рис. 1. Структурная схема графа циклического выполнения программного обеспечения ПЛК
Составлено автором

последовательность выполнения в границах одной дискретной итерации, то дуга межциклического перехода E_{loop} имеет иную семантику.

Статическая верификация критических свойств безопасности опирается на сформированный таким образом графовый каркас. На его основе формализуется обнаружение скрытых логических аномалий, среди которых наиболее деструктивными признаются гонка сигналов на этапе вычислений и дублирование присвоения выходов. Сама процедура верификации сводится к проверке выполнимости фундаментального соотношения

$$\exists_{v_1,v_2} \in V_{calc} \mid \left(Write\left(v_1, x_i\right) \wedge Write\left(v_2, x_i\right)\right) \wedge$$
$$\wedge\ \Delta T\left(v_1, v_2\right) < \tau_{filter}$$

Левая часть приведенного выражения определяет функцию логической корректности, чье пересечение с множеством запрещенных состояний (правой частью уравнения) должно быть тождественно пустому множеству.

Перенос этой теоретической схемы в инженерную практику полностью избавляет от необходимости развертывания целевого программного обеспечения на физическом оборудовании. Сформированный инвариантный математический базис позволяет осуществлять сквозной анализ траекторий, по которым выполняются управляющие программы, непосредственно в изолированной среде моделирования.

Математическое обоснование надежности целевого кода, выполненное еще до этапа предкомпиляции, в предложенной логике рассматривается как способ во многом заменить привычные процедуры эмпирического тестирования. Опорой для такого сдвига выступает графовая модель, предложенная авторов. Она построена так, чтобы ее структура сохраняла изоморфное соответствие трехфазной семантике исполнения инструкций, и именно это соответствие подается как ключ к более точному анализу: поведение кода описывается не приблизительно, а через формальные связи, которые можно последовательно проверять и сопоставлять с тем, как инструкции реально «разворачиваются» в ходе выполнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джексембинов А.Р. Методы анализа уязвимостей программного обеспечения: от статического анализа к машинному обучению // Central Asian Scientific Journal. 2025. № 3 (27). С. 23–31.
2. Шершнёв Д.Ю. Анализ эффективности методов статического анализа кода для выявления уязвимостей в программном обеспечении // Российская наука и образование сегодня: проблемы и перспективы. 2025. № 6 (67). С. 51–52.
3. Ревазова А.О. Методы выявления и оценки уязвимостей в системах статического анализа безопасности программного обеспечения // Интерэкспо ГеоСибирь. 2025. Т. 7. № 2. С. 263–267.
4. Козачок А.В., Матовых С.С., Козачок А.В. Каскадный алгоритм классификации для обнаружения вредоносного программного обеспечения методом статического анализа // Известия ЮФУ. Технические науки. 2025. № 5 (247). С. 18–35.
5. Матвеенко Е.В. Роль статического анализа в обеспечении качества программного обеспечения // Научный аспект. 2023. Т. 31. № 12. С. 3835–3840.
6. Макеева О.В. Возможности интегрированного подхода статического и динамического методов анализа кода в программировании // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 9 (135).
7. Николаев А.А., Кожухов Н.К. Подходы к обнаружению потенциальных дефектов в программном обеспечении // Флагман науки. 2024. № 6 (17). С. 450–451.

© Гаургов Сергей Сергеевич (sergeygaurgov@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.10

РЕИНЖИНИРИНГ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ПРИМЕРЕ КАФЕДРЫ УНИВЕРСИТЕТА НА ОСНОВЕ UML И IDEF1X

INFRASTRUCTURE REENGINEERING USING THE EXAMPLE OF A UNIVERSITY DEPARTMENT BASED ON UML AND IDEF1X

Gidinda Grace Muchigo

Summary. The article is devoted to the reengineering of a university department's infrastructure using a comprehensive approach that combines the process of database design with IDEF1X and the use of UML class diagrams. It is demonstrated that this approach not only allows for modernizing the infrastructure in accordance with current requirements but also lays the foundation for its adaptation to future challenges. As a result, significant cost optimization and increased efficiency in resource utilization are achieved. The created innovative and high-performance work environments contribute to improving the experience for both students and staff. Special attention is given to the role of UML class diagrams and their integration with IDEF1X models as key tools for deep and effective reengineering.

Keywords: reengineering of the department's infrastructure, UML class diagram, database design process, optimization.

Гидинда Грас Мушиго
аспирант, Уфимский университет технологий и науки
gracegidinda92@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена реинжинирингу инфраструктуры университетской кафедры с применением комплексного подхода, сочетающего процесс проектирования базы данных с использованием IDEF1X и использование диаграмме класс UML. Демонстрируется, что такой подход позволяет не только модернизировать инфраструктуру в соответствии с текущими требованиями, но и закладывает основу для её адаптации к будущим вызовам. В результате достигается значительная оптимизация затрат и повышение эффективности использования ресурсов. Создаваемые инновационные и высокопроизводительные рабочие среды способствуют улучшению опыта как студентов, так и сотрудников. Особое внимание уделяется роли диаграмме класс UML и их интеграции с IDEF1X-моделями как ключевым инструментам глубокого и результативного реинжиниринга. Цель работы — не просто частичное улучшение, а полноценная трансформация образовательной среды, стимулирующая развитие личности и отвечающая современным академическим и технологическим требованиям.

Ключевые слова: реинжиниринг инфраструктуры кафедры, диаграмма класс UML, процесс проектирования базы данных, оптимизация.

Введение

Современная академическая среда переживает этап глубокой цифровой трансформации, которая сопровождается не только внедрением новых технологий, но и кардинальным пересмотром устоявшихся организационных принципов. Университетские кафедры, выступающие первичными структурными единицами образовательного и научного процессов, оказываются в эпицентре этих изменений.

Традиционная модель кафедральной инфраструктуры, сложившаяся ещё в доцифровую эпоху, демонстрирует растущую неадекватность новым вызовам: увеличивающейся интенсивности информационных потоков, требованию междисциплинарного взаимодействия и необходимости оперативной адаптации учебных программ к запросам рынка труда [1].

Практика показывает, что локальные улучшения — замена оборудования, обновление программного обеспечения или перераспределение административных функций — не приводят к желаемому системному эффекту [2]. В этой связи актуализируется необходимость применения методологии реинжиниринга, то есть радикального перепроектирования всей совокупности бизнес-процессов кафедры, ориентированного на скачкообразное повышение эффективности, а не на эволюционные улучшения.

Ключевая проблема, с которой сталкивается реинжиниринг в академической сфере, заключается в отсутствии адекватных инструментов для формализации двух разнородных, но тесно связанных аспектов кафедральной деятельности. С одной стороны, это организационная динамика — взаимодействие между профессорско-преподавательским составом, студентами, административным персоналом и внешними стейкхолдерами. С другой стороны, это информационная статика — структура данных, циркулирующих в кафедральной информационной системе, включая учебные планы, результаты аттестаций, научные отчёты и кадровые документы.

Автор настоящего исследования исходит из того, что эффективный реинжиниринг возможен только при условии интегративного подхода, объединяющего инструменты визуального моделирования организационных взаимосвязей (диаграммы классов UML) и формального проектирования логической структуры данных (нотация

IDEF1X). Целью работы является разработка и апробация такой комплексной методики на примере реальной университетской кафедры.

Предлагаемый подход принципиально отличается от распространённых попыток автоматизации существующих процедур. В отличие от простой компьютеризации, которая лишь ускоряет выполнение старых операций, реинжиниринг на основе синтеза UML и IDEF1X позволяет переосмыслить саму логику работы кафедры. Диаграмма классов UML даёт возможность наглядно представить структуру организационных отношений, выявить избыточные связи и латентные конфликты ролей. IDEF1X-модель, в свою очередь, обеспечивает строгую формализацию информационных потоков, необходимых для поддержки перепроектированных процессов.

Взаимное отображение этих двух представлений создаёт основу для построения целостной, непротиворечивой и масштабируемой кафедральной инфраструктуры [3]. Научная новизна исследования заключается в разработке оригинальной диаграммы классов UML, адаптированной к специфике академической среды и отражающей особенности взаимодействия между всеми участниками образовательного процесса, а также в создании IDEF1X-модели, учитывающей отраслевые особенности университетских кафедр и включающей этапы анализа потребностей, аудита, внедрения и валидации результатов.

1. Разработанная диаграмма классов UML и инфраструктурные объекты кафедры университета

Инфраструктура университетской кафедры, рассматриваемая в контексте реинжиниринга, представляет собой сложную многокомпонентную систему, в которой переплетаются человеческие, материальные и информационные ресурсы. Ключевая особенность этой системы заключается в её распределённом характере: ни один из участников образовательного процесса не обладает полной информацией о состоянии всех подсистем, а эффективное функционирование кафедры зависит от качества информационного обмена между ними.

Человеческий потенциал здесь включает профессорско-преподавательский состав, исследователей, технический и административный персонал, а также студентов. Программные продукты, учебные дисциплины и аудиторные группы формируют материально-техническую и информационную базу, без которой образовательная деятельность невозможна. Именно эти разнородные элементы — люди, документы, программное обеспечение, помещения — вступают в сложные отношения взаимозависимости, которые и призвана формализовать диаграмма классов UML [4].

Разработанная в ходе исследования диаграмма классов UML (Рис. 1) фиксирует статическую структуру кафе-

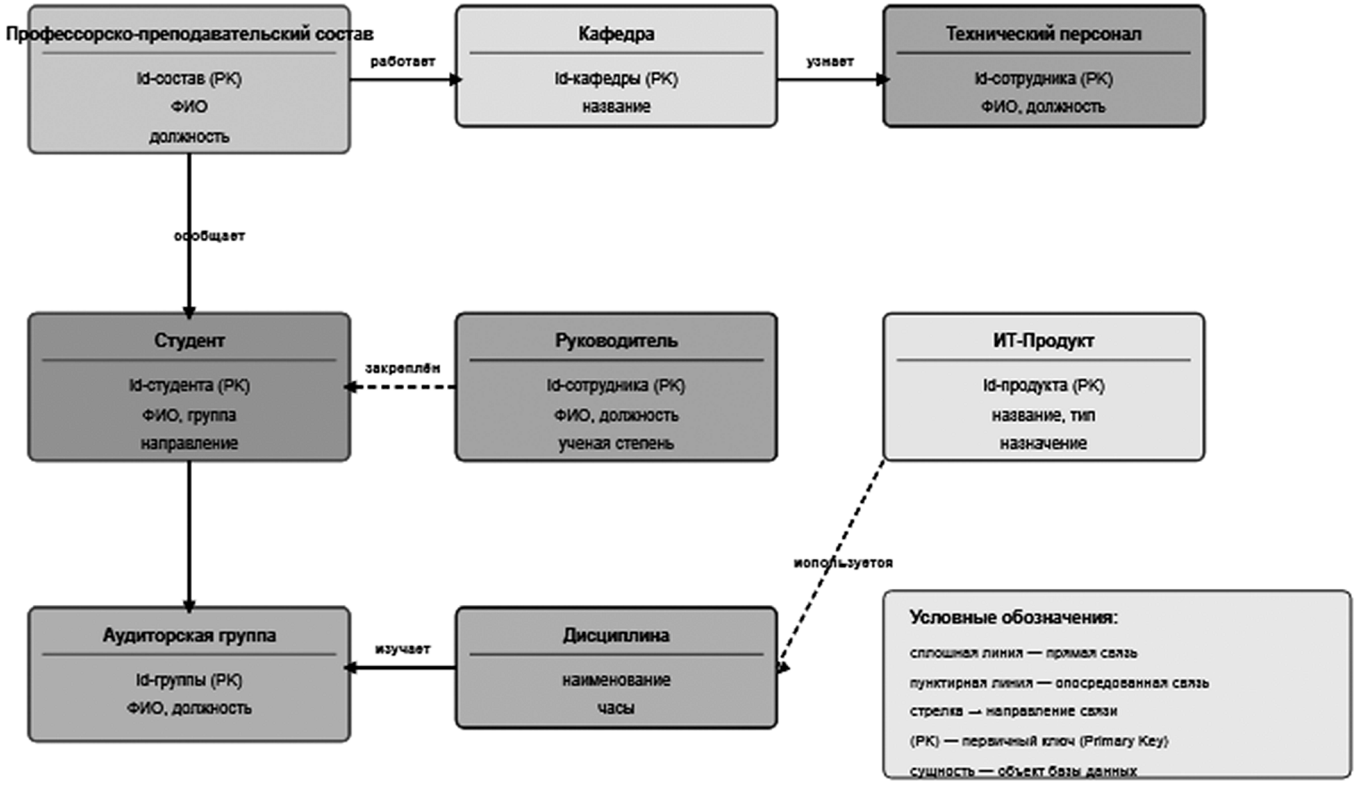


Рис. 1. Диаграмма классов UML, отражающая инфраструктурные объекты и связи между участниками образовательного процесса университетской кафедры

дральной инфраструктуры, выделяя ключевые классы, их атрибуты, методы и, что наиболее важно, типы связей между ними.

В отличие от традиционных организационных схем, которые фиксируют лишь иерархическую подчинённость, диаграмма классов позволяет моделировать множественные и рекурсивные отношения [5]. Например, класс «Преподаватель» может быть связан с классом «Дисциплина» отношением «ведёт», с классом «Студент» — отношением «руководит научной работой», а с классом «Администратор» — отношением «согласует учебную нагрузку».

Такая многомерная визуализация выявляет скрытые конфликты: один и тот же преподаватель может одновременно выступать как исполнитель, как менеджер и как источник экспертного знания, причём эти роли часто вступают в противоречие друг с другом. Именно фиксация этих ролевых конфликтов составляет первый шаг к их разрешению через перепроектирование процессов [6].

Особое значение в разработанной диаграмме придаётся классам-посредникам, которые отсутствуют в традиционных моделях кафедральной инфраструктуры. Эти посредники не имеют прямого аналога в реальной организационной иерархии, но вводятся для оптимизации информационных потоков [7]. Типичный пример — класс «Учебно-методический комплекс», который связывает классы «Дисциплина», «Преподаватель» и «Студент», аккумулируя в себе информацию о рабочих программах, фондах оценочных средств и результатах промежуточных аттестаций. Благодаря введению такого посредника удаётся избежать образования «сильно связанной» архитектуры, при которой изменение одного класса (например, перенос сроков экзамена) требует каскадных изменений во всех связанных с ним классах.

Вместо этого все взаимодействия опосредуются через класс-посредник, что делает систему более гибкой и устойчивой к изменениям. Эта архитектурная особенность, заимствованная из практики объектно-ориентированного проектирования программных систем, переносится автором на уровень организационного моделирования, что составляет одну из ключевых новаций предлагаемого подхода. В Таблице 1 представлен сравнительный анализ традиционного и предлагаемого интегративного подходов к описанию кафедральной инфраструктуры по ключевым модельным характеристикам.

Таблица 1.

Сравнительный анализ модельных характеристик традиционного и реинжинирингового подходов к описанию кафедральной инфраструктуры

Характеристика модели	Традиционный (функциональный) подход	Предлагаемый интегративный подход (UML + IDEF1X)
Базовый элемент описания	Функция / операция	Класс / объект / сущность
Тип связей между элементами	Преимущественно иерархические («подчинение», «входит в состав»)	Множественные, включая ассоциацию, агрегацию, композицию, наследование и зависимость
Способ обработки ролевых конфликтов	Игнорирование или административное разрешение (закрепление зон ответственности)	Явное моделирование через классы-посредники и интерфейсы
Представление информационных потоков	Неформализованное, «на естественном языке»	Формализованное в терминах IDEF1X (сущности, атрибуты, первичные/внешние ключи)
Отношение к данным	Данные — побочный продукт выполнения функций	Данные — самостоятельная сущность с собственным жизненным циклом
Масштабируемость	Низкая (при добавлении новых объектов схема разрушается)	Высокая (добавление новых классов не требует перестройки всей модели)

Составлено автором

2. Проектирование IDEF1X базы данных для реинжиниринга инфраструктуры кафедры

Если диаграмма классов UML отвечает на вопрос «кто и с кем взаимодействует», то методология IDEF1X предназначена для ответа на вопрос «какие данные и в каком виде циркулируют в этих взаимодействиях». Проектирование базы данных в нотации IDEF1X представляет собой фундаментальный инструментарий для комплексного реинжиниринга, поскольку именно данные — оценки студентов, учебные нагрузки преподавателей, отчётность перед деканатом — являются тем «кровотоком», без которого любая организационная схема остаётся «мёртвой» [8].

IDEF1X, являясь расширением исходной методологии IDEF1 и базируясь на реляционной теории Э. Кодда и концепции «сущность-связь» П. Чена, обеспечивает не только визуальное представление информационных структур, но и формализацию правил целостности, которые должны соблюдаться при любых операциях с данными [9]. В контексте реинжиниринга кафедры это означает, что IDEF1X-модель становится тем «контрактом», который фиксирует, какие данные являются первичными, какие — производными, а какие — внешними по отношению к данной предметной области.

На рисунке 2 представлена детализированная IDEF1X-диаграмма, которая визуализирует полный цикл реинжиниринга инфраструктуры кафедры.

Важно подчеркнуть, что эта диаграмма не является простой иллюстрацией последовательности шагов; она фиксирует устойчивые информационные связи между сущностями, участвующими в процессе реинжиниринга.

В центре диаграммы находится сущность «Проект реинжиниринга», которая связана отношениями «один-ко-многим» с сущностями «Этап», «Участник», «Ресурс» и «Результат». Каждая из этих сущностей, в свою очередь, имеет собственные атрибуты, образующие первичные ключи. Например, сущность «Этап» определяется атрибутами «код этапа», «название», «плановая дата начала», «плановая дата окончания», «фактическая дата начала», «фактическая дата окончания» и «статус».

Отношения между сущностями специфицируются с помощью внешних ключей, что обеспечивает ссылочную целостность: невозможно добавить запись о «Результате», не указав, к какому «Этапу» и к какому «Проекту» этот результат относится. Такая жёсткая формализация, характерная для IDEF1X [10], принципиально отличает предлагаемый подход от «гибких», но неформализованных методов управления проектами, которые часто приводят к потере данных и несогласованности версий.

Особого внимания заслуживает то, как IDEF1X-модель дополняет UML-диаграмму классов в предлагаемом интегративном подходе. Если UML фиксирует, что между преподавателем и студентом существует отношение «руководство научной работой», то IDEF1X определяет, какие именно атрибуты этого отношения должны сохраняться в базе данных: идентификатор преподавателя, идентификатор студента, тема работы, дата назначения, дата предполагаемой защиты, дата фактической защиты и оценка.

Более того, IDEF1X позволяет специфицировать ограничения целостности: например, что один преподава-

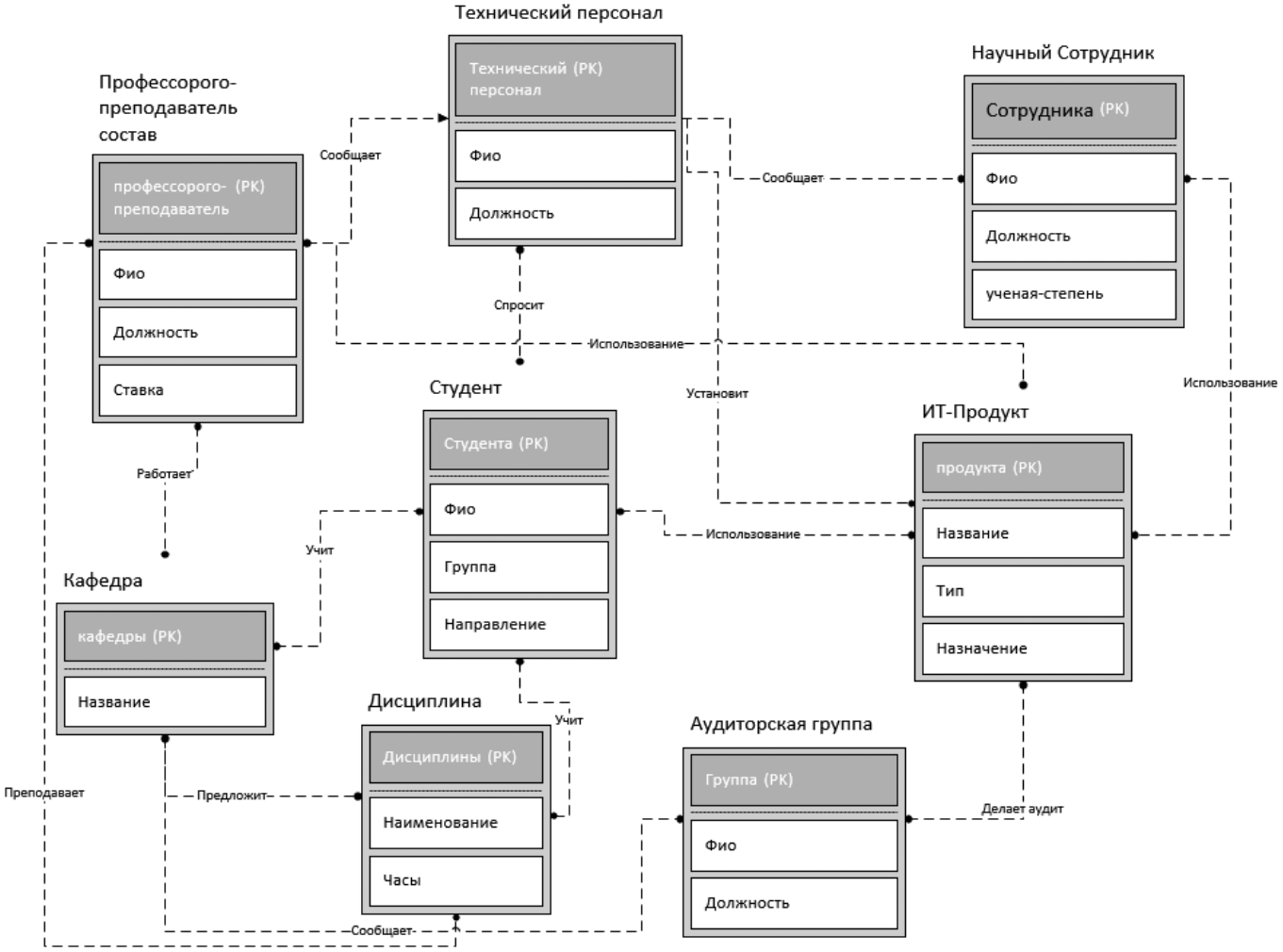


Рис. 2. IDEF1X-диаграмма процесса реинжиниринга инфраструктуры кафедры с декомпозицией этапов и распределением ответственности

тель не может руководить более чем десятью студентами одновременно, или что дата фактической защиты не может быть раньше даты назначения. Эти ограничения, выраженные на языке IDEF1X, впоследствии транслируются в программный код информационной системы, обеспечивая автоматический контроль соблюдения бизнес-правил. Именно эта способность к автоматической генерации исполняемых спецификаций делает IDEF1X незаменимым инструментом реинжиниринга, ориентированного на последующую цифровую поддержку перепроектированных процессов [11].

Инициация процесса реинжиниринга, как показано на рисунке 2, начинается с фазы анализа потребностей в базах данных, которую осуществляет университетское руководство. На этом этапе с помощью IDEF1X-модели выявляются сущности, которые в существующей кафедральной практике либо не фиксируются вовсе, либо фиксируются в неструктурированном, «бумажном» виде. Типичный пример — учёт неформальных коммуникаций между преподавателями при разработке междисциплинарных курсов. В традиционной модели эти коммуникации остаются «за кадром», что приводит к дублированию усилий и потере экспертного знания при увольнении сотрудника. В IDEF1X-модели такие коммуникации получают статус полноценной сущности со своими атрибутами (инициатор, участники, тема, дата, результат), что позволяет в дальнейшем автоматизировать их учёт и анализ. Таким образом, предлагаемый подход не просто автоматизирует существующие процессы, а выявляет и формализует те аспекты кафедральной деятельности, которые ранее были скрыты от управленческого учёта, что создаёт основу для их целенаправленного улучшения.

Заключение

Проведённое исследование подтверждает фундаментальную значимость реинжиниринга инфраструктуры университетской кафедры как стратегического направления модернизации высшего образования. Разработанный интегративный подход, основанный на синтезе диаграммы классов UML и методологии IDEF1X, доказал свою эвристическую и практическую эффективность.

В отличие от редукционистских стратегий, которые фрагментируют кафедральную деятельность на изолированные функции и автоматизируют их по отдельности, предложенная методика позволяет сохранить целостное видение системы, одновременно обеспечивая необходимую строгость при проектировании её информационной основы.

Диаграмма классов UML выступает здесь как язык организационной семиотики, фиксирующий роли, обязанности и коммуникационные паттерны, тогда как IDEF1X-модель выполняет функцию формального контракта, определяющего структуру и правила целостности циркулирующих данных. Их взаимное соответствие, достигаемое через процедуру последовательной рефайнмента, гарантирует, что информационная система не будет находиться в противоречии с организационной реальностью — проблема, которая является основной причиной неудач при внедрении кафедральных информационных систем.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что предложенная методика может быть тиражирована не только на другие кафедры того же университета, но и, с соответствующей адаптацией, на структурные подразделения иных образовательных организаций. Ключевым условием такой адаптации является сохранение инвариантного ядра модели — классов-посредников и IDEF1X-правил целостности, — при варьировании периферийных элементов, специфичных для конкретной предметной области.

Дальнейшие исследования автора будут направлены на разработку программного прототипа, поддерживающего автоматическую генерацию схем баз данных из IDEF1X-модели и формирование пользовательских интерфейсов на основе UML-диаграммы классов.

Таким образом, реинжиниринг на основе интеграции UML и IDEF1X открывает новые возможности для создания инновационных, высокопроизводительных и человеко-ориентированных образовательных сред, отвечающих самым современным академическим и технологическим требованиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Моисеева Т.В. Методологические основы поддержки принятия решений по управлению инновационным развитием социотехнических объектов на основе интерсубъективного подхода // Системная инженерия и информационные технологии. 2023. Т. 5. № 2(11). С. 66–95. EDN CNPZYU.
2. Гидинда Г.М. Реинжиниринг инфраструктуры на примере кафедры университета // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. — 2025. — №10. — С. 84–89 DOI 10.37882/2223–2966.2025.10.09
3. Антонов В.В., Куликов Г.Г., Антонов Д.В. Формализация предметной области с применением инструментов, поддерживающих стандарты // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16. № 3(48). С. 42–52. EDN PXEQBF.
4. Король А.Д., Воротницкий Ю.И. Цифровая трансформация образования и вызовы XXI века // Высшее образование в России. — 2022. — Т. 31. — №. 6. — С. 48–61

5. Гамбеева Ю.Н., Сорокина Е.И. Цифровая трансформация современного образовательного процесса //Известия Волгоградского государственного педагогического университета. — 2020. — №. 5 (148). — С. 35–42
6. Балановская А.В., Франтасов Д.Н., Горбунова О.А. Направления развития образовательных организаций в условиях цифровой трансформации отрасли науки и высшего образования //Известия Байкальского государственного университета. — 2022. — Т. 32. — №. 2. — С. 423–431
7. Евсеева И.А., Агальцова Т.А. Реинжиниринг бизнес-процессов как инструмент стратегического управления предприятием //Вестник Алтайской академии экономики и права. — 2021. — №. 3–1. — С. 48–53
8. Чаадаев К.В. Методология реинжиниринга бизнес-процессов //Экономика, предпринимательство и право. — 2020. — Т. 10. — №. 3. — С. 587–600.
9. Черемных С.В. и др. Структурный анализ систем: IDEF-технологии.-М.: Финансы и статистика, 2001 — 208 с.
10. Черемных С., Семенов И., Ручкин В. Моделирование и анализ систем. IDEF-технологии: практикум — М.: Финансы и статистика, 2006–188 с.
11. Буч Г., Якобсон А., Рамбо Дж. UML. Классика CS. 2-е изд./ Пер. с англ.: Под общей редакцией проф. С. Орлова — СПб.: Питер, 2006. — 736 с.

© Гидинда Грас Мушиго (gracegidinda92@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.13

ПРЕДИКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ БИФУРКАЦИОННОЙ МАРШРУТИЗАЦИЕЙ И ОПТИМИСТИЧНЫМ ИСПОЛНЕНИЕМ В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

PREDICTIVE CONTROL OF BIFURCATION ROUTING AND OPTIMISTIC EXECUTION IN DECENTRALIZED ORGANIZATIONAL SYSTEMS

V. Zinovev
O. Romashkova

Summary. The article solves the urgent scientific problem of improving management processes in decentralized organizational systems under conditions of uncertainty and computational constraints. Within the framework of developing mathematical models and organizational systems efficiency criteria, the problem of throughput degradation when using resource-intensive hybrid verification methods is formalized. A new information management technology is proposed — the Adaptive Trust Layer, which implements a predictive bifurcation routing mechanism. The mathematical apparatus of the model is based on the synergy of non-Markov queuing models (Pollaczek-Khinchine formula) and Little's law. An algorithm for dynamic adaptation of the bifurcation threshold has been developed, providing intelligent support for decision-making regarding the choice of the transaction processing circuit. It is empirically proven that the proposed model minimizes the risks of opportunistic behavior of agents while reducing median latency by 96 % compared to static methods.

Keywords: organizational systems, bifurcation routing, Little's law, Pollaczek-Khinchine formula, optimistic execution, adaptive control, intelligent decision support.

Зиновьев Владимир Иванович
ГАОУ ВО Московский городской педагогический университет
legrang@yandex.ru
Ромашкова Оксана Николаевна
доктор технических наук, профессор,
Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, г. Москва
ox-rom@yandex.ru

Аннотация. В статье решается актуальная научная задача совершенствования процессов управления в децентрализованных организационных системах в условиях неопределенности и вычислительных ограничений. В рамках разработки математических моделей и критериев эффективности организационных систем формализована проблема деградации пропускной способности при использовании ресурсоемких методов гибридной верификации. Предложена новая информационная технология управления — Адаптивный слой доверия, реализующая механизм предиктивной бифуркационной маршрутизации. Математический аппарат модели базируется на синергии немарковских моделей массового обслуживания (формула Поллачека-Хинчина) и закона Литтла. Разработан алгоритм динамической адаптации порога бифуркации, обеспечивающий интеллектуальную поддержку принятия решений о выборе контура обработки транзакций. Эмпирически доказано, что предложенная модель минимизирует риски оппортунистического поведения агентов при снижении медианной задержки на 96 % по сравнению со статическими методами.

Ключевые слова: организационные системы, бифуркационная маршрутизация, закон Литтла, формула Поллачека-Хинчина, оптимистичное исполнение, адаптивное управление, интеллектуальная поддержка решений.

Введение

Современные тенденции развития организационных систем характеризуются глобальным переходом от иерархических централизованных топологий к распределенным децентрализованным сетям [1]. В условиях децентрализации управление взаимодействием агентов и транзитом цифровых активов сталкивается с фундаментальной проблемой: отсутствие единого доверенного центра максимизирует риски оппортунистического поведения субъектов, что требует внедрения новых механизмов контроля [2].

В предыдущем исследовании авторами была математически обоснована и разработана модель гибридной интеллектуальной верификации, позволяющая устранить «семантический разрыв» при передаче состояний активов между корпоративной средой и распределенным реестром [3]. Однако анализ показал, что тотальное применение тяжелых криптографических и графовых оракулов (ZK-SNARK, вычисление вектора Фидлера алгоритмом Ланцоша) создает непреодолимый вычислительный барьер. Рост интенсивности входящих запросов в таких системах неизбежно приводит к экспоненциальному росту очередей транзакций [4].

Согласно теории массового обслуживания, при приближении коэффициента загрузки системы к единице, задержка обслуживания (Latency) стремится к бесконечности [5]. Это делает систему управления ОС непригодной для обеспечения масштабирования в рамках высоконагруженных инфраструктур и вступает в конфликт

с требованиями аудита в режиме реального времени, предписанными нормативными актами (в частности, ФЗ о ЦФА и стандартами FATF) [6, 7].

Целью работы является совершенствование процессов управления в децентрализованных организационных системах посредством разработки математической модели и алгоритмов предиктивной бифуркационной маршрутизации (Adaptive Trust Layer, ATL). Разрабатываемая информационная технология должна обеспечить интеллектуальную поддержку принятия управленческих решений [8] о распределении потоков между «оптимистичным» и «пессимистичным» контурами обработки для динамической балансировки критериев надежности и эффективности функционирования ОС.

Архитектура адаптивного слоя доверия (ATL)

Управление транзакционными потоками реализуется через архитектуру ATL, которая выполняет функцию интеллектуального пре-фильтра. ATL осуществляет бифуркацию (расщепление) потока запросов на основе быстрого скоринга риска $S_{risk}(x)$, вычисляемого за асимптотическое время $O(1)$. Точка бифуркации задается динамическим порогом доверия θ_{ATL} (рисунок 1).

Оператор бифуркационного управления формализуется системой логических правил маршрутизации:

$$\text{Если} \quad S_{risk}(x) < \theta_{ATL} \quad \Rightarrow$$
$$\Rightarrow Path = \text{Оптимистичный} \quad \text{контур}$$
$$\text{Если} \quad S_{risk}(x) \geq \theta_{ATL} \quad \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \quad Path = \text{Пессимистичный} \quad \text{контур}.$$

Математическое моделирование задержек в системе управления

Применим аппарат теории очередей для анализа пропускной способности ОС. Входящий пуассоновский поток с интенсивностью λ разделяется на две компоненты с вероятностью p, зависящей от порога θ_{ATL}

$$\lambda_{opt} = p \cdot \lambda_{req} \tag{1}$$

$$\lambda_{pess} = (1 - p) \cdot \lambda_{req} \tag{2}$$

Согласно закону Литтла, средняя длина очереди L в системе управления прямо пропорциональна среднему времени пребывания W

$$L = \lambda \cdot W. \tag{3}$$

Для пессимистичного контура (полная ZK-верификация графа) время обслуживания S_{pess} имеет произвольное распределение с высокой дисперсией (система M/G/1). Среднее время ожидания W_{pess} в таком случае определяется по формуле Поллачека-Хинчина

$$W_{pess} = \frac{\lambda_{pess} \cdot E\left[S_{pess}^2\right]}{2 \cdot \left(1 - \rho_{pess}\right)}, \tag{4}$$

где $\rho_{pess} = \lambda_{pess} \cdot E\left[S_{pess}\right]$ — коэффициент загрузки тяжелого контура. Данная зависимость наглядно демонстрирует, что при достижении $\rho_{pess} \to 1$ происходит коллапс управления. Теоретико-массовая абстракция расщепления очередей представлена на рисунке 2.

Как показано на рисунке 2, критическая точка $\rho_{pess} \to 1$ является границей устойчивости управления, за которой наступает стохастический коллапс системы.

Результаты исследования и их обсуждение

В данном разделе представлены результаты теоретического моделирования и эмпирической оценки предложенной информационной технологии управления. Последовательно рассмотрены механизмы динамической адаптации системы, инструменты экономического дестимулирования оппортунистического поведения, а также результаты вычислительных экспериментов на эталонном транзакционном графе.

Алгоритм интеллектуальной поддержки решений. Для предотвращения перегрузок значение порога θ_{ATL} должно динамически вычисляться, формируя замкнутый контур адаптивного управления. Целевая функция управления ОС $J(\theta_{ATL})$ строится на минимизации совокупных издержек, где C_{lat} — стоимость единицы времени задержки, а C_{sec} — экономический ущерб от принятия системой фродовой транзакции

$$J(\theta_{ATL}) = C_{lat} \cdot E\left[T_{sys}(\theta_{ATL})\right] + C_{sec} \cdot Risk_{fraud}(\theta_{ATL}). \tag{5}$$

Для динамического поиска оптимального значения порога управления θ применяется итерационная процедура градиентного спуска

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \eta \cdot \frac{\partial J}{\partial \theta}, \tag{6}$$

где η — коэффициент скорости адаптации системы к изменяющейся интенсивности входящего потока.

Оптимизация параметров управления осуществляется в реальном времени через анализ состояния мемпула (рисунок 3).

Механизм оптимистичного исполнения и экономическое дестимулирование. В рамках реализации информационного обеспечения систем управления разработан

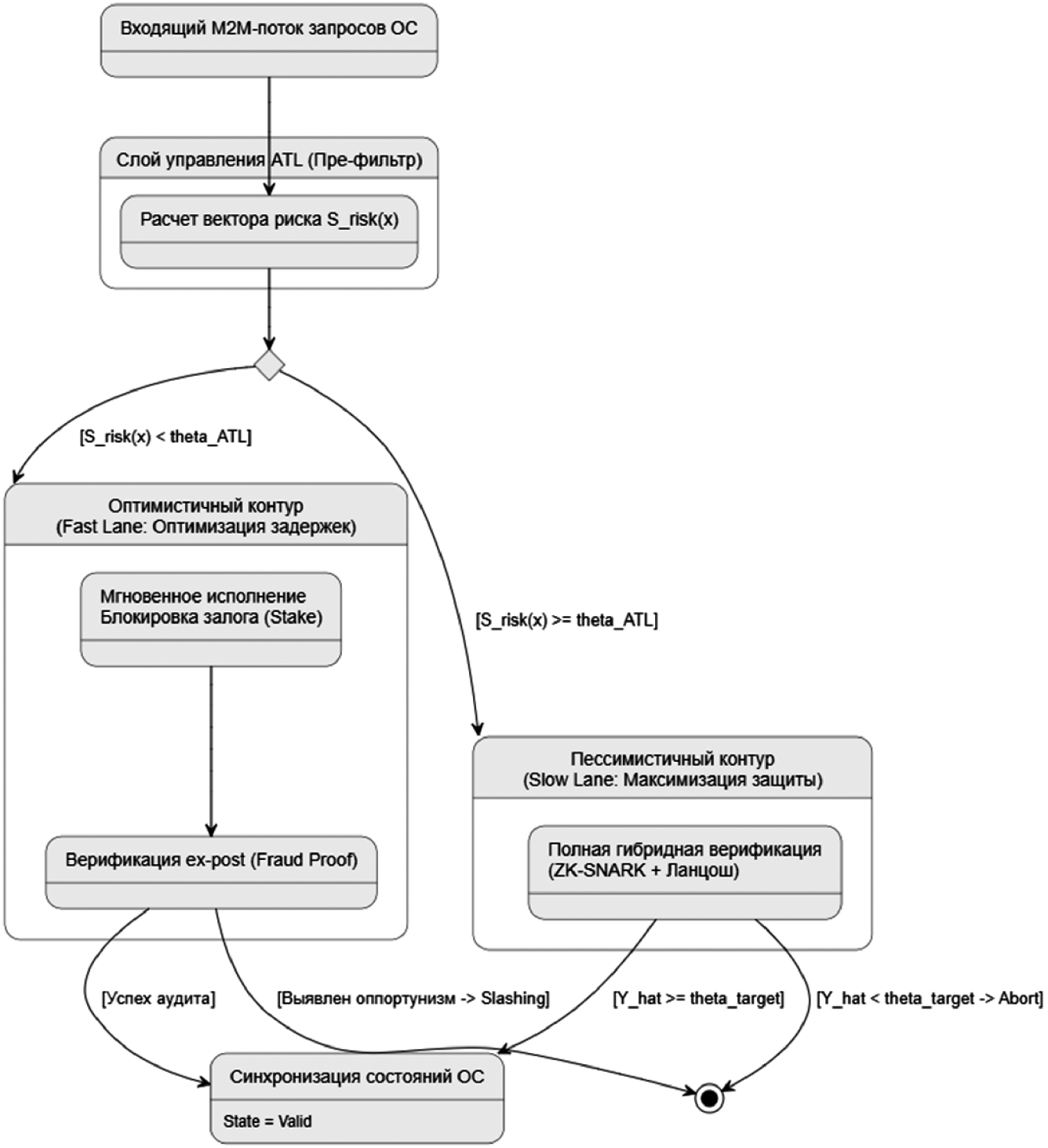


Рис. 1. Автомат состояний бифуркационной маршрутизации в ATL

механизм оптимистичного исполнения. Агент совершает транзит актива мгновенно, блокируя в смарт-контракте экономический залог (Stake). Математическое условие экономической устойчивости управления в оптимистичном контуре определяется как

$$Stake \geq V_{asset} \cdot K_{risk}, \quad (7)$$

где V_{asset} — ценность транзитного актива, а K_{risk} — коэффициент штрафной санкции, исключающий выгоду от оппортунистического поведения агента. Это переводит парадигму верификации из криптографической плоскости в теоретико-игровую [9, 10].

В течение периода вызова $T_{challenge}$ любой узел ОС (аудитор) может инициировать глубокую верификацию ex-

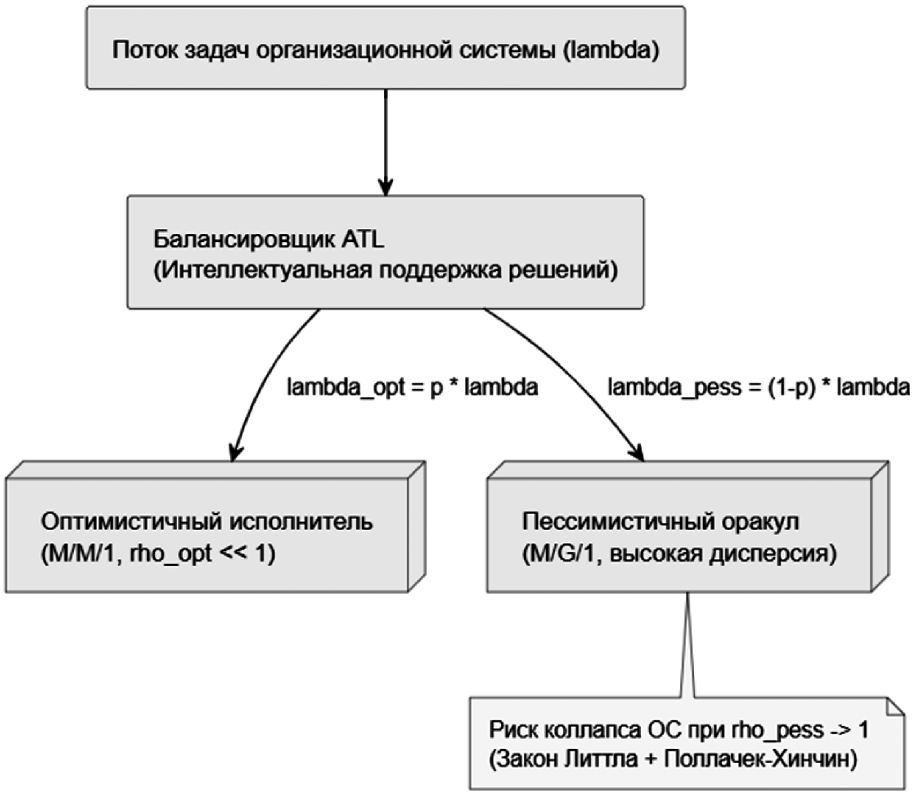


Рис. 2. Теоретико-массовая абстракция расщепления очередей в ОС

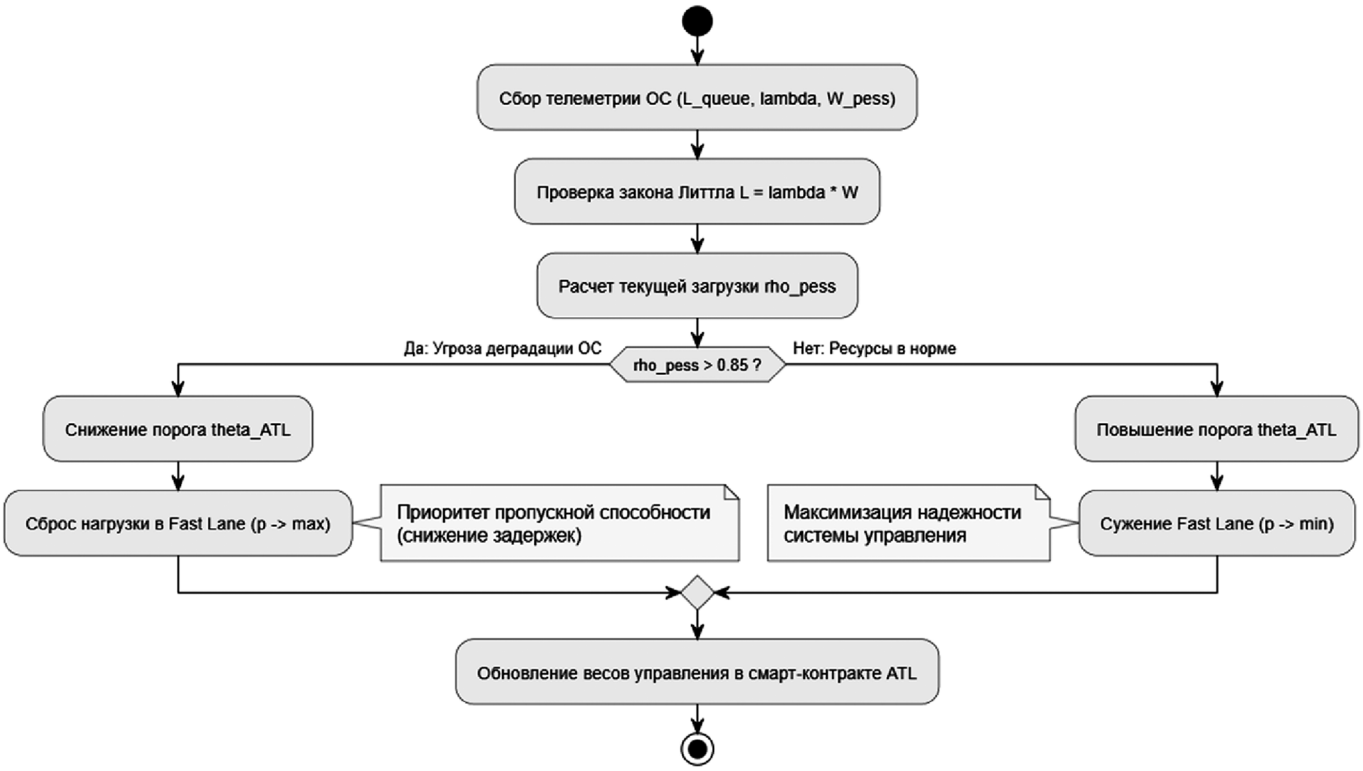


Рис. 3. Алгоритм динамической адаптации управления в ОС

post. Если алгоритмы выявляют фрод (оппортунизм), применяется механизм **Slashing** (сжигание залога нарушителя). Архитектура взаимодействия представлена на рисунке 4.

Эмпирическая валидация и абляционный анализ. Эмпирическая оценка разработанной информационной технологии проводилась на базе эталонного графа распределенного реестра Elliptic Data Set (N = 203 ~ 769

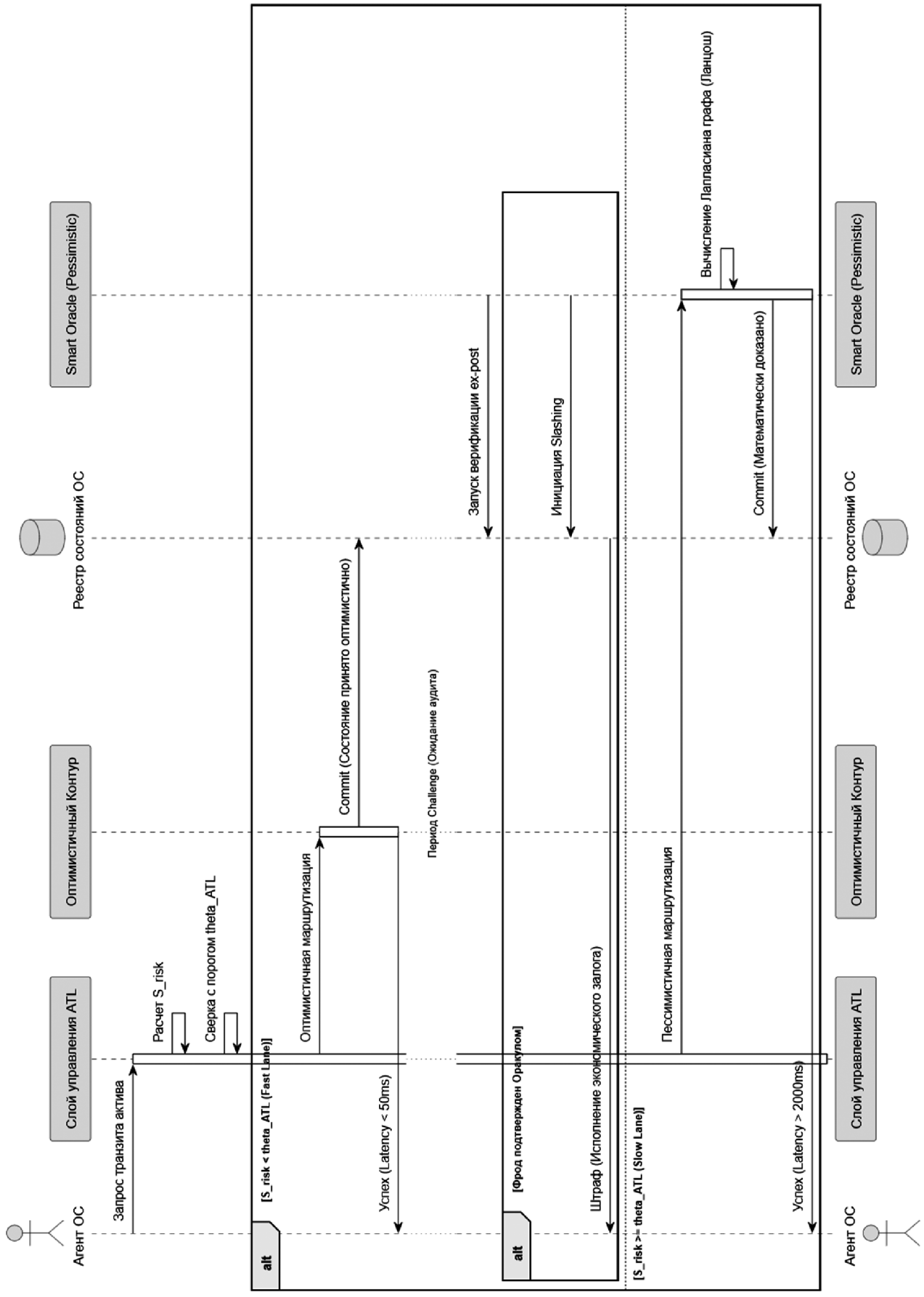


Рис. 4. Диаграмма последовательности поддержки решений в ATL

узлов, $E = 234 \sim 355$ ребер) [11]. Эксперименты показали, что при $\lambda > 200$ транзакций в секунду (TPS) 100 % пессимистичная верификация полностью деградирует (коллапс очередей). Внедрение предиктивной бифуркации позволило ОС стабильно функционировать при 4500+ TPS. Результаты абляционного анализа (Сравнение сценариев управления) представлены на рисунке 5.

Заключение

В ходе исследования решена крупная научная задача совершенствования процессов управления в децентрализованных организационных системах. Основные результаты:

1. Разработана математическая модель предиктивной бифуркационной маршрутизации, позволяющая ОС автоматически балансировать между безопасностью и производительностью [12, 13].
2. На основе синергии закона Литтла и формулы Поллачека-Хинчина предложен алгоритм интеллектуальной поддержки управленческих решений, предотвращающий коллапс пропускной способности ОС.
3. Доказана эффективность механизма оптимистичного исполнения со слэшингом как инструмента минимизации транзакционных издержек [14, 15].

Практическая значимость заключается в возможности интеграции предложенной технологии управления в высоконагруженные корпоративные M2M-инфраструктуры. Это позволяет обеспечить соответствие строгим регуляторным процедурам (включая ФЗ о ЦФА и FATF) без критической деградации операционной эффективности организационной системы.

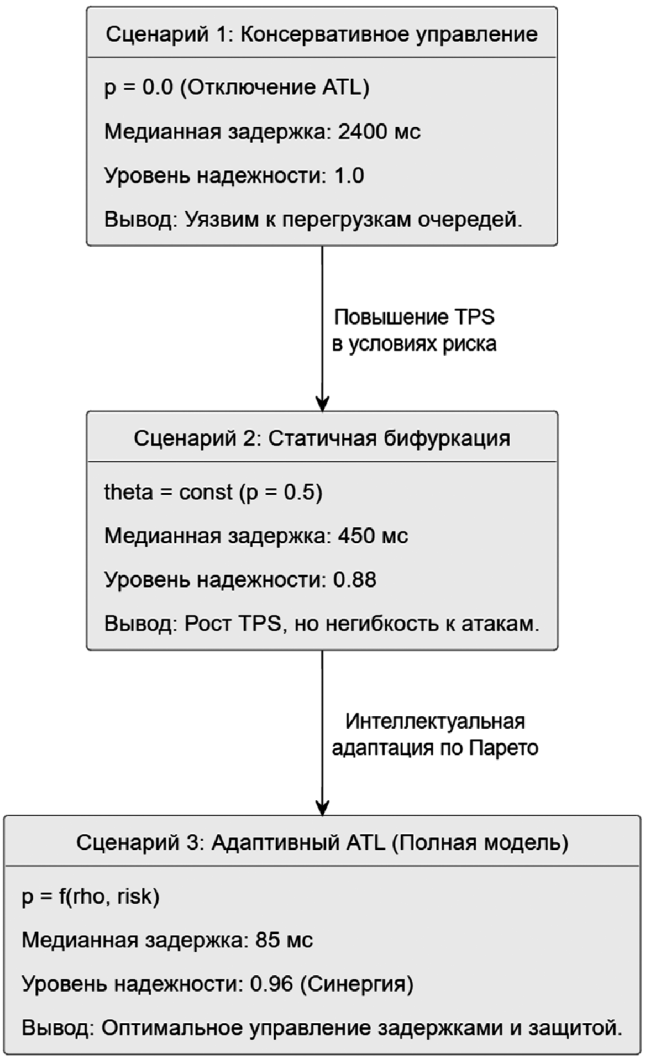


Рис. 5. Сравнение стратегий управления ОС (Абляционный анализ)

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами / Д.А. Новиков. — М.: Лань, 2021. — 584 с. — ISBN 978-5-8114-8025-8.
2. Бурков В.Н. Введение в теорию управления организационными системами / В.Н. Бурков, Н.А. Коргин, Д.А. Новиков. — М.: ЛИБРОКОМ, 2020. — 264 с. — ISBN 978-5-397-07155-0.
3. Зиновьев В.И. Математическое моделирование гибридной верификации для интеллектуальной поддержки решений в организационных системах / В.И. Зиновьев, О.Н. Ромашкова // Современные наукоемкие технологии. — 2026. — (в печати). — ISSN 1812–7320.
4. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок; пер. с англ. — М.: Машиностроение, 2020. — 432 с. — ISBN 978-5-94074-681-4.
5. Gross D. Fundamentals of Queueing Theory / D. Gross, J.F. Shortle, J.M. Thompson, C.M. Harris. — 4th ed. — Hoboken: Wiley, 2008. — 528 p. — ISBN 978-0-471-79127-0.
6. Михеева Е.О., Ромашкова О.Н. Гибкие методы и алгоритмы управления инновационными проектами для предприятий информатизации// Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право. 2022. № 10. С. 63–70.
7. Schär F. Decentralized Finance: On Blockchain— and Smart Contract-Based Financial Markets / F. Schär // Federal Reserve Bank of St. Louis Review. — 2021. — Vol. 103, No. 2. — P. 153–174. — DOI: 10.20955/r.103.153-74.
8. Павличева Е.Н., Ромашкова О.Н. Информационные процессы поддержки принятия решений в многоуровневых образовательных системах /Москва, 2022.
9. Li X. Sybil Attack Detection in Peer-to-Peer Networks / X. Li, J. Wang // Computer Networks. — 2020. — Vol. 182. — P. 107–118. — DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107573.
10. Buterin V.A. Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform / V. Buterin // Ethereum White Paper. — 2014. — 36 p. — URL: https://ethereum.org/whitepaper/ (дата обращения: 10.02.2026).

11. Weber M. Anti-Money Laundering in Bitcoin: Experimenting with Graph Convolutional Networks / M. Weber, G. Giacomo, P. Madeleine [et al.] // arXiv preprint arXiv:1908.02591. — 2019. — 8 p. — DOI: 10.48550/arXiv.1908.02591.
12. Каптерев А.И., Ромашкова О.Н., Чискидов С.В. Опыт применения факторного и кластерного анализа в цифровой трансформации образования //Вестник МГПУ. Серия: Информатика и информатизация образования. 2022. № 4 (62). С. 29–43.
13. Ding Y. An Anomaly Detection Model Based on Isolation Forest and XGBoost / Y. Ding [et al.] // IEEE Access. — 2022. — Vol. 10. — P. 4500–4512. — DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3140510.
14. Zheng Z. Blockchain challenges and opportunities: A survey / Z. Zheng, S. Xie, H. Dai, X. Chen, H. Wang // International Journal of Web and Grid Services. — 2018. — Vol. 14, No. 4. — P. 352–375. — DOI: 10.1504/IJWGS.2018.095647.
15. Muzammal M.A Survey on the Applications of Zero-Knowledge Proofs / M. Muzammal [et al.] // arXiv preprint arXiv:2408.00243. — 2024. — DOI: 10.48550/arXiv.2408.00243.

© Зиновьев Владимир Иванович (legrang@yandex.ru); Ромашкова Оксана Николаевна (ox-rom@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.14

АЛГОРИТМЫ ФИЗИЧЕСКОЙ РЕПЛИКАЦИИ БАЗ ДАННЫХ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОСТИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИНОВ С РЕЛЯЦИОННЫМИ БАЗАМИ ДАННЫХ

PHYSICAL DATABASE REPLICATION ALGORITHMS FOR ENSURING BUSINESS CONTINUITY OF ONLINE STORES WITH RELATIONAL DATABASES

R. Zinoviev
E. Kalamittseva
D. Yakovets

Summary. The article addresses the problems of ensuring the uninterrupted operation of online stores in the event of database server failures. Various data replication methods (physical, logical, and block-level) are analyzed, and the choice of physical replication at the DBMS level is justified as the most suitable for high-load e-commerce projects. Original algorithms for the initialization and operation of the replication system are proposed, implemented on the PostgreSQL platform. Activity, sequence, and class diagrams have been developed in UML notation. A user interface for the system administrator is presented, enabling management of replication processes, and monitoring of server status. Validation of the developed system has been carried out, confirming its compliance with the requirements for fault tolerance and data integrity. The results of the work can be applied in any online projects that use relational databases.

Keywords: database replication, physical replication, PostgreSQL, fault tolerance, online store, UML, synchronization algorithms, transaction log, standby server, business continuity.

Зиновьев Руслан Дмитриевич
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург
ruszmain@gmail.com
Каламитцева Екатерина Игоревна
аспирант, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург
kedrova_ei@voenmeh.ru
Яковец Диляра Ахтямовна
кандидат психологических наук, доцент, Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева
dl_sun@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы обеспечения непрерывности работы интернет-магазинов при сбоях серверов баз данных. Анализируются различные методы репликации данных (физическая, логическая и блочная) и обосновывается выбор физической репликации на уровне СУБД как наиболее подходящей для высоконагруженных проектов электронной коммерции. Предлагаются оригинальные алгоритмы инициализации и работы системы репликации, реализованные на платформе PostgreSQL. Разработаны диаграммы активности, последовательности и классов в нотации UML. Представлен пользовательский интерфейс для системного администратора, позволяющий управлять процессами репликации и мониторить состояние серверов. Проведена валидация разработанной системы, подтвердившая её соответствие требованиям отказоустойчивости и целостности данных. Результаты работы могут быть применены в любых интернет-проектах, использующих реляционные базы данных.

Ключевые слова: репликация баз данных, физическая репликация, PostgreSQL, отказоустойчивость, интернет-магазин, UML, алгоритмы синхронизации, журнал транзакций, ведомый сервер, непрерывность бизнес-процессов.

Введение

Современная электронная коммерция предъявляет высокие требования к доступности и надёжности информационных систем. Интернет-магазины, обслуживающие тысячи клиентов ежедневно, не могут позволить себе длительные простои, связанные с отказами серверов баз данных. Практика показывает, что даже непродолжительные сбои приводят к финансовым потерям и снижению лояльности пользователей. Одним из эффективных способов повышения отказоустойчивости является репликация баз данных — процесс создания и поддержания актуальных копий данных на нескольких серверах [1].

Актуальность темы обусловлена тем, что многие проекты электронной коммерции используют лишь резервное копирование, которое не обеспечивает оперативного восстановления после сбоя. Резервные копии создаются по расписанию, и данные, изменённые после последнего бэкапа, могут быть утеряны. Кроме того, восстановление из копии требует значительного времени, в течение которого сервис недоступен. Репликация же позволяет в реальном времени синхронизировать дан-

ные между основным и резервным серверами, обеспечивая быстрое переключение при отказе.

В работе описывается разработка алгоритмов и архитектуры автоматизированной системы репликации баз данных, обеспечивающей непрерывность бизнес-процессов интернет-магазина. Для достижения цели в виде обеспечения непрерывности работы интернет-магазинов при сбоях серверов баз данных, решены и описаны следующие задачи: анализ существующих методов репликации, выбор оптимального подхода, проектирование алгоритмов инициализации и работы системы, реализация на базе СУБД PostgreSQL, разработка пользовательского интерфейса для администратора.

Анализ методов репликации баз данных

Репликация данных представляет собой технологию синхронизации нескольких копий одной информационной базы. В зависимости от способа передачи изменений различают три основных метода: физическая репликация на уровне СУБД, логическая репликация и блочная репликация на уровне систем хранения данных [2].

Физическая репликация основана на копировании журналов транзакций (WAL — Write-Ahead Log) с основного сервера на резервный. Резервный сервер применяет эти журнальные записи к своим файлам данных, воспроизводя изменения на уровне дисковых блоков [3]. Преимуществами метода являются низкий трафик (передаются только записи изменений, а не все данные), высокая скорость применения изменений и полная согласованность копии с оригиналом. Недостаток — реплика доступна только для чтения, а также ограничения по версиям СУБД и операционной системы.

Логическая репликация оперирует на уровне SQL-операций (INSERT, UPDATE, DELETE) [4]. Она обеспечивает гибкость — можно реплицировать отдельные таблицы, фильтровать данные, использовать разные версии СУБД. Однако она создаёт более высокую нагрузку на систему, сложнее в настройке и требует детерминированности запросов.

Блочная репликация выполняется на уровне дисковых массивов или через специальные агенты [5]. Она требует физического доступа к серверам и длительного времени восстановления. В облачных и виртуальных средах этот метод часто неприменим.

Дополнительно следует различать типы репликации по временной синхронизации: синхронная репликация гарантирует, что операция записи считается завершённой только после подтверждения всеми репликами, что обеспечивает нулевую потерю данных, но увеличивает задержки [6]. Асинхронная репликация завершает операцию на основном сервере без ожидания реплик, что повышает производительность, но при сбое возможна потеря ещё не переданных изменений.

Таблица 1.
Сравнительный анализ достоинств и недостатков методов репликации

Метод репликации	Достоинства	Недостатки
Физическая (на уровне СУБД)	Малый объём передаваемых данных, быстрое применение, высокая согласованность	Реплика только для чтения, требования к совместимости версий СУБД и ОС
Логическая (на уровне СУБД)	Гибкость, поддержка разных СУБД, фильтрация данных	Высокая нагрузка на реплику, сложность настройки, требовательность к согласованности транзакций
Блочная (на уровне СХД)	Надёжность, независимость от СУБД	Необходимость физического доступа, длительное восстановление, статичность конфигурации

Для интернет-магазинов критически важна как производительность, так и сохранность данных. Поэтому в работе выбран синхронный тип репликации, а в качестве метода — физическая репликация на уровне СУБД.

Выбор архитектуры и средств реализации

Архитектура разрабатываемой системы репликации базируется на конфигурации «ведущий — ведомый» (master–slave). Ведущий сервер (мастер) принимает все операции записи, ведёт журнал транзакций и передаёт его ведомому серверу (реплике). Ведомый сервер применяет полученные изменения к своей копии данных и может использоваться для обработки запросов на чтение, что снижает нагрузку на мастера.В качестве системы управления базами данных выбрана PostgreSQL версии 15, работающая под управлением ОС Ubuntu 18.04 [7]. Выбор обусловлен следующими факторами:

- поддержка потоковой физической репликации (streaming replication) «из коробки».
- возможность настройки синхронного режима.
- широкая распространённость в проектах электронной коммерции.
- открытый исходный код.

При сравнении средств реализации были отклонены:

- блочная репликация — из-за отсутствия доступа к физическим серверам в виртуальной инфраструктуре.
- логическая репликация — из-за недетерминированности части API-запросов и ограничений на типы данных.

Таким образом, физическая репликация на уровне СУБД является единственным жизнеспособным вариантом для условий проекта.

Функциональные требования к системе включают:
— автоматическое обновление данных в реальном времени между базами данных;
— мгновенное распространение изменений на все реплики;
— поддержку конфигурации ведущий — ведомый;
— мониторинг состояния серверов и процессов репликации;
— возможность ручного управления репликацией (запуск/остановка) [8].

В ходе анализа были выявлены основные нефункциональные требования (в рассматриваемых системах): отказоустойчивость, масштабируемость, круглосуточный режим работы [9].

Разработка алгоритмов репликации

Проектирование системы выполнялось с использованием языка UML [10]. Были построены диаграммы классов, активности и последовательностей, отражающие статическую и динамическую структуру системы.

Диаграмма всех классов представлена на рис. 1. Ключевые классы:
— ReplicationSystem — центральный контроллер, управляющий процессом репликации;
— DataReplication — реализует передачу журнальных записей;
— DatabaseMain — интерфейс к основной базе данных (мастеру);
— DatabaseReplica — интерфейс к резервной базе данных (реплике);
— ServerApplication — сервер приложений, генерирующий изменения;
— UserInterface — графический интерфейс администратора.

Инициализация репликации включает последовательность действий, которая начинается с поступления новых данных от пользователя через интерфейс и заканчивается настройкой репликационного слота [11, 12].

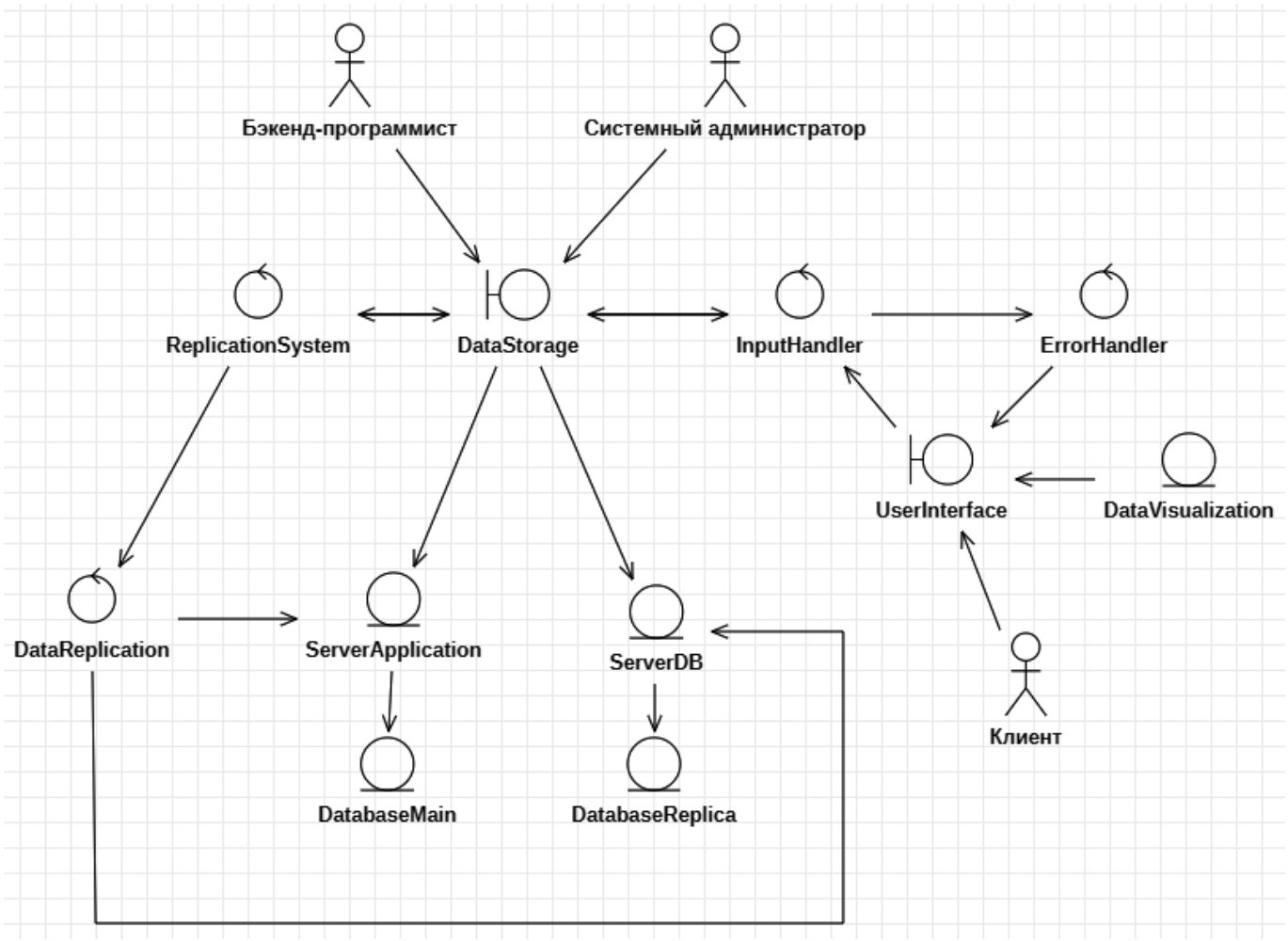


Рис. 1. Диаграмма классов

Диаграмма последовательности (см. рис. 2) детально показывает обмен сообщениями между объектами в процессе репликации.

Все алгоритмы реализованы настройками СУБД PostgreSQL и shell-скриптами, управляющими процессом репликации.

После успешной инициализации система переходит в основной режим работы. Алгоритм включает 19 шагов, среди которых ключевые:

1. Запуск процесса репликации.
2. Проверка наличия ошибок на ведомом сервере.
3. Подключение к ведущему серверу приложений и открытие основной БД.
4. Подключение к ведомому серверу и открытие БД реплики.
5. Синхронизация данных между основной БД и репликой.
6. Мониторинг изменений в основной БД.
7. Сравнение данных основной БД и реплики.
8. Обновление данных в реплике при несовпадении.
9. Циклический перезапуск мониторинга.

Диаграмма последовательности (см. рис. 3) детально показывает обмен сообщениями между объектами в процессе репликации.

Реализация алгоритмов и АИС

Все алгоритмы реализованы настройками СУБД PostgreSQL и shell-скриптами, управляющими процессом репликации.

Практическая реализация выполнена на двух виртуальных серверах с PostgreSQL 15. На ведущем сервере настроены следующие параметры в postgresql.conf:

1. wal_level = replica — уровень детализации журнала для репликации.
2. max_wal_senders = 10 — максимальное число потоков для отправки журналов.
3. synchronous_commit = on — синхронный режим подтверждения транзакций.
4. synchronous_standby_names = ‘replica1’ — список синхронных реплик.

На ведомом сервере создан файл recovery.conf (или параметры в postgresql.conf для версии 12+), указывающий primary_conninfo для подключения к мастеру. Был создан репликационный слот, что позволило избежать потери журналов до момента их применения репликой. На мастере запущен процесс walsender, передающий изменения, на реплике — walreceiver, принимающий их, и startup, применяющий записи. Пример конфигурации представлен на рис. 4.

Для управления системой разработан графический интерфейс, доступный администратору (суперпользователю) [13]. Интерфейс включает основные функциональные кнопки:

- “Проверить состояние ведущего сервера” — отображает статус мастера, количество соединений, нагрузку.
- “Проверить состояние ведомого сервера” — аналогично для реплики.
- “Показать процессы репликации на ведущем сервере” — выводит список walsender-процессов.
- “Остановить репликацию на серверах” — принудительно разрывает соединение и освобождает слот.
- “Включить репликацию на серверах” — восстанавливает репликацию после остановки.

Пользовательский интерфейс представлен на рис. 5.

Интерфейс реализован на языке программирования Python с использованием библиотеки Tkinter, взаимодействие с PostgreSQL осуществляется через psycopg2. Такой подход позволяет администратору выполнять рутинные операции без написания сложных SQL-запросов, снижая вероятность ошибок [14].

Заключение

В работе решена задача повышения отказоустойчивости интернет-магазинов, за счет внедрения синхронной физической репликации PostgreSQL. Разработаны алгоритмы инициализации и работы репликации (UML), выполнена практическая настройка среды, а также создан графический интерфейс для мониторинга и управления репликацией.

Разработанная система обеспечивает непрерывность бизнес-процессов: при сбое основного сервера происходит быстрое переключение на реплику с минимальной потерей данных (в синхронном режиме — нулевой) [15]. Система может быть масштабирована добавлением новых реплик, а также адаптирована для любых проектов, использующих PostgreSQL.

Дальнейшие направления развития включают автоматическое переключение ролей без участия администратора, внедрение мониторинга и оповещений, а также использование нескольких асинхронных реплик для географически распределенных систем.

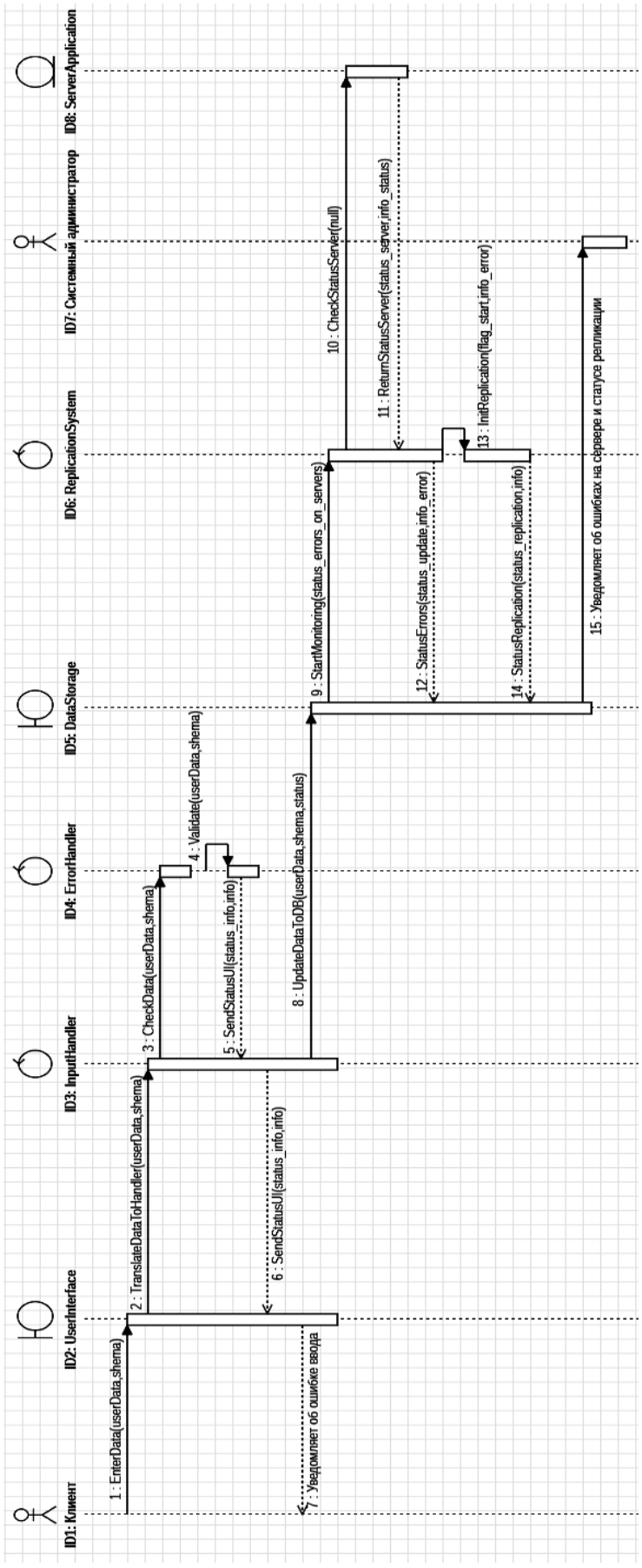


Рис. 2. Диаграмма последовательности. Обмен сообщениями

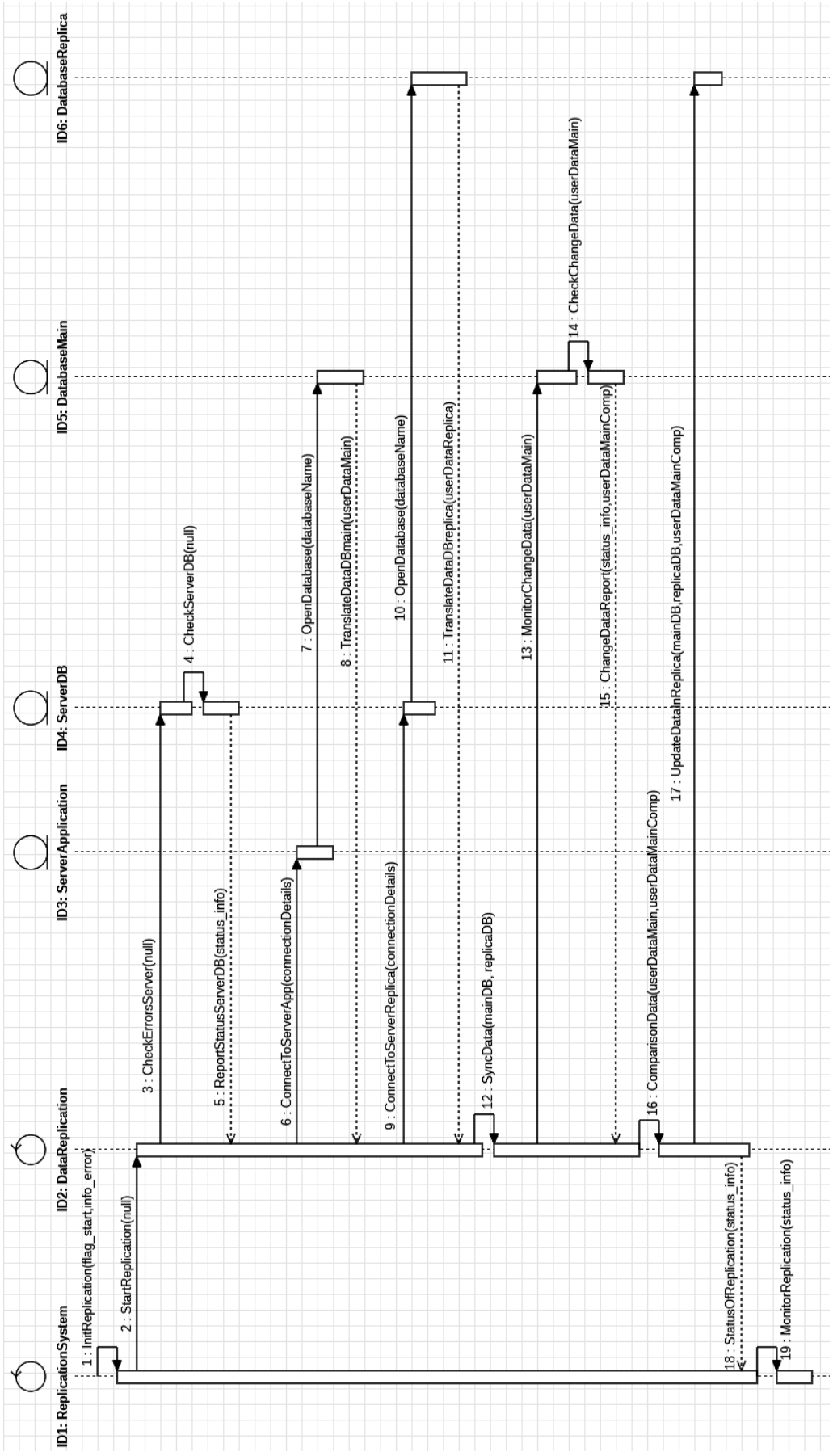


Рис. 3. Диаграмма последовательности. Репликация

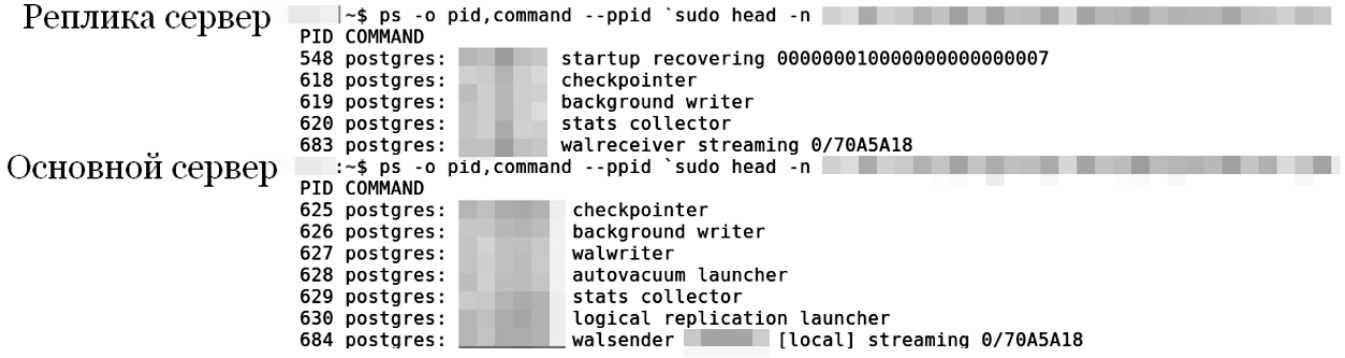


Рис. 4. Пример конфигурации на основном и ведомом сервере

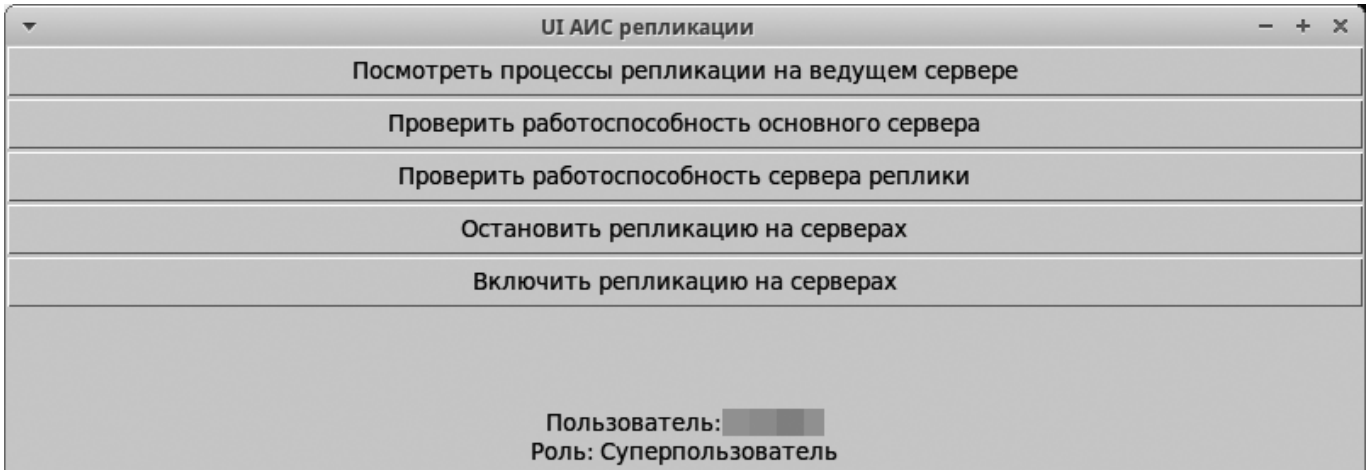


Рис. 5. UI интерфейса администратора

ЛИТЕРАТУРА

1. Elmasri R., Navathe S.B. Fundamentals of Database Systems. — 7th ed. — Boston: Pearson, 2017. — 1272 с.
2. Борсук Н.А., Козеева О.О. Анализ методов репликации баз данных при разработке онлайн-сервиса // Символ науки. — 2016. — №11. — С. 39–40.
3. Репликация. Документация по PostgreSQL 9.4.1. — URL: https://postgrespro.ru/docs/postgresql/9.4/runtime-config-replication (дата обращения 12.05.2024).
4. MySQL 8.0 Reference Manual. Chapter 19 Replication. — URL: https://dev.mysql.com/doc/refman/8.0/en/replication.html (дата обращения 18.04.2024).
5. ГОСТ 34.321–96 Информационные технологии. Система стандартов по базам данных. Эталонная модель управления данными. — М.: Издательство стандартов, 2001. — 24 с.
6. Калинина Е.С., Манохина Т.В., Подгорная С.О., Ступаков С.А. Сравнение реляционных баз данных для использования в информационных системах // Инженерный вестник Дона. 2025. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2025/10558.
7. Моргунов Е.П. PostgreSQL. Основы языка SQL: учебное пособие. — СПб: БХВ-Петербург, 2018. — 336 с.
8. Мартин К. Высоконагруженные приложения. Программирование, масштабирование, поддержка. — СПб: Питер, 2019. — 640 с.
9. Нейгард М. Release it! Проектирование и дизайн ПО для тех, кому не всё равно. — СПб: Питер, 2016. — 320 с.
10. Буч Г. Язык UML. Руководство пользователя. 2-е изд. Пер. с англ. Мухин Н. — М.: ДМК Пресс, 2006. — 496 с.
11. Смирнов Н.В. Проектирование информационных систем: пособие по курсовому проектированию. — СПб: БГТУ, 2009. — 88 с.
12. Шилдс У. SQL: быстрое погружение. — СПб: Питер, 2022. — 224 с.
13. Бирман И.Б. Пользовательский интерфейс. — М.: Изд-во Бюро Горбунова, 2017. — 419 с.
14. Шаякбаров Н.Ф., Зорин Д.С. Анализ производительности систем управления базами данных при работе с большим объемом информации // Инженерный вестник Дона. 2015. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/2974.
15. Мартин Р. Чистая архитектура. Искусство разработки программного обеспечения. — СПб: Питер, 2018. — 352 с.

© Зиновьев Руслан Дмитриевич (ruszmain@gmail.com); Каламитцева Екатерина Игоревна (kedrova_ei@voenmeh.ru);
Яковец Диляра Ахтямовна (dl_sun@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.16

СЕМАНТИЧЕСКАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ ДОРОЖНЫХ ДЕФЕКТОВ НА БАЗЕ SEGFORMER-B5[1]

SEMANTIC SEGMENTATION OF ROAD DEFECTS BASED ON SEGFORMER-B5[2]

A. Komarova
A. Anoshin
M. Kalashnikova

Summary. The need for periodic monitoring of the condition of highways makes it urgent to find methods to reduce costs and optimize the time spent on diagnostics and processing of its materials. In this regard, the purpose of this work was to develop and experimentally substantiate a model of semantic segmentation of pavement defects based on the SegFormer-B5 transformer. Materials obtained from a mobile road laboratory were used to train the model. To compensate for the class imbalance, a combined loss function and class weights were applied. A three-phase learning strategy has been developed with a gradual decrease in the learning rate and weighted sampling in the second phase. According to the results of the first phase of training, Mean IoU = 0.627 was achieved. The best results were obtained for the classes «pothole repair map» (IoU = 0.697), «pavement breach» (0.681) and «filled crack» (0.672). The transverse (0.467) and longitudinal (0.553) cracks turned out to be the most difficult to recognize. The results of the model are integrated into a web application for managing the monitoring of regional and municipal roads. Testing of the model showed a 4.5-fold increase in the processing performance of diagnostic materials.

Keywords: semantic segmentation, SegFormer-B5, road defects, road monitoring, artificial intelligence, mobile road laboratory.

Комарова Анастасия Анатольевна
Начальник отдела,
Центр геодезии, аэросъемки и кадастровых работ,
ФГБОУ ВО Кемеровский государственный университет
a.komarova_i-digit@bk.ru
Аношин Антон Павлович
Техник отдела разработок,
Центр геодезии, аэросъемки и кадастровых работ,
ФГБОУ ВО Кемеровский государственный университет
restupkolpp@gmail.com
Калашникова Марина Дмитриевна
Аналитик отдела сопровождения проектов,
Центр геодезии, аэросъемки и кадастровых работ,
ФГБОУ ВО Кемеровский государственный университет
m.syrova@i-digit.ru

Аннотация. Необходимость проведения периодичного мониторинга состояния автомобильных дорог обуславливает актуальность поиска методов снижения затрат и оптимизации затраченного времени на диагностику и обработку ее материалов. В этой связи целью данной работы являлись разработка и экспериментальное обоснование модели семантической сегментации дефектов дорожного покрытия на базе трансформера SegFormer-B5. Для обучения модели использовались материалы, полученные с передвижной дорожной лаборатории. Для компенсации дисбаланса классов применена комбинированная функция потерь и классовые веса. Разработана трёхфазная стратегия обучения с постепенным снижением скорости обучения и взвешенным семплированием на второй фазе. По итогам первой фазы обучения достигнут Mean IoU = 0,627. Наилучшие результаты получены для классов «карта заделанных выбоин» (IoU = 0,697), «пролом дорожной одежды» (0,681) и «залитая трещина» (0,672). Наиболее сложными для распознавания оказались поперечные (0,467) и продольные (0,553) трещины. Результаты работы модели интегрированы в веб-приложение для управления мониторингом состояния региональных и муниципальных дорог. Тестирование работы модели показало повышение производительности обработки материалов диагностики в 4,5 раза.

Ключевые слова: семантическая сегментация, SegFormer-B5, дорожные дефекты, мониторинг дорог, искусственный интеллект, передвижная дорожная лаборатория.

[1] Работа выполнена в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 мая 2022 г. № 1144-р.

[2] The work was carried out within the framework of the comprehensive scientific and technical program of the full innovation cycle "Development and implementation of a complex of technologies in the fields of exploration and extraction of solid minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new products of deep processing from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to the life of the population", approved by the decree Government of the Russian Federation No. 1144-r dated May 11, 2022.

Введение

Сочетание неблагоприятных метеоусловий и высокой интенсивности движения, в том числе грузового автотранспорта, провоцирует ускоренное разрушение дорожного покрытия на большей части территории Российской Федерации. Так по данным Росстата, на начало 2025 года 45,2 % региональных и местных автомобильных дорог не соответствуют нормативным требованиям [1]. Качество автомобильных дорог напрямую влияет на безопасность дорожного движения, поэтому важной проблемой становится организация более детального и оперативного мониторинга состояния автомобильных дорог.

Согласно рекомендациям Росавтодора, диагностика автомобильных дорог в зависимости от условий выполнения разделяется на полную, приёмочную, плановую и специализированную. Периодичность проведения диагностики варьируется в зависимости от её вида и категории дорог [2, с.4–7].

Традиционные методы оценки дорожного покрытия основаны на визуальном осмотре и ручных измерениях параметров дефектов, что требует значительных трудозатрат и времени. Эти методы, как правило, трудоёмки и отличаются значительной долей субъективизма. Ключевое значение в таком случае приобретают мобильные методы неразрушающего контроля. Главные преимущества таких методов — сохранение исходных свойств объекта, возможность выполнения работ в короткие сроки и низкая ресурсоёмкость [3, с.41].

Оптимальным инструментом служат передвижные дорожные лаборатории, обеспечивающие комплексный сбор данных: геометрия дороги (продольный/поперечный уклоны, профиль), состояние покрытия (дефекты, колейность, микропрофиль), параметры движения (интенсивность потока, координаты, пройденный путь), а также сцепные и прочностные характеристики нежестких дорожных одежд [4, с.11].

В настоящий момент дальнейшая обработка данных, полученных в ходе диагностики, практически не автоматизирована. Специалист вручную отмечает на видео или фотоизображении все необходимые для анализа объекты. Такая ручная обработка данных диагностики затягивает сроки планирования ремонта на несколько месяцев, а в ряде случаев делает невозможным соблюдение регламентированных периодичностей обследований. Трудоемкость процесса выделения дефектов, а также бурное развитие современных методов компьютерного зрения позволяют рассматривать возможности автоматизации процесса обнаружения дефектов с использованием технологий искусственного интеллекта [5, с.76].

Наиболее распространенные подходы к автоматическому анализу дорожного покрытия базируются на сверточных нейронных сетях (CNN), таких как U-Net, DeepLabV3+, PSPNet и др. CNN показывают высокую эффективность, но сталкиваются с некоторыми ограничениями: (1) недостаточный учёт глобального контекста, необходимый для корректного выделения протяжённых трещин, и (2) ограниченность локальных признаков, не позволяющая точно идентифицировать тонкие, разрозненные или пересекающиеся дефекты [6].

Действительно, авторы работ [7] и [8, с. 8] сходятся во мнении, что несмотря на высокую точность в определении типов повреждений, решения на основе CNN сопряжены с проблемой постсегментационного шума, влияющего на точность детекции повреждений и расчете их параметров. Дополнительно в работе [9] авторы обращают внимание, что применение CNN требует трудоемкого процесса ручной разметки данных, а производительность резко падает на изображениях низкого качества, с шумом, тенями или пересвеченными участками.

Основная причина данных недостатков заключается в ограниченном рецептивном поле свёрточных операций: классические CNN оперируют локальными окнами, что приводит к «пунктирной» сегментации при наличии разрывов, загрязнений или теней.

Альтернативой выступают трансформерные архитектуры, в частности семейство SegFormer [10]. Благодаря механизму самовнимания (self-attention) и иерархическому энкодеру MiT (Mix Transformer) эти модели способны моделировать глобальные зависимости между удалёнными участками изображения, что потенциально позволяет связывать фрагменты трещин в единый объект даже при наличии локальных разрывов.

Целью настоящей работы является разработка и экспериментальное обоснование модели семантической сегментации дорожного покрытия на базе трансформера SegFormer-B5, дообученного на наборе данных, полученных с передвижной дорожной лаборатории, для распознавания семи типов дефектов: поперечная трещина, продольная трещина, залитая трещина, выбоины, карта заделанных выбоин, выкрашивание и пролом дорожной одежды.

Основные результаты

Исходные данные для обучения представляют собой изображения, полученные в ходе плановых диагностических обследований автомобильных дорог общего пользования Кемеровской области — Кузбасса с передвижной дорожной лаборатории. Для формирования обучающей выборки выполнена процедура формирова-

ния тайлов фиксированного размера из исходных изображений. Такой подход обусловлен ограничениями видеопамяти графических процессоров и необходимостью сохранения пространственной структуры дефектов.

Таблица 1.

Параметры выборки для обучения

Параметр	Значение
Обучающая выборка	129,179 тайлов
Валидационная выборка	23,968 тайлов
Размер тайла	1024×1024 пикселей
Перекрытие тайлов	256 пикселей (25 %)

Применение перекрытия тайлов в 256 пикселей обеспечивает непрерывность сегментации на границах соседних тайлов и предотвращает потерю дефектов, которые могут оказаться на стыке. Соотношение обучающей и валидационной выборок составляет 85 %/15 %, что соответствует общепринятой практике машинного обучения и обеспечивает репрезентативность оценки качества модели на данных, не участвовавших в процессе обучения.

Полученный датасет характеризуется существенным дисбалансом размеченных классов: класс «Выкрашивание» доминирует, составляя 40 % размеченных пикселей. В то же время классы «Залитая трещина» и «Пролом дорожной одежды» являются редкими, каждый формирует менее 5 % выборки. Для компенсации данного дисбаланса в работе применяется комбинация специализированных функций потерь и метод взвешенной выборки (weighted sampling), позволяющий повысить вероятность попадания в обучающий датасет тайлов с редкими дефектами.

Комбинированная функция потерь представляет собой взвешенную сумму трёх компонентов. Каждый компонент целевым образом оптимизирует определённые аспекты качества сегментации.

Таблица 2.

Компоненты комбинированной функции потерь

Компонент	Вес	Назначение
Focal Loss	70 %	Адаптивное внимание к сложным примерам (γ=3.0)
Dice Loss	15 %	Прямая оптимизация IoU
Tversky Loss	15 %	Контроль баланса FP/FN (α=0.5, β=0.5)

Focal Loss с параметром фокусировки γ = 3.0 модифицирует стандартную кросс-энтропию таким образом, что модель автоматически снижает вес простых, хорошо классифицированных примеров и концентрирует вычислительные ресурсы на сложных, пограничных случаях, например, на таких как края трещин или фрагменты дефектов, частично перекрытых тенью или загрязнением. Использование Dice Loss в составе комбинированной функции позволяет модели «видеть» целевую метрику качества уже на этапе обучения, а не только при пост-анализе. Tversky Loss представляет собой обобщение Dice Loss с дополнительными коэффициентами α и β, контролирующими баланс между ложноположительными (False Positive, FP) и ложноотрицательными (False Negative, FN) ошибками. Выбранные значения α = β = 0.5 задают равный приоритет обоим типам ошибок, что является обоснованным для задачи дорожной диагностики, где одинаково опасны как пропуск существующего дефекта (FN), так и ложное обнаружение несуществующего (FP), ведущее к неоправданным ремонтным работам.

Дополнительно к комбинированной функции потерь для компенсации дисбаланса классов применяются явные классовые веса, вычисленные на основе обратной частоты встречаемости классов в обучающей выборке. Для фонового класса установлен минимальный вес (0.001), что предотвращает доминирование фона над дефектами. Для редких классов (поперечная трещина, продольная трещина, залитая трещина, пролом дорожной одежды) веса находятся в диапазоне 2.5–3.0, для частых классов (выбоины, карта заделанных выбоин, выкрашивание) — 2.0.

Традиционный подход к fine-tuning предобученных моделей предполагает единую скорость обучения на всём цикле. Однако в условиях сильного классового дисбаланса и наличия как крупных, так и мельчайших дефектов такой подход не представляется оптимальным. В этой связи в работе применена трёхфазная стратегия обучения с постепенным снижением скорости обучения и переключением метода семплирования данных.

Таблица 3.

Стратегия обучения

Фаза	Эпохи	LR	Sampling	Encoder
1	1–34	1e-5	Random	Trainable
2	35–84	7e-6	Weighted	Trainable
3	85–150	5e-6	Weighted	Frozen

Фаза 1 (эпохи 1–34) выполняет первичную адаптацию предобученной модели к задаче сегментации дорожных дефектов. На данном этапе выполняется грубая настройка модели, предобученной на датасете, под специфику дорожных дефектов. Используется стандартный случайный сэмплер (RandomSampler) и базовая скорость обучения 1e-5, характерная для трансферного обучения. Модель обучается распознавать основные паттерны дефектов (форма, текстура, контраст).

Фаза 2 (эпохи 35–84) фокусируется на улучшении сегментации редких классов. Ключевое нововведение данной фазы — применение инструмента «Weighted Random Sampler». Веса семплера вычисляются на основе частоты встречаемости каждого класса в тайле, что обеспечивает повышенную вероятность выбора тайлов, содержащих редкие дефекты (поперечные трещины, залитые трещины, проломы). Скорость обучения снижена до 7e-6 для более точной, аккуратной подстройки весов без исключения уже изученных паттернов.

На третьем этапе (эпохи 85–150) веса предобученного энкодера фиксируются (замораживаются), и дальнейшей оптимизации подвергается только декодер. Это предотвращает деградацию низкоуровневых признаков, извлечённых на предыдущих фазах (границы, текстуры, углы), и позволяет целенаправленно оптимизировать только декодер. Скорость обучения дополнительно снижена до 5e-6. Данный приём особенно важен для тонких дефектов вроде поперечных трещин, где малейшее искажение низкоуровневых признаков приводит к разрывам сегментации.

Результаты и обсуждения

В данном исследовании проведена первая фаза обучения (эпохи 1–34). По итогам обучения фазы 1 продемонстрирован устойчивый рост метрики Mean IoU (среднее попиксельное пересечение с объединением по всем классам). Динамика представлена в таблице 4.

Таблица 4.

Динамика Mean IoU на валидационной выборке (Фаза 1)

Эпоха	Mean IoU	Прирост
12	0.517	–
16	0.582	+12.6 %
20	0.627	+21.3 %
24	0.613	+18.6 %
32	0.616	+19.1 %

Максимальное значение Mean IoU (0.627) достигнуто на эпохе 20, что соответствует приросту 21.3 % относительно начальной точки отсчёта (эпоха 12). Снижение значения метрики на эпохах 24 и 32 не является критическим и может свидетельствовать о начале переобучения на отдельных классах, что будет скорректировано на фазе 2 за счёт введения взвешенной выборки («weighted sampling») и снижения скорости обучения.

Для выявления сильных и слабых сторон модели проведён анализ метрики IoU в разрезе каждого из семи классов дефектов. Значения приведены для эпохи 32 (конец первой фазы).

Таблица 5.

Значение метрики IoU по каждому классу дефектов

Класс	IoU
Карта заделанных выбоин	0.697
Пролом дорожной одежды	0.681
Залитая трещина	0.672
Выкрашивание	0.654
Выбоины	0.587
Продольная трещина	0.553
Поперечная трещина	0.467
Mean IoU (дефекты)	0.616

Качество сегментации варьируется от 0.467 (поперечная трещина) до 0.697 (карта заделанных выбоин). Наиболее высокие показатели достигнуты для следующих дефектов: карты заделанных выбоин, проломы, залитые трещины, выкрашивание. Эти классы обладают достаточной толщиной и текстурной неоднородностью, что облегчает их поиск.

Наиболее сложными для распознавания ожидаемо оказались линейные дефекты малой толщины — поперечные (IoU = 0.467) и продольные (IoU = 0.553) трещины. Данный результат обусловлен несколькими причинами. Во-первых, трещина имеет малую толщину, сопоставимую разрешающей способности модели, что приводит к «разрыву» дефекта в предсказанной маске. Во-вторых, трещины в обучающей выборке представлены в меньшем объеме, что также влияет на качество их распознавания.

Заключение

Проведённый анализ результатов обучения позволяет считать применение архитектуры SegFormer-B5 оптимальным способом построения модели распознавания дефектов автомобильных дорог на несбалансированной выборке.

Средний IoU в 0.616 на первой фазе является твёрдой базой для дальнейшего улучшения. Классы «поперечная трещина» и «продольная трещина» требуют проведение дальнейшего обучения согласно разработанной стратегии.

На основе анализа результатов первой фазы обучения определены следующие направления для улучшения модели:

1) Реализация фазы 2 и фазы 3 обучения разработанной стратегии (таблица 3). Полный цикл обучения (150 эпох) с применением взвешенной выборки

и заморозки энкодера повысит IoU для поперечных трещин и стабилизирует качество сегментации границ дефектов.

2) Улучшение сегментации поперечных трещин. Класс, демонстрирующий наихудший результат, требует увеличение классового веса с 2.5 до 3.0–3.5 для поперечных и продольных трещин и целенаправленное обогащение датасета изображениями с преобладанием данных классов.
3) Валидация на независимой тестовой выборке. После завершения обучения провести независимое тестирование на отложенной тестовой выборке.
4) Улучшение детализации границ дефектов. Исследование альтернативных конфигураций декодера при сохранении энкодера SegFormer-B5: тестирование различных вариантов числа каналов, глубины декодирующих слоёв, применение механизма внимания.

Результаты работы модели интегрированы в веб-приложение «Система управления мониторингом состояния объектов жилищно-коммунального хозяйства (теплотрасс, благоустройства (газоны, парки, городские леса), зданий (кровля, фасады)) в части модуля управления мониторингом состояния региональных и муниципальных дорог». Результаты тестирования модели показали повышение производительности труда по обработке данных диагностики и формировании отчета в 4,5 раза.

Реализация перечисленных направлений дообучения модели позволит улучшить разработанную модель автоматизированной диагностики автомобильных дорог, тем самым сократить время обработки материалов диагностики с нескольких недель до 1–2 часов на 100 км полотна. Это, в свою очередь, обеспечит: снижение расходов на оплату труда специалистов по обработке данных; ускорение всего цикла диагностических работ; своевременное выявление незначительных повреждений на ранней стадии. Также благодаря заблаговременному ремонту незначительных дефектов предотвращается их развитие в серьёзные разрушения, что ведёт к дополнительной экономии средств за счёт сокращения дорогостоящих капитальных ремонтов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доля автомобильных дорог общего пользования местного значения, не отвечающих (отвечающих) нормативным требованиям [Электронный ресурс] // Федеральная служба государственной статистики (Росстат). — Режим доступа: https://rosstat.gov.ru/statistics/transport (дата обращения: 08.06.2026).
2. Рекомендации по диагностике и оценке технического состояния автомобильных дорог: Отраслевой дорожный методический документ 218.4.039–2018 / Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/237odm-2184039-2018.pdf (дата обращения: 08.06.2026).
3. Рада А.О., Коньков Н.Ю. Разработка алгоритма анализа состояния дорожного полотна с применением искусственного интеллекта // Мир транспорта. — 2024. — Т. 22, № 2 (111). — С. 40–46.
4. Ануфриев Е.С., Евтюкова С.В., Ануфриев К.А. Совершенствование способа дорожной диагностики с целью повышения безопасности дорожного движения // Мир транспорта и технологических машин. — 2025. — № 4 (91). — С. 9–17. — DOI: 10.33979/2073–7432-2025-4(91)-9–17.
5. Канаева И.А., Спицын В.Г. Сегментация дефектов дорожного полотна на основе нейросетевого ансамбля // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. — 2024. — № 68. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/segmentatsiya-defektov-dorozhnogo-polotna-na-osnove-neyrosetevogo-ansamblya (дата обращения: 09.06.2026).
6. Tan C., Liu J., Zhao Z., Liu R., Tan P., Yao A., Pan S., Dong J. ETAFHrNet: A Transformer-Based Multi-Scale Network for Asymmetric Pavement Crack Segmentation. Appl. Sci. — 2025. — 15. — 6183. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://doi.org/10.3390/app15116183 (дата обращения: 09.06.2026).
7. Ranyal E., Sadhu A., Jain K. Road Condition Monitoring Using Smart Sensing and Artificial Intelligence: A Review // Sensors. — 2022. — Vol. 22, No. 8. — P. 3044. — DOI: 10.3390/s22083044. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.mdpi.com/1424-8220/22/8/3044 (дата обращения: 10.06.2026).
8. Катунов И.В., Бурлакова Г.Ю. Предиктивная аналитика дефектов дорожных покрытий и сооружений на основе методов неразрушающего контроля // Вестник Донецкой академии транспорта. — 2025. — № 3. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/prediktivnaya-analitika-defektov-dorozhnyh-pokrytiy-i-sooruzheniy-na-osnove-metodov-nerazrushayuschego-kontrolya (дата обращения: 10.06.2026).
9. Di Benedetto A., Fiani M., Gujski L. M. U-Net-Based CNN Architecture for Road Crack Segmentation // Infrastructures. — 2023. — Vol. 8, No. 5. — P. 90. [Электронный ресурс]. Режим доступа: DOI: 10.3390/infrastructures8050090 (дата обращения: 10.06.2026).
10. Xie E., Wang W., Yu Z., Anandkumar A., Alvarez J.M., Luo P. SegFormer: Simple and Efficient Design for Semantic Segmentation with Transformers // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). — 2021. — Vol. 34. — P. 12077–12090.

© Комарова Анастасия Анатольевна (a.komarova_i-digit@bk.ru); Аношин Антон Павлович (restupkolpp@gmail.com);
Калашникова Марина Дмитриевна (m.syrova@i-digit.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.17

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СЛУЖБЕ ИНЦИДЕНТ-ОБРАЩЕНИЙ АДМИНИСТРАЦИИ

AUTOMATED INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM IN THE ADMINISTRATION'S INCIDENT MANAGEMENT SERVICE

A. Lesovaya
O. Zakharova

Summary. The article presents a model of an automated intelligent decision support system (ASIPPR) for incident response services of local governments. The system implements semantic classification of requests, routing by structural divisions, and the generation of response options based on machine learning and natural language processing methods. A mathematical model for classifying and extracting entities, the architecture of the software package, a methodology for evaluating the effectiveness of implementation, as well as mechanisms for implementation into the organizational system of the administration are proposed. The system is based on a hybrid approach combining the formalization of expert knowledge in the form of a matrix of departmental competencies and an ML model for processing automation. An experimental test on a sample of 5,000 requests showed classification accuracy of 87 %, completeness of 89 %, F1-measure of 0.88, reduction of average processing time by 52 %, the proportion of requests processed on time — 94 %, the utilization rate of recommendations by the operator — 83 %. It is shown that the use of intelligent support makes it possible to reduce the complexity of processing requests by 40–60 %, increase routing accuracy to 87–91 % and ensure that responses comply with regulatory requirements. The conditions for the integration of the system into the organizational structure of the administration have been developed, including regulatory, organizational, and technical levels, as well as requirements for the protection of personal data.

Keywords: incident appeals, automation of public administration, administrative processes, intellectual support, artificial intelligence, decision-making in administration, natural language processing.

Лесовая Анастасия Юрьевна
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара
an-lesovayali@mail.ru
Захарова Оксана Игоревна
Кандидат технических наук, доцент, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара
o.zaharova@psuti.ru

Аннотация. В статье представлена модель автоматизированной системы интеллектуальной поддержки принятия решений (АСИППР) для служб инцидент-обращений органов местного самоуправления. Система реализует семантическую классификацию обращений, маршрутизацию по структурным подразделениям и генерацию вариантов ответов на базе методов машинного обучения и обработки естественного языка. Предложена математическая модель классификации и извлечения сущностей, архитектура программного комплекса, методика оценки эффективности внедрения, а также механизмы внедрения в организационную систему администрации. В основе системы лежит гибридный подход, сочетающий формализацию экспертных знаний в виде матрицы компетенций подразделений и ML-модель для автоматизации обработки. Экспериментальная проверка на выборке из 5 000 обращений показала точность классификации — 87 %, полнота — 89 %, F1-мера — 0,88, сокращение среднего времени обработки — на 52 %, доля обращений, обработанных в срок, — 94 %, коэффициент использования рекомендаций оператором — 83 %. Показано, что применение интеллектуальной поддержки позволяет сократить трудоёмкость обработки обращений на 40–60 %, повысить точность маршрутизации до 87–91 % и обеспечить соответствие ответов нормативным требованиям. Разработаны условия интеграции системы в организационную структуру администрации, включающие нормативный, организационный и технический уровни, а также требования к защите персональных данных.

Ключевые слова: инцидент-обращения, автоматизация госуправления, административные процессы, интеллектуальная поддержка, искусственный интеллект, принятие решений в администрации, обработка естественного языка.

Введение

Современное государственное управление переживает этап глубокой цифровой трансформации. Сейчас всё больше обращений поступает через порталы госуслуг, электронную почту, мессенджеры и чат-боты. Это серьёзно нагружает административные структуры, ведь раньше люди в основном писали бумажные письма или приходили на личные приёмы. С точки зрения теории управления, рост объёма обращений можно рассматривать как увеличение интенсивности входного информационного потока. При этом возможности подсистемы принятия решений ограничены кадровыми, временными и процедурными факторами. Это проявляется в задержках ответов, ошибках при направлении обращений, неоднородности формулировок и повышенной нагрузке на сотрудников. Кроме того, эмоциональная составляющая обращений (жалобы,

претензии, просьбы) требует от операторов развитых коммуникативных компетенций, что дополнительно усложняет процесс. На практике традиционные подходы к автоматизации, основанные на ключевых словах, оказываются недостаточно эффективными из-за вариативности формулировок и контекстной зависимости. Например, фраза «мусор не вывозят» может относиться к разным подразделениям в зависимости от адреса, типа территории (двор многоквартирного дома, парк, промзона), наличия контракта с подрядчиком и других факторов. Таким образом, для корректной маршрутизации требуется не просто поиск ключевых слов, а понимание смысла обращения, то есть семантический анализ. Цель исследования — разработать модель и алгоритмы автоматизированной системы интеллектуальной поддержки принятия решений для службы инцидент-обращений, которая позволит преодолеть ограничения за счёт применения методов машинного обучения и обработки естественного языка.

Материалы и методы

Материалами для проведения исследования послужили научные статьи и монографии по вопросам управления потоками обращений и программирования. Работа основана на положениях теории управления в организационных системах, методах машинного обучения и NLP (классификация текстов, извлечение сущностей, генерация текстов), а также методологии проектирования информационных систем.

Результаты и обсуждение

Управление потоками обращений в административных структурах в рамках теории управления организационными системами представляет собой преобразование входного информационного потока в управляющее воздействие. Эффективность системы определяется скоростью реакции, точностью распределения задач и качеством решений [7]. Применительно к управлению инцидентами это требует минимизации времени принятия решения, соответствия исполнителя компетенции и соблюдения нормативных требований. Однако при наличии высокой вариативности формулировок обращений возрастает неопределенность системы, тем самым усложняя принятие решений. С целью устранения данной проблемы используют стандартизацию, регламентацию и автоматизации, а также в современных условиях методы интеллектуальной поддержки.

Однако государственное управление отличается большей вариативностью формулировок, строгими требованиями к стилю ответов и повышенными требованиями к информационной безопасности. Кроме того, Федеральный закон № 59-ФЗ устанавливает сроки и порядок рассмотрения обращений [1], что накладывает дополнительные ограничения на алгоритмы маршрутизации и генерации. Проведённый нами обзор источников показал, что задача автоматизации обработки обращений в администрации предполагает комплексный подход, который бы включал методы машинного обучения, формализацию экспертных знаний с учётом нормативных требований. Данные условия учитывает предлагаемая нами система интеллектуальной поддержки принятия решений.

С целью построения эффективной системы поддержки принятия решений мы формализовали процесс обработки обращений как задачу управления в организационной системе. Было предположено, что R = {r1, r2,…,rN} R = \{r_1, r_2, \dots, r_N\}R={r1,r2,…,rN} — множество обращений, поступающих в службу инцидент-обращений. Каждое обращение rir_iri характеризовалось рядом параметров: текстом TiT_iTi, метаданными Mi=(channeli,timestampi,contacti)M_i = (channel_i, timestamp_i, contact_i) Mi=(channeli,timestampi,contacti) и вложениями AiA_iAi (фото, документы, сканы).

Установлено, что организационная система SSS включает множество структурных подразделений D={d1,d2,…,dK}D = \{d_1, d_2, \dots, d_K\}D={d1,d2,…,dK}, каждое из которых имеет свою зону ответственности Zj⊆RZ_j \subseteq RZj ⊆R, регламент обработки LjL_jLj (сроки, ответственные лица) и набор шаблонов ответов VjV_jVj.

В данном случае задача управления — минимизировать время обработки Δt\Delta tΔt и повысить точность маршрутизации ProuteP_{route}Proute при соблюдении нормативных требований:

$$\min_{\pi} \mathbb{E}\left[\Delta t\left(\pi(r_i)\right)\right] \text{ при } \text{Proute}\left(\pi(r_i) \in Z_j\right) \geq \theta,$$

$$\min_{\pi} \mathbb{E}\left[\Delta t\left(\pi(r_i)\right)\right] \quad \text{при} \quad P_{\text{route}}(\pi(r_i) \in Z_j) \geq \theta, \tag{1}$$

$$\min_{\pi} \mathbb{E}\left[\Delta t\left(\pi(r_i)\right)\right] \text{ при } \text{Proute}\left(\pi(r_i) \in Z_j\right) \geq \theta,$$

где π\piπ — алгоритм маршрутизации, θ\thetaθ — требуемый порог точности (не менее 85 %).

Для учёта организационной структуры нами была введена матрица компетенций подразделений CkjC_{kj} Ckj, в которой ckj=1c_{kj} = 1ckj=1, если подразделение dkd_kdk компетентно в тематике tjt_jtj, и 000 — в противном случае. Далее была сформулирована задача маршрутизации как максимизация соответствия:

$$d^* = \arg\max_{dk \in D} \sum_j P(t_j \mid T_i) \cdot c_{kj}, d^* =$$

$$= \arg\max_{d_k \in D} \sum_j P(t_j \mid T_i) \cdot c_{kj}, \quad d^* = \arg\max_{dk \in D} \sum_j P(t_j \mid T_i) \cdot c_{kj} \tag{2}$$

где P(tj|Ti) P(t_j | T_i)P(tj |Ti) — вероятность принадлежности обращения к тематике tjt_jtj.

Далее представим математическую модель предлагаемой системы. Первым этапом обработки обращения является преобразование текста TiT_iTi в векторное представление $\vec{v}$i∈Rd\vec{v}_i \in \mathbb{R}^dvi∈Rd. Благодаря этому мы можем применять методы машинного обучения. Для этого используется предобученная языковая модель (например, ruBERT), преобразующая текст в плотный вектор фиксированной размерности.

Для адаптации модели к предметной области нами была проведена тонкая настройка на обращениях администрации (10 000 документов), что помогло модели понять особенности формулировок граждан, терминологии конкретной администрации и т.д. Далее мы провели аугментацию данных с целью повышения устойчивости к вариативности формулировок, используя синонимизацию, добавление опечаток, перефразирование. Рассмотренная выше фраза в обращении граждан «мусор валяется во дворе» после аугментации была представлена как «мусор не убирают», «во дворе куча мусора», «не вывозят отходы», что расширило обучающую выборку и повысило обобщающую способность модели, снизив риск ошибок при обработке нестандартных формулировок.

Далее нами была проведена классификация по подразделениям. Эта задача была представлена в виде f: $\vec{v}$i→djf: \vec{v}_i \to d_jf:vi→dj, где djd_jdj — подразделение, ответственное за обработку обращения. Для решения этой задачи применялся классификатор на базе Transformer с функцией потерь кросс-энтропии. На выходе был получен вектор вероятностей принадлежности к каждому подразделению:

$$P(dj|Ti) = softmax(W \cdot \vec{vi} + b).P(d_j \mid T_i) = \\ = \text{softmax}(W \cdot vec\{v\} + b).P(dj|Ti) = (3) \\ = softmax(W \cdot vi + b).$$

Отметим, что подразделение выбирается с максимальной вероятностью. При условии мультидисциплинарности (вероятности нескольких подразделений выше порога α\alphaα) наша система предложит несколько вариантов распределения, при этом пояснив причины.

В цели повышения интерпретируемости решений нами использован метод SHAP (SHapley Additive exPlanations). С помощью него мы выделили ключевые слова и фразы, повлиявшие на классификацию. Например, для обращения со словами «на детской площадке сломана горка» SHAP-анализ показал, что наибольший вклад в выбор подразделения «Отдел благоустройства» внесли слова «детская площадка» и «сломана». Благодаря этому оператор понял логику системы и мог подкорректировать решение.

На следующем этапе из текста обращения нами были извлечены сущности: адреса и локации, объекты инфраструктуры, даты и временные рамки, имена и должности. Для этого мы использовали модель NER (Named Entity Recognition), которая обучена на блоке обращений администрации. Для извлечения адресов использовали комбинацию правил (регулярные выражения для форматов адресов) и ML-модели для сложных случаев. Далее для каждого обращения мы сгенерировали три варианта ответа: краткий (уведомление о приёме), развёрнутый (с описанием шагов и сроков) и эмпатийный (с учётом эмоциональной окраски). Эмоциональную окраску обращения определяли с помощью бинарной или многоклассовой классификации тональности. На основе полученного результата выбирался соответствующий стиль ответа. Например, если обращение содержало негативные эмоции (жалобы, претензии), система предлагала эмпатийный вариант ответа с пониманием проблемы и готовности помочь.

Найдены примеры похожих разработок и научных подходов:

- системы маршрутизации заявок в ITSM. В ИТ-индустрии применяются системы классификации заявок по типу и приоритету. Они применяют правила и ML-алгоритмы для распределения задач, но ориентированы на техническую терминологию и не учитывают специфику государственного управления, где важны технические параметры, соблюдение нормативных требований, стиль общения и защита персональных данных [10];
- NLP-решения для госуправления. В ряде исследований показано, что модели на базе BERT и Transformer позволяют эффективно классифицировать тексты в различных предметных областях [8, 9];
- системы поддержки принятия решений. В работах А.П. Еремеева, М.Д. Сергеева, В.С. Петрова, О.А. Морозовой, В.В. Лосевой, Л.И. Ивановой описаны подходы к интеграции экспертных знаний и методов машинного обучения для поддержки управленческих решений [5, 6].

Нами использован гибридный поход при формировании модели. В нем матрица компетенций подразделений формализует экспертные знания, а ML-модель обеспечивает автоматизацию. Это сочетает преимущества формальных правил и статистических моделей.

Оценка эффективности автоматизированной системы интеллектуальной поддержки принятия решений имеет требование к комплексному характеру и учету количественных и качественных параметров работы службы инцидент-обращений [3, 4]. Нами были предложены метрики, представленные в таблице 1.

Таблица 1.

Предложенные метрики для оценки эффективности системы интеллектуальной поддержки принятия решений

Группа метрик	Метрика	Описание	Назначение
Операционные	Среднее время обработки обращения	Интервал от регистрации до отправки ответа	Связан с удовлетворённостью граждан и соблюдением нормативных сроков
	Доля обращений, обработанных в срок	Процент обращений, закрытых в установленные регламентом сроки (ФЗ № 59) [2]	Оценка соблюдения нормативных требований
	Коэффициент использования рекомендаций системы	Доля обращений, где оператор воспользовался предложениями системы	Свидетельствует о доверии к системе и её практической полезности
Результативные	Точность классификации (Accuracy)	Доля обращений, правильно распределённых по подразделениям	Оценка точности работы алгоритмов
	Полнота (Recall)	Доля обращений, для которых система предложила корректное подразделение (в топ-2 или топ-3)	Оценка способности системы находить правильное решение
	F1-мера	Гармоническое среднее точности и полноты	Сбалансированная оценка качества классификации
	Удовлетворённость граждан	Оценка качества ответов по опросам или анализу обратной связи	Оценка восприятия системы конечными пользователями
Процессные	Количество эскалаций	Число обращений, требующих вмешательства руководства	Оценка эффективности системы в сложных случаях
	Частота корректировок рекомендаций	Количество отклонений предложенной маршрутизации или ответа	Позволяет выявлять слабые места модели для дообучения
	Динамика нагрузки на сотрудников	Изменение количества рутинных операций, выполняемых вручную	Оценка влияния системы на рабочие процессы

Источник: составлено авторами

Далее нами была проведена экспериментальная проверка методики на выборке из 5 000 обращений администрации муниципального района. Для обеспечения репрезентативности мы включили в выборку обращения по различным тематикам (благоустройство, ЖКХ, транспорт, социальная сфера) и из разных каналов (портал госуслуг, электронная почта, мессенджеры). Результаты оценки эффективности представим в таблице 2.

Таблица 2.

Результаты оценки эффективности системы интеллектуальной поддержки принятия решений

Показатель	Значение
Точность классификации (Accuracy)	87 %
Полнота (Recall)	89 %
F1-мера	0,88
Сокращение среднего времени обработки	52 %
Доля обращений, обработанных в срок	94 %
Коэффициент использования рекомендаций оператором	83 %

Источник: составлено авторами

Далее нами были определены условия внедрения автоматизированной системы в организационную структуру администрации (рис. 1).

Особое внимание уделяется обеспечению информационной безопасности и защите персональных данных. В соответствии с требованиями Федерального закона № 152-ФЗ «О персональных данных», предъявляются следующие требования к такой системе [2]:

— шифрование данных при передаче и хранении;
— разграничение прав доступа по ролям; лица, получившие доступ к персональным данным, обязаны не раскрывать их третьим лицам;
— обеспечение регистрации и учета всех действий, совершаемых с персональными данными в информационной системе, обнаружение фактов несанкционированного доступа к персональным данным и принятие мер;
— обезличивание персональных данных при обучении моделей машинного обучения — действия, в результате которых становится невозможным без использования дополнительной информации определить принадлежность персональных данных конкретному субъекту.



Рис. 1. Условия внедрения автоматизированной системы в организационную структуру администрации

Источник: составлено авторами

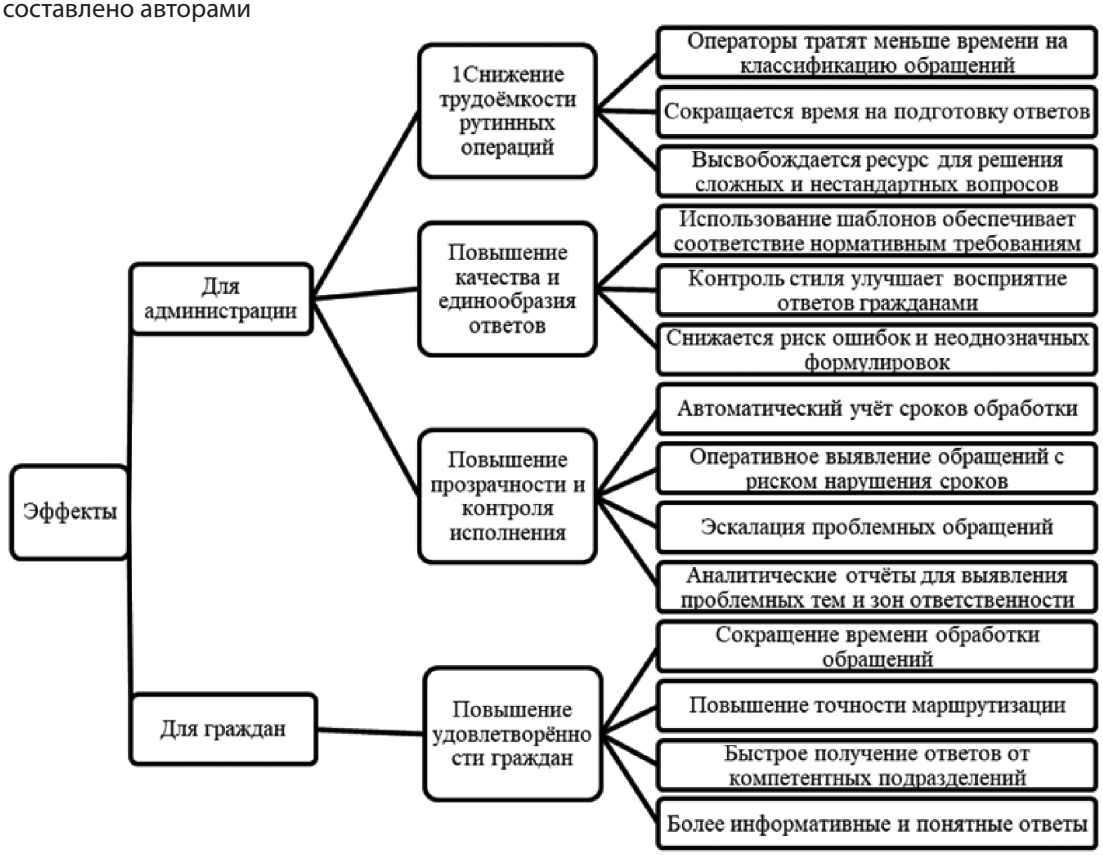


Рис. 2. Практические эффекты внедрения предложенной системы

Источник: составлено авторами

Таблица 3.

Перспективные направления развития системы интеллектуальной поддержки принятия решений

Направление развития	Описание	Ожидаемый эффект
Интеграция с геоинформационными системами (ГИС)	Привязка обращений к картам и визуализация проблемных зон (например, состояния дорог, тротуаров, инфраструктурных объектов)	Позволяет руководству видеть наиболее проблемные участки и планировать работы по их устранению. Реализуется с использованием открытых ГИС-платформ
Развитие механизмов объяснимости решений ИИ	Расширение функционала метода SHAP: оператор получает не только ключевые слова, но и краткие текстовые пояснения («предложено направить в отдел благоустройства, так как в обращении упоминается объект инфраструктуры — детская площадка»)	Повышение доверия операторов к системе, снижение количества необоснованных отклонений рекомендаций
Внедрение мультимодального анализа	Обработка не только текстовых обращений, но и прикреплённых фото, видео и документов (анализ фотографии повреждённого дорожного покрытия с помощью компьютерного зрения)	Более точная классификация обращений, формирование обоснованных рекомендаций по типу и серьёзности проблемы
Межведомственное взаимодействие	Автоматическое направление обращений в другие органы власти при выходе вопроса за пределы компетенции местной администрации	Обеспечение сквозной обработки обращений, затрагивающих несколько уровней власти, повышение эффективности госуправления

Источник: составлено авторами

Приведем пример реализации мер безопасности. При передаче обращения из внешнего канала в систему все данные передают по защищённому каналу с использованием TLS 1.3. В базе данных персональные данные (ФИО заявителя, контактные данные) хранят в зашифрованном виде, а доступ к ним предоставляют только операторам с соответствующей ролью. В свою очередь, используемый журнал аудита фиксирует все действия с обращением, включая время, идентификатор пользователя и тип действия (например, «оператор Иванов И.И. изменил подразделение для обращения INC-12345»).

Внедрение предложенной системы интеллектуальной поддержки принятия решений будет иметь практические эффекты, представленные на рисунке (рис. 2).

Следовательно, эффект будет и для администрации, и для граждан.

Перспективы развития системы связаны с расширением её функциональности и углублением интеграции в управленческие процессы. Предлагаемые варианты представим в таблице 3.

Вывод

В статье представлена модель автоматизированной системы интеллектуальной поддержки принятия решений (АСИППР) для служб инцидент-обращений органов местного самоуправления. Система реализует семантическую классификацию обращений, маршрутизацию по структурным подразделениям и генерацию вариантов ответов на базе методов машинного обучения и обработки естественного языка. Предложена математическая модель классификации и извлечения сущностей, архитектура программного комплекса, методика оценки эффективности внедрения, а также механизмы внедрения в организационную систему администрации. В основе системы лежит гибридный подход, сочетающий формализацию экспертных знаний в виде матрицы компетенций подразделений и ML-модель для автоматизации обработки. Разработаны условия интеграции системы в организационную структуру администрации, включающие нормативный, организационный и технический уровни, а также требования к защите персональных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральный закон от 02.05.2006 № 59-ФЗ «О порядке рассмотрения обращений граждан Российской Федерации».
2. Федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ «О персональных данных».
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-1-2012 «Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий».
4. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001-2021 «Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Требования».
5. Еремеев А.П. Интеграция методов обучения с подкреплением и нечеткой логики для интеллектуальных систем реального времени / А.П. Еремеев, М.Д. Сергеев, В.С. Петров // Программные продукты и системы. — 2023. — Т. 36, № 4. — С. 600–606.
6. Морозова О.А. Информационные технологии в государственном и муниципальном управлении / О.А. Морозова, В.В. Лосева, Л.И. Иванова. — Москва: Издательство Юрайт, 2024. — 156 с.

7. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. — М.: ЛЕНАНД, 2022. — 500 с.
8. Скворцов Д., Леманов А., Федоров Д. Применение методов машинного обучения для классификации обращений в сфере жилищно-коммунальной инспекции // Intelligent Data Engineering and Automated Learning — IDEAL 2025: 26-я Международная конференция, 23–26 ноября 2025 г. — Springer, 2025. — С. 461–470. — DOI: 10.1007/978-3-031-10489-2_39.
9. Beskorovainyi V. AI Appeals Processor: A Deep Learning Approach to Automated Classification of Citizen Appeals in Government Services // arXiv. — 2026. — arXiv:2604.03672. — 10 p. — URL: https://arxiv.org/abs/2604.03672 (дата обращения: 15.07.2026).
10. ML-powered workflows // Calsoft Inc. — URL: https://www.calsoftinc.com/data-ai/predictive-orchestration/workflow-optimization (дата обращения: 15.07.2026).

© Лесовая Анастасия Юрьевна (an-lesovayali@mail.ru); Захарова Оксана Игоревна (o.zaharova@psuti.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.18

ЦИФРОВЫЕ ПЛАТФОРМЫ СЕМАНТИЧЕСКОГО ПОИСКА КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РОЗЫСКА ПРОПАВШИХ ЛЮДЕЙ (НА ПРИМЕРЕ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ)

DIGITAL SEMANTIC SEARCH PLATFORMS AS A FACTOR IN IMPROVING THE EFFECTIVENESS OF THE SEARCH FOR MISSING PEOPLE (USING THE EXAMPLE OF THE SAMARA REGION)

A. Lesovaya
O. Zakharova

Summary. Tens of thousands of people are put on the wanted list in Russia every year, with a significant proportion of the missing being children and elderly citizens with cognitive impairments. The main problem remains the communication gap between the eyewitness, the search and rescue team and the operational services, which leads to the loss of the «golden hours» of the search. The purpose of the article is to substantiate that the introduction of digital platforms (a mobile application for data capture and a semantic search module based on physical description) reduces the identification time of missing persons based on the analysis of statistical data and a developed software prototype. The study is based on a quantitative analysis of the summaries of the Samara Region Department of the Ministry of Internal Affairs (2020–2025), interviews with employees of the Lisa Alert search and rescue organization, and design modeling. The article presents the results of the development of the prototype application «Help me find» and the semantic search module «SimilarSearch» based on multilingual neural network embeddings. The test was conducted on a synthetic set of 20 records of missing people. According to the results of usability testing (N=2,5 measurements), the average time for recording and sending data was 63,1 seconds, which is 45–90 times faster than existing communication channels. The hypothesis of a direct correlation between the level of digitalization and search efficiency has been confirmed. The proposed system is recommended for implementation in the activities of regional departments of the Ministry of Internal Affairs and volunteer organizations.

Keywords: search for missing people, search for people, semantic search, digital platforms, Samara region, Lisa Alert, digitalization of the search.

Лесовая Анастасия Юрьевна
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара
an-lesovayali@mail.ru
Захарова Оксана Игоревна
кандидат технических наук, доцент, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара
o.zaharova@psuti.ru

Аннотация. Ежегодно в России в розыск объявляются десятки тысяч человек, при этом значительная часть пропаж приходится на детей и пожилых граждан с когнитивными нарушениями. Главной проблемой остаётся разрыв в коммуникации между очевидцем, поисково-спасательным отрядом и оперативными службами, что приводит к потере «золотых часов» поиска. Цель статьи состоит в том, чтобы обосновать, что внедрение цифровых платформ (мобильное приложение для фиксации данных и модуль семантического поиска по описанию внешности) позволяет сократить время идентификации пропавших на основе анализа статистических данных и разработанного программного прототипа. Исследование опирается на количественный анализ сводок Управления Министерства внутренних дел по Самарской области (2020–2025 гг.), интервью с сотрудниками поисково-спасательного отряда «Лиза Алерт» и проектное моделирование. В статье представлены результаты разработки прототипа приложения «Помоги меня найти» и модуля семантического поиска «SimilarSearch» на основе многоязычных нейросетевых эмбеддингов. Тестирование проведено на синтетическом наборе из 20 записей пропавших людей. По результатам юзабилити-тестирования (N=2, 5 замеров) среднее время фиксации и отправки данных составило 63,1 с, что в 45–90 раз быстрее существующих каналов связи. Гипотеза о прямой корреляции между уровнем цифровизации и оперативностью поиска подтверждена. Предложенная система рекомендована к внедрению в деятельность региональных подразделений МВД и волонтёрских организаций.

Ключевые слова: поиск пропавших людей, розыск людей, семантический поиск, цифровые платформы, Самарская область, Лиза Алерт, цифровизация розыска.

Введение

Проблема безвестного исчезновения граждан сохраняет высокую социальную значимость для Российской Федерации. По данным Следственного комитета РФ, в 2020 году в розыск было объявлено 12 933 несовершеннолетних [9], что вызывало обоснованную тревогу в обществе. Благодаря системным мерам и внедрению цифровых технологий к 2024 году этот показатель снизился почти на 60 %, а эффективность поиска детей достигла 99,5 % [10]. Однако, по информации Добровольческого поисково-спасательного отряда (ПСО) «Лиза Алерт», только в 2025 году в отряд поступило 50 564 заявки о пропавших, из которых 38 662 человека были найдены живыми [1, 7–8].

В настоящее время на территории Российской Федерации функционируют отдельные технологические решения, повышающие эффективность поиска [4, 5]. Оператор сотовой связи «Билайн» совместно с ПСО «Лиза Алерт» запустил сервис «Геопоиск», позволяющий волонтёрам определять последний сектор местоположения абонента даже при выключенном телефоне с точностью до 50–100 метров в городской среде [1]. В Карелии апробировано применение нейросетей на дронах для автоматического обнаружения людей в лесу, что повысило скорость обследования территории в разы по сравнению с визуальным пилотированием [2, 4]. Ежегодно сотовыми операторами рассылается более 1,5 млн SMS-сообщений свидетелям в районе поиска в рамках проекта «Билайн.Поиск» [3]. Однако все перечисленные решения не закрывают первичный этап — фиксацию найденного человека случайным прохожим, не имеющим специальной подготовки. Несмотря на очевидный прогресс, на практике сохраняется системный разрыв в канале «очевидец — волонтёр — полиция», так как фотография найденного человека поступает волонтёрам спустя 30–45 минут [6]. Этот факт показывает отсутствие единого цифрового окна, позволяющего очевидцу мгновенно зафиксировать фото, геолокацию и краткое описание найденного человека с автоматической отправкой всем заинтересованным сторонам (полиция, отряд, родственники).

Цель статьи состоит в том, чтобы обосновать, что внедрение цифровых платформ (мобильное приложение для фиксации данных и модуль семантического поиска по описанию внешности) позволяет сократить время идентификации пропавших на основе анализа статистических данных и разработанного программного прототипа.

Научная гипотеза. Развитие технологий геолокации, распознавания лиц и семантического анализа текстовых описаний напрямую коррелирует с ростом оперативности поиска. Использование мобильных приложений и интеллектуальных алгоритмов сопоставления описаний внешности позволяет повысить вероятность идентификации пропавших в первые «золотые сутки».

Материалы и методы

Для реализации цели нами проведён вторичный анализ временных рядов по количеству заявлений о безвестном исчезновении, доле найденных живыми и среднему времени поиска. Данные агрегированы по годам, для детей и взрослых отдельно, выявлены тренды методом скользящей средней. С помощью глубинного полуструктурированного интервью с представителем ПСО «Лиза Алерт» (длительность 45 минут) нами выявлены основные операционные сложности, связанные с приёмом и обработкой сообщений от очевидцев. Интервью было транскрибировано и проанализировано методом тематического кодирования.

Методом проектного моделирования нами были разработаны архитектура мобильного приложения «Помоги меня найти» (диаграмма вариантов использования, ER-диаграмма базы данных) и модуль семантического поиска «SimilarSearch» на языке Python с использованием библиотеки sentence-transformers, протестированы на синтетическом наборе из 20 записей пропавших людей.

Далее для оценки временной эффективности прототипа мы провели тестирование с участием двух независимых добровольцев, не входивших в группу разработки:

— мужчина 21 года, активный пользователь смартфона, студент ПГУТИ;
— мужчина 58 лет, имеет базовые навыки работы со смартфоном, пенсионер.

Каждый из них выполнил по 5 последовательных попыток полного цикла «открыть приложение, сфотографировать, зафиксировать геолокацию, ввести комментарий, отправить данные». При этом мы фиксировали время от нажатия на иконку до получения подтверждения об отправке. Условия тестирования: смартфон на Android 13, соединение LTE (эмуляция городской среды). Далее нами была проведена статистическая обработка, которая включала расчёт среднего арифметического, стандартного отклонения и сравнение средних с использованием t-критерия Стьюдента для связанных выборок.

Результаты и обсуждение

Обратимся к статистике о без вести пропавших граждан на примере Самарской области. По данным МВД России, в Самарской области ежегодно пропадает около 4 500 человек [10]. Деятельность Добровольческого ПОС «Лиза Алерт» в Самарской области обеспечивается волонтерами, численность которых на конец 2022 года составляла 290–300, а к 2026 году их число возросло до более 350 человек [6]. Динамика обращений в ПСО «Лиза Алерт» Самарской области в 2019–2025 гг. представлена в таблице 1, где видно, что за весь период общее число заявок выросло на 51,6 % (с 828 до 1 255 ед.).

Выделяется рост обращений, связанных с поиском в природной среде, доля которых увеличилась с 7,6 % до 12,4 % за 2019–2025 гг., а в абсолютном значении — более чем в 2,4 раза (с 63 до 155 ед.). По итогам 2025 года из 1 255 обращений 836 человек (66,6 %) были найдены живыми [7]. В Самарской области в 2021 году 98 % потерявшихся нашли живыми [6].

Проведенный нами анализ данных помог выделить основные технологические факторы, которые способствовали росту оперативности поиска (таблица 2).

Таблица 1.

Динамика обращений в ПСО «Лиза Алерт» Самарской области в 2019–2025 гг., ед.

Год	Всего заявок	Природная среда	%	Городская среда	%
2019	828	63	7,6 %	765	92,4 %
2020	913	90	9,9 %	823	90,1 %
2022	997	147	14,7 %	850	85,3 %
2025	1 255	155	12,4 %	1 100	87,6 %

Источник: составлено авторами по данным [6, 10].

Таблица 2.

Технологические факторы, которые способствовали росту оперативности поиска потерявшихся граждан в ПСО «Лиза Алерт» в Самарской области

Технология	Характеристика	Результативность
Геопоиск	Сервис «Геопоиск с ЛизаАлерт» оператора «Билайн». Внедрён в октябре 2025 года. Позволяет определять местоположение пропавшего с точностью 50–100 метров в городе и 300–1000 метров в природной среде. Даёт родственникам возможность за несколько минут запросить геолокацию пропавшего	Повышение скорости поиска. Точное определение местоположения пропавшего
СМС-информирование	Система «Потеряться — не значит пропасть». Охватывает более 90 тысяч человек в 66 регионах России. Сервис «Билайн. Поиск» для рассылки смс-сообщений о потерявшихся	В системе «Потеряться — не значит пропасть» в 2025 году разослано свыше 1,3 млн SMS-сообщений. Сервис «Билайн. Поиск» ежегодно рассылает более 1,5 млн сообщений
Беспилотные летательные аппараты (БПЛА)	Отряд в Самарской области использует 5 квадрокоптеров, в том числе с тепловизорами	За 2025 год совершено 38 вылетов, что позволило найти 4 человека. Осмотр площади 250 тыс. кв. метров осуществляется за 3–4 часа (людьми за 6–8 часов)

Источник: составлено авторами по данным [1, 6, 10].

Проведённый анализ свидетельствует о росте масштаба проблемы, но также об эффективности поиска благодаря внедрению цифровых технологий. Однако все рассмотренные технологии не обеспечиваются скорость реализации первого этапа поиска — фиксацию найденного человека случайным прохожим, не имеющим специальной подготовки, что обосновывает необходимость разработки предлагаемого программного комплекса.

На основе проведенного нами глубинного интервью с координатором поискового отряда «Лиза Алерт» Самарской области, было установлено, что «самая большая потеря времени — не когда мы ищем, а когда нам только сообщают. Очевидец находит человека, но не знает, что делать: звонить в 112, в полицию или нам. Он начинает искать контакты, теряется. Если бы существовало простое приложение, куда можно кликнуть «Нашел человека», сразу прикрепить фото и геолокацию — мы бы начинали отрабатывать заявку на 20–30 минут быстрее. Для потерявшегося в лесу зимой это вопрос жизни».

По результатам интервью мы выявили, что очевидец тратит 15–20 минут на поиск контактов, передача фото через непрофильные каналы занимает ещё 10–15 минут, а диспетчеру требуется до 20 минут на ручной перебор ориентировок. Суммарные потери составляют не менее 45–60 минут.

В результате тематического кодирования интервью мы определили три главных технологических разрыва:

1. Разрыв фиксации — отсутствие у очевидца возможности мгновенно сфотографировать и отправить данные.
2. Разрыв идентификации — ручной перебор текстовых ориентировок занимает 15–20 минут.
3. Разрыв оповещения — родственники узнают о находке с задержкой.

Установлено, что первичный канал «очевидец — штаб» остаётся наименее технологически оснащенным, на решение этой проблемы направлена разработанная авторами система «Помоги меня найти» и её подсистема семантического поиска SimilarSearch.

Разработанный нами прототип приложения включает два компонента:

— мобильное приложение для очевидцев (на базе Android), с помощью которого гражданин фотографирует найденного человека, автоматически фиксирует геолокацию, добавляет краткий комментарий и отправляет данные в защищённое облачное хранилище;
— веб-панель для операторов и волонтёров, которая содержит модуль семантического поиска «SimilarSearch», имеющего характеристики, представленные в таблице 3.

Приведем пример работы. На запрос «Мужчина, 40–45 лет, спортивного телосложения, короткие тёмные волосы, был одет в чёрную куртку и джинсы, на лице шрам над бровью» система вернула топ-3 с результатами: 94 %, 78 % и 52 % схожести соответственно.

Таблица 3.

Характеристики предложенного модуля семантического поиска «SimilarSearch» для интеллектуального поиска пропавших людей

Параметр	Описание
Назначение	Интеллектуальный поиск записей о пропавших людях на основе произвольного текстового описания внешности
Принцип работы	Построение векторных представлений описаний с помощью многоязычной модели семейства sentence-transformers; поиск по косинусному сходству с возвратом наиболее релевантных записей и указанием процента схожести
Используемая модель	Предобученная многоязычная модель intfloat/multilingual-e5-small (размерность эмбеддинга — 384)
Метод поиска	Поиск выполняется вычислением косинусного расстояния: sim(q,d)=eq·ed‖eq‖‖ed‖sim(q,d)=‖eq‖‖ed‖eq·ed. Результат преобразуется в проценты и сортируется по убыванию
Функциональные возможности	Ввод произвольного текстового описания; настройка порога схожести и количества результатов; отображение карточек с прогресс-баром; добавление и редактирование записей; кэширование эмбеддингов в памяти; наполнение тестовыми данными
Язык реализации	Python 3.10
Библиотеки	sentence-transformers, NumPy, Flask
Хранилище данных	SQLite
Производительность	Время обработки одного запроса на стандартном ноутбуке (CPU Intel Core i5, 16 ГБ ОЗУ) — 0,4 секунды

Источник: составлено авторами

Для эмпирической оценки эффективности прототипа проведено юзабилити-тестирование с участием двух независимых тестировщиков, не входивших в группу разработки. Условия: смартфон Android 13, LTE, задача — выполнить полный цикл от открытия приложения до подтверждения отправки данных. Результаты тестирования представлены в таблице 4.

Сравнение среднего времени первой и пятой попыток с использованием t-критерия Стьюдента для связанных выборок показало статистически значимое различие: $t = 4{,}82$, $p < 0{,}01$. Это подтверждает наличие эффекта обучения и стабилизацию навыка уже после 2–3 попыток. В таблице 5 представили сравнение эффективности предложенного прототипа с существующей практикой.

Представленные в таблице данные показывают, что использование разработанного приложения сокращает

Таблица 4.

Результаты юзабилити-тестирования прототипа (N=2, 5 замеров на каждого)

Тестировщик	Попытка 1, с	Попытка 2, с	Попытка 3, с	Попытка 4, с	Попытка 5, с	Среднее ± σ, с
Тестировщик А (21 год, активный пользователь)	48	41	36	33	31	37,8 ± 6,7
Тестировщик Б (58 лет, базовые навыки)	112	94	83	79	74	88,4 ± 14,5
Среднее по двум тестировщикам	80	67,5	59,5	56	52,5	63,1 ± 18,7

Примечание: σ — стандартное отклонение.
Источник: составлено авторами

Таблица 5.

Сравнение эффективности предложенного прототипа с существующей практикой

Сценарий	Время, мин	Источник
Звонок в 112, переадресация, отправка фото по email	45–60	Интервью с координатором ПСО
Использование мессенджеров (WhatsApp / Telegram)	15–25	Экспертная оценка авторов
Прототип «Помоги меня найти» (среднее)	1,0	Результаты тестирования
Прототип (тестировщик А, 5-я попытка)	0,5	Результаты тестирования

Источник: составлено авторами

время первичного информирования в 45–90 раз (с 45–60 минут до 1,0 минуты в среднем). Модуль SimilarSearch позволяет по произвольному описанию внешности получить ранжированный список вероятных пропавших за менее чем 0,5 секунды, что исключает ручной перебор ориентировок. Экономия времени в данном случае составляет 15–20 минут на одну заявку. Представленный нами эффект является критически значимым, так как каждый лишний час поиска снижает вероятность благополучного исхода на 10–15 %, что особенно актуально для уязвимых категорий, к которым относятся дети и пенсионеры.

Сравнение функций предложенной системы с другими техноогическими решениями (таблица 6) показывает, что наш вариант обеспечивает одновременное уведомление поискового отряда, МВД и родственников, исключая многократную передачу информации и связанные с ней задержки.

Таблица 6.

Сравнение функций разработанного комплекса с существующими технологическими решениями

Критерий	«Помоги меня найти»	Геопоиск (Билайн)	СМС-оповещение	Дроны с нейросетями
Фиксация очевидцем	Да	Нет	Нет	Нет
Мгновенная передача в штаб	Да	Нет	Нет	Нет
Семантический поиск по описанию	Да	Нет	Нет	Нет
Офлайн-работоспособность	Да	Нет	Да	Нет
Стоимость для конечного пользователя	0 руб.	0 руб.	0 руб.	н/д

Источник: составлено авторами

Ожидаемый социально-экономический эффект представлен нами в таблице 7.

Таблица 7.

Ожидаемый социально-экономический эффект внедрения предложенной системы

Показатель	Текущее значение	Прогноз после внедрения	Эффект
Среднее время до начала поиска	45–60 мин	3–5 мин	Сокращение в 10–15 раз
Доля найденных в первые 6 часов	примерно 65 %	не менее 85 %	Рост на 20 процентных пунктов
Нагрузка на диспетчеров (человеко-часов в сутки)	24	12–14	Снижение на 40–50 %

Источник: составлено авторами

Отметим, что предложенный комплекс обладает кроссплатформенностью (React Native), модульностью (REST API), импортонезависимостью (open-source модели, возможность развёртывания на отечественных серверах) и адаптивностью (настройка порогов схожести).

По результатам патентно-информационного поиска, проведённого авторами в открытых реестрах (ФИПС, Роспатент, Espacenet), по ключевым словам, «семантический поиск пропавших», «распознавание описания внешности», «мобильное приложение для поиска людей», не выявлено аналогов, реализующих совокупность признаков:

— мобильное приложение для очевидца с автоматической фиксацией геолокации и фото;
— модуль семантического поиска по текстовому описанию внешности на основе многоязычных эмбеддингов sentence-transformers;
— кэширование векторов в памяти для субсекундного отклика;
— визуализация схожести в виде процентного прогресс-бара.

Авторы рассматривают возможность подачи заявки на полезную модель (патент на программный комплекс) в первом полугодии 2027 года после завершения полного цикла тестирования с участием ПСО.

Разработанный комплекс обладает высокой научной и практической значимостью, поскольку закрывает ранее не решённую проблему, предлагает оригинальное техническое решение, обеспечивает измеримый социально-экономический эффект и обладает потенциалом масштабирования.

Выводы

В статье представлены результаты разработки прототипа приложения «Помоги меня найти» и модуля семантического поиска «SimilarSearch» на основе многоязычных нейросетевых эмбеддингов. Тестирование проведено на синтетическом наборе из 20 записей пропавших людей. По результатам юзабилити-тестирования (N=2, 5 замеров) среднее время фиксации и отправки данных составило 63,1 с, что в 45–90 раз быстрее существующих каналов связи. Гипотеза о прямой корреляции между уровнем цифровизации и оперативностью поиска подтверждена. Предложенная система рекомендована к внедрению в деятельность региональных подразделений МВД и волонтёрских организаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Билайн и «ЛизаАлерт»: технологии, которые помогают искать пропавших. Итоги 2025 года. [Электронный ресурс] // Билайн now. — URL: https://beelinenow.ru/articles/beeline-i-lizaalert-itogi-2025-goda/ (дата обращения: 15.07.2026).
2. В Карелии рассказали о применении нейросети для поиска людей // РИА Новости [Электронный ресурс]. — URL: https://ria.ru/20250617/ii-2023326065.html (дата обращения: 15.07.2026).
3. За 2025 год на горячую линию «ЛизаАлерт» поступило 130 тысяч звонков [Электронный ресурс] // Комсомольская правда. — URL: https://www.kp.ru/daily/27756/5204392/ (дата обращения: 15.07.2026).
4. Искаков А.М. К вопросу поиска людей с помощью социальных сетей и искусственного интеллекта / А.М. Искаков, А.А. Корнилов // Альманах Пермского военного института войск национальной гвардии. — 2025. — № 1(17). — С. 35–43.

5. Коханенко А.И. Разработка рекомендательной системы для поиска людей на картах с использованием методов машинного обучения / А.И. Коханенко, Е.В. Морарь // Прикладная математика и фундаментальная информатика. — 2026. — Т. 13, № 1. — С. 17–23. — DOI 10.25206/2311–4908–2026-13-1-17-23.
6. ПСО «Лиза Алерт» Самарской области. Отчёт о деятельности за 2025 год. — Самара, 2026. — 32 с.
7. ПСО «Лиза Алерт». Итоги работы за 2025 год [Электронный ресурс]. — URL: https://lizaalert.org (дата обращения: 15.07.2026).
8. ПСО «Лиза Алерт». Статистика отряда «ЛизаАлерт» за март 2025 года [Электронный ресурс]. — URL: https://lizaalert.org/statistika-otryada-lizaalert-za-mart-2025-goda/ (дата обращения: 15.07.2026).
9. Следственный комитет Российской Федерации. Статистические сведения о результатах расследования уголовных дел о безвестном исчезновении несовершеннолетних за 2020–2024 гг. — Москва, 2025. — 45 с.
10. Управление Министерства внутренних дел России по Самарской области. Сводки о результатах розыска без вести пропавших граждан за 2020–2025 гг.: архивная справка № 47/1098 от 12.05.2026. — Самара, 2026. — 5 с.

© Лесовая Анастасия Юрьевна (an-lesovayali@mail.ru); Захарова Оксана Игоревна (o.zaharova@psuti.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.19

ВЛИЯНИЕ НОРМАЛИЗАЦИИ ЦВЕТОВОГО ПРОСТРАНСТВА ГИСТОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА КАЧЕСТВО СЕГМЕНТАЦИИ

INFLUENCE OF NORMALIZATION OF THE COLOR SPACE OF HISTOLOGICAL IMAGES ON THE QUALITY OF SEGMENTATION

V. Lisovoi
V. Vereshchagin

Summary. Staining normalization is a key preprocessing task in automated diagnostic systems for modern digital pathology. It reduces interlaboratory color and intensity variations arising from differences in protocols, reagents, and scanners, thereby increasing data consistency and model robustness. This paper examines the impact of color space normalization on the quality of histological image segmentation using a neural network. The impact of the normalization method on the IoU metric is analyzed. It is shown that properly chosen normalization stabilizes feature distributions and improves the accuracy and reproducibility of segmentation.

Keywords: color space normalization, full-frame image, neural network, segmentation, colorant, color space normalization.

Лисовой Владимир Станиславович
Аспирант, Московский политехнический университет
lisovoy99@mail.ru
Верещагин Владислав Юрьевич
Кандидат технических наук, доцент,
Московский политехнический университет
slavaver@ya.ru

Аннотация. Нормализация окрашивания является ключевой задачей предобработки в системах автоматизированной диагностики современной цифровой патологии. Она снижает межлабораторные вариации цвета и интенсивности, возникающие из-за различий в протоколах, реагентах и сканерах, тем самым повышая согласованность данных и устойчивость моделей. В данной работе исследуется влияние нормализации цветового пространства на качество сегментации гистологических изображений нейронной сетью. Анализируется влияние метода нормализации на метрику IoU. Показано, что корректно выбранная нормализация стабилизирует распределения признаков, повышает точность и воспроизводимость сегментации.

Ключевые слова: нормализация цветового пространства, полнокадровое изображение, нейронная сеть, сегментация, краситель, нормализация цветового пространства.

Введение

Чтобы получить гистологическое изображение у объекта берутся образцы тканей для анализа. Один из распространенных способов анализа образца ткани — обработка его красителями, обладающими избирательным сродством к различным биологическим веществам [1]. Большинство красителей поглощают только свет, поэтому окрашенные слайды просматривают с помощью микроскопа, освещая образец снизу. Если области, окрашенной красителем нет, то весь свет будет проходить сквозь него и станет ярко-белым. Области, где краситель прилип к веществу в ткани, будут поглощать часть света. Количество поглощенного света зависит от многих факторов. Для данной области красителя будет поглощено определенное количество света в каждом спектре. Чтобы получить подобное изображение используются специальные сканеры. Полученные таким образом изображения необходимо должным образом обработать для дальнейшего анализа, в ходе которого изучаются как различные признаки ткани в целом, так и её составных частей [2]. Это помогает значительно сузить круг предполагаемых болезней.

На Рис. 1 показаны два примера гистологических препаратов кожи, обработанных в разное время в разных лабораториях. В наиболее популярном методе окрашивания для медицинской диагностики гематоксилин избирательно окрашивает нуклеиновые кислоты в сине-фиолетовый оттенок, а эозин окрашивает белки в ярко-розовый цвет. Другие вариации возникают из-за того, что красящие вещества не поглощают одинаковое количество света, поэтому демонстрируют несколько разные цвета.

После получения снимка ткани под микроскопом получается гистологическое изображение. Существует большое количество различных задач анализа гистологических изображений, в данной работе будут рассматриваться задача сегментации. Для которой надо выполнить предварительную обработку изображения с помощью нормализации его цветового пространства [2].

Описание алгоритма нормализации

Предполагается, что существует определенный вектор красителей, соответствующий каждому из двух кра-

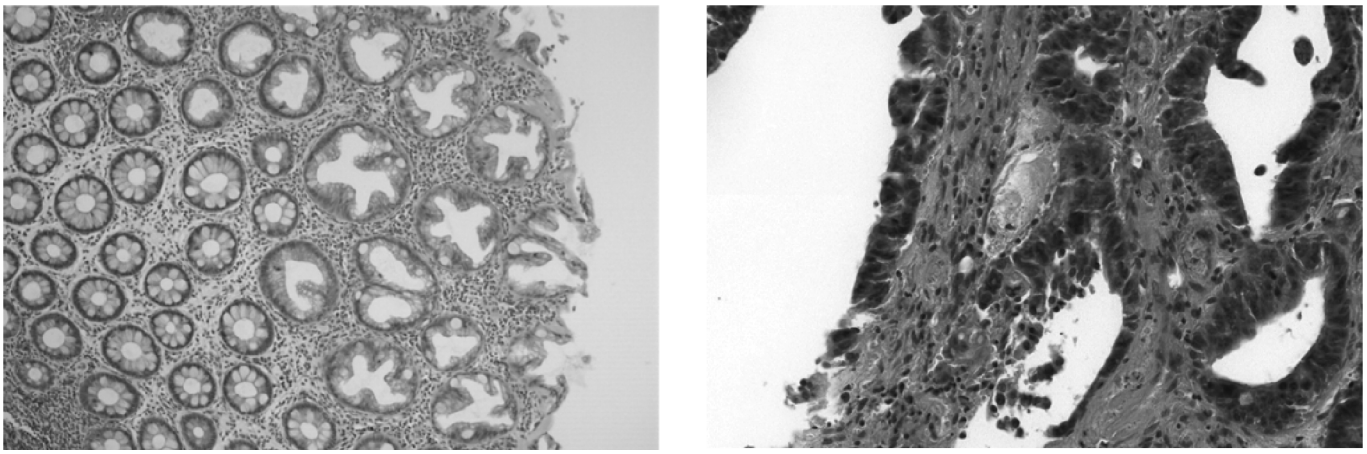


Рис. 1. Гистологические изображения, окрашенные гематоксилином-эозином, из разных наборов данных

сителей, присутствующих на изображении, и что результирующий цвет в пространстве оптической плотности (OD) каждого пикселя представляет собой линейную комбинацию этих векторов красителей.

$OD = -log_{10}(I)$, где I — вектор цвета RGB, каждый компонент которого нормализован до диапазона [0,1]. Это преобразование обеспечивает пространство, где линейная комбинация красителей приведет к линейной комбинации значений оптической плотности [3].

Поскольку для каждого компонента должен быть неотрицательный вес, каждое значение должно существовать между двумя векторами окрашивания. Из-за воздействия шума используются устойчивые версии минимума и максимума с использованием процентилей α^{th}и $(100 - \alpha)^{th}$. Необходимо найти конкретные вектора красителей. Значение оптической плотности, равное 0, соответствует пикселю, который был полностью белым, где ничто на слайде не поглощало свет. По соображениям стабильности пиксели, практически не имеющие окраски, были определены пороговыми значениями. Было обнаружено, что пороговое значение $\beta = 0{,}15$ обеспечивает наиболее надежные результаты.

Затем необходимо найти конкретное геодезическое направление и спроецировать на него преобразованные пиксели OD, чтобы найти конечные точки, которые соответствуют векторам красителей. Первым шагом в этом процессе является вычисление плоскости, которую образуют векторы. Это делается путем формирования плоскости из двух векторов, соответствующих двум наибольшим сингулярным значениям SVD-разложения преобразованных OD пикселей. Все эти преобразованные OD пиксели затем проецируются на эту плоскость и затем нормализуются до единичной длины. Угол по отношению к первому направлению SVD вычисляется для каждой точки, таким образом сопоставляя направления на плоскости со скаляром.

$OD = VS \Rightarrow S = V^{-1}OD$, где OD — наблюдаемое значение оптической плотности, а V и S — матрицы векторов окрашивания и насыщенности каждого из красителей соответственно [4].

Для каждого рассматриваемого красителя вычисляются гистограммы интенсивности для всех пикселей, которые имеют большую часть этого красителя. Затем находится 99-й процентиль этих значений интенсивности и используется как надежное приближение к максимуму. Затем все гистограммы интенсивности масштабируются так, чтобы иметь одинаковый псевдомаксимум, и после этого их можно сравнивать друг с другом.

Используемые данные

В качестве набора данных в задаче сегментации предлагается использовать PATH-DT-MSU S1 [5], который состоит из 80 изображений в разрешении 2176 x 1632, окрашенных гематоксилином-эозином и масок их сегментации. На изображениях выделены классы желез и открытых желез. А также набор данных Warwick-QU [6], который состоит из 165 гистологических изображений, окрашенных гематоксилином-эозином и масок их сегментации. Данные из двух наборов были сделаны в разных условиях, а поэтому существенно отличаются друг от друга по окраске

Результат

Для оценки влияния методов нормализации цветового пространства мы обучаем модель глубокой сегментации U-Net [7]. Мы используем случайное разделение данных на обучающую и тестовую выборки: 50 % данных для обучения и 50 % для тестирования, одним из наборов для тестирования являются смешанные данные из обоих датасетов, которые были нормализованы.

Для исследования мы берем три модели: модель № 1 — модель, обученная на данных из набора PATH-

Таблица 1.
Сравнение IoU между различными моделями в зависимости от тренировочных данных

	Модель №1	Модель №2	Модель №3
PATH-DT-MSU	83.04 %	75.12 %	70.68 %
Warwick-QU	71.44 %	72.88 %	85.56 %
Смешанные нормализованные данные	74.52 %	79.24 %	73.01 %

DT-MSU, модель №2 — модель, обученная на данных из набора PATH-DT-MSU, которые были нормализованы, модель №3 — модель, обученная на данных из набора Warwick-QU. Каждая из них обучалась на протяжении 200 эпох, на равном количестве изображений одинакового разрешения.

Для каждой из моделей мы проводим независимые испытания и оцениваем среднюю точность метрики IoU на тестовых наборах (Табл. 1).

Модель № 1 показала лучшие результаты на тестовых данных из набора PATH-DT-MSU, однако ее точность на изображениях из Warwick-QU и нормализованных изображениях была существенно хуже.

Модель № 2 показала умеренно хорошие результаты на исходных данных из датасетов PATH-DT-MSU, Warwick-QU и лучший результат на нормализованных данных.

Результаты модели № 3 аналогично были наилучшими на тестовых данных из того набора, на котором она была обучена, и были хуже на данных из других наборов.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что оптимальной стратегией для увеличения точности прогноза нейронной сети является ее обучение на нормализованных по цветовому признаку изображениях. Это позволит снизить зависимость предсказания от фактора окраски изображения.

Заключение

В этой статье представлено исследование влияние нормализации цветового пространства гистологических изображений на качество сегментации. Для сегментации была использована сверточная нейронная сеть U-Net, а для нормализации цветового пространства — алгоритм Маценко [2]. В ходе исследования было показано, что наиболее результативным и универсальным подходом является нормализация окраски, как исходных изображений обучающей выборки, так и последующих изображений, подаваемых на вход.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bándi P. et al. Comparison of different methods for tissue segmentation in histopathological whole-slide images //2017 IEEE 14th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI 2017). — IEEE, 2017. — С. 591–595.
2. Macenko M. et al. A method for normalizing histology slides for quantitative analysis //2009 IEEE international symposium on biomedical imaging: from nano to macro. — IEEE, 2009. — С. 1107–1110.
3. Ljungberg A., Johansson O. Methodological aspects on immunohistochemistry in dermatology with special reference to neuronal markers //The Histochemical Journal. — 1993. — Т. 25. — №. 10. — С. 735–745.
4. Fawcett J.K., Scott J.E. A rapid and precise method for the determination of urea //Journal of clinical pathology. — 1960. — Т. 13. — №. 2. — С. 156–159.
5. Ruifrok A. Quantification of histochemical staining by color deconvolution //Analytical and quantitative cytology and histology/the International Academy of Cytology [and] American Society of Cytology. — 2001.
6. Automatic glands segmentation in histological images obtained by endoscopic biopsy from various parts of the colon / N Oleynikova, A Khvostikov, A Krylov [и др.] // Endoscopy. — 2019. —Т. 51, No 04. — С. OP9.
7. Gland segmentation in colon histology images: The glas challenge contest /Korsuk Sirinukunwattana, Josien PW Pluim, Hao Chen [и др.] // Medical image analysis. — 2017. — Т. 35. — С. 489–502.
8. Siddique N. et al. U-Net and its variants for medical image segmentation: theory and applications //arXiv preprint arXiv:2011.01118. — 2020.

© Лисовой Владимир Станиславович (lisovoy99@mail.ru); Верещагин Владислав Юрьевич (slavaver@ya.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.20

БИБЛИОТЕКА УНИВЕРСАЛЬНОГО ДОСТУПА К УДАЛЕННЫМ РАБОЧИМ СТОЛАМ В ОБЛАЧНЫХ СИСТЕМАХ

A UNIVERSAL ACCESS LIBRARY FOR REMOTE DESKTOPS IN CLOUD SYSTEMS

L. Lvova

Summary. This article discusses a cloud-based VDI infrastructure and a C++ library that provides users with access to a pool of virtual graphics workstation resources on both Linux and Windows for collaboration and running resource-intensive 3D applications. The implemented universal access library allows users to work with 3D applications as if they were local, regardless of the remote OS.

The implemented solution provides hardware-accelerated 3D rendering on the server side; automated remote session management; seamless authorization and failover to node reconnection while preserving active user sessions; remote clipboard synchronization; keyboard capture; and the ability to change screen resolution. Integration with the authorization server (LDAP) ensures centralized authentication and authorization. Delegation of user authorization to an existing service allows for a one-time connection to the Dispatcher and reuse of the connection. In this case, the Dispatcher acts as the authorization agent.

The implemented library supports data encryption algorithms for data transfer over open communication channels.

Collaborative and remote work with hardware acceleration in cloud systems is becoming not just an alternative to local operation, but the only scalable workflow for engineers, scientists, and developers working with resource-intensive 3D graphics.

Keywords: VDI, DaaS, 3D rendering, vGPU, VirtualGL, TurboVNC, RDP.

Львова Людмила Михайловна
Аспирант, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
lvovalm13@gmail.com

Аннотация. В данной статье рассматривается облачная VDI-инфраструктура и библиотека на языке C++, предоставляющая пользователям доступ к пулу ресурсов виртуальных графических станций как на базе Linux, так и на Windows для организации совместной работы и запуска ресурсоемких 3D приложений. Реализованная библиотека универсального доступа позволяет работать с 3D-приложениями как с локальными вне зависимости от удаленной ОС.

Реализованное решение обеспечивает 3D-рендеринг с аппаратным ускорением на стороне сервера; автоматизированное управление удаленными сессиями; бесшовную авторизацию и отказоустойчивое переподключение к узлам с сохранением активных сессий за пользователем; синхронизацию удаленного буфера обмена; захват клавиатуры; возможность изменения разрешения экрана. Интеграция с сервером авторизации (LDAP) обеспечивает централизованную аутентификацию и авторизацию. Делегирование авторизации пользователя имеющемуся сервису, которое позволяет на основе однократной настройки подключаться к Диспетчеру и использовать соединение повторно. В данном случае Диспетчер выступает в роли агента авторизации.

Реализованная библиотека поддерживает алгоритмы шифрования данных для возможности передачи их по открытым каналам связи.

Совместная и удаленная работа с аппаратным ускорением в облачных системах становится не просто альтернативой локальному запуску, а единственным масштабируемым способом организации труда для инженеров, ученых и разработчиков, работающих с ресурсоемкой 3D-графикой.

Ключевые слова: VDI, DaaS, 3D-рендеринг, vGPU, VirtualGL, TurboVNC, RDP.

Введение

Современные 3D-приложения, использующие OpenGL, предъявляют высокие требования к вычислительным ресурсам: наличие мощных видеокарт с 3D-ускорителем, а также наличие высоких вычислительных мощностей. Как правило, в связи с этим возникает необходимость:

- выполнения 3D-рендеринга на удаленной машине;
- переноса выполнения всех ресурсоемких задачи на сервер с GPU (или кластер серверов);
- использования технологий виртуализации GPU (vGPU [7], GPU Passthrough [8]);
- применения специализированных протоколов доступа к удаленным рабочим столам.

Для организации совместной работы компании с ресурсоемкими 3D-приложениями возникает необходимость реализации доступа к разделяемому динамическому пулу ресурсов. Реализация доступа обеспечивается за счет интеграции с:

- VNC-сервером и VirtualGL, что делает возможным запуск ресурсоемких 3D приложений с аппаратным ускорением в удаленной сессии для интерактивной работы;
- Диспетчером (брокером подключений) — для автоматизированного выделения узла и последующего переподключения к тому же узлу при обрывах сети;
- сервером авторизации (LDAP) — для централизованной аутентификации и авторизации.

Интеграция библиотеки универсального доступа с описанными модулями обеспечивает оптимизацию повторного входа на основе однократной настройки, т.е. ввод логина и пароля требуется только при первом подключении или их изменении. В процессе работы модули оперируют данными непосредственно в оперативной памяти и передают их по зашифрованному сетевому протоколу.

Для обеспечения связи с VNC-сервером в библиотеку универсального доступа интегрирована передача данных по RFB (VNC) протоколу с поддержкой синхронизации буфера обмена удаленной сессии, возможности изменения разрешения экрана удаленной сессии, сохранения предыдущего состояния окна удаленной сессии и возможность переподключения к выделенному узлу при обрывах сети.

Реализованная библиотека поддерживает алгоритмы шифрования данных для возможности передачи по открытым каналам связи.

Удаленный рабочий стол как услуга

Облачные вычисления — парадигма для предоставления возможности сетевого доступа к масштабируемому и эластичному пулу разделяемых физических или виртуальных ресурсов, обеспечивающая самообслуживание и администрирование по требованию [1]. Ключевыми особенностями облачных вычислений являются: широкий сетевой доступ; быстрая эластичность и масштабируемость; пул ресурсов.

Рабочий стол как услуга (Desktop as a Service) — возможности, предоставленные потребителю службы облачных вычислений в виде возможности построить, сформировать, управлять, сохранять, выполнять и устанавливать рабочий стол пользователей, функционирующих удаленно [1]. DaaS востребованы в различных сферах, в том числе и в нефтегазовой промышленности, где облачные вычисления применяются для моделирования разработки нефтяных месторождений. Удалённые рабочие места позволят сотрудникам иметь доступ с тонкого клиента к:

- рабочей информации без необходимости синхронизировать данные между разными устройствами;
- мощным высокопроизводительным ресурсам;
- ресурсоемким 3D-приложениям.

Известным примером DaaS является **Yandex Cloud Desktop** [3]. Cloud Desktop предоставляет доступ к облачным вычислительным ресурсам и дисковому пространству, а также обеспечивает защиту данных, масштабируемость ресурсов (виртуальных машин — ВМ), индивидуальную настройку рабочих окружений и рациональное использование ресурсов. Для подключения к рабочим столам используется Remote Desktop Protocol (RDP). Известно, что для этого используются уникальные RDP-файлы с ограниченным временем жизни и по истечении этого времени файл становится недействительным, при этом пользователь должен каждый раз запрашивать его повторно.

Облачная инфраструктура компании может состоять не только из ресурсов облачного провайдера, но и из частных, размещаемых в локальном ЦОД, с доступом как по локальной, так и внешней сети. Часто гибридное облако требуется компании, имеющей свой локальный ЦОД, для масштабирования вычислительных мощностей за счет публичных облачных ресурсов.

В существующих реализациях доступа к удаленным рабочим столам ключи передаются самим пользователем вручную. Для удобства работы пользователя с инфраструктурой виртуальных рабочих столов требуется обеспечить **однократную настройку** доступа.

Известно множество протоколов и соответствующие им программные реализации доступа к удаленному рабочему столу с поддержкой рендеринга трехмерной графики. Однако большинство из них является проприетарными. Таким образом, доступ к исходному коду и возможность интегрирования его в уже существующее приложение с дальнейшей модернизацией под требуемые задачи является существенным критерием выбора протокола удаленным рабочим столам.

Реализация. Инфраструктура виртуальных рабочих столов

Рассматривается облачная инфраструктура виртуальных рабочих столов, предоставляющая пользователям доступ к пулу ресурсов виртуальных графических станций как на базе Linux, так и на Windows для организации совместной работы и запуска ресурсоемких 3D приложений, см. рис. 1.

Неотъемлемой частью рассматриваемой облачной инфраструктуры является **Диспетчер**. Диспетчер — программный компонент, реализующий взаимодействие между клиентом и облачной системой. Запускается внутри облачной системы. В функционал Диспетчера входит аутентификация и авторизация пользователей посредством **сервера авторизации** (LDAP), что обеспечивает оптимизацию повторного входа на основе **однократной настройки**, т.е. ввод логина и пароля требуется только при первом подключении к Диспетчеру или их изменении. На клиентской стороне данные хранятся исключительно в зашифрованном виде. В процессе работы модули оперируют данными непосредственно в оперативной памяти и передают их по зашифрованному сетевому протоколу.

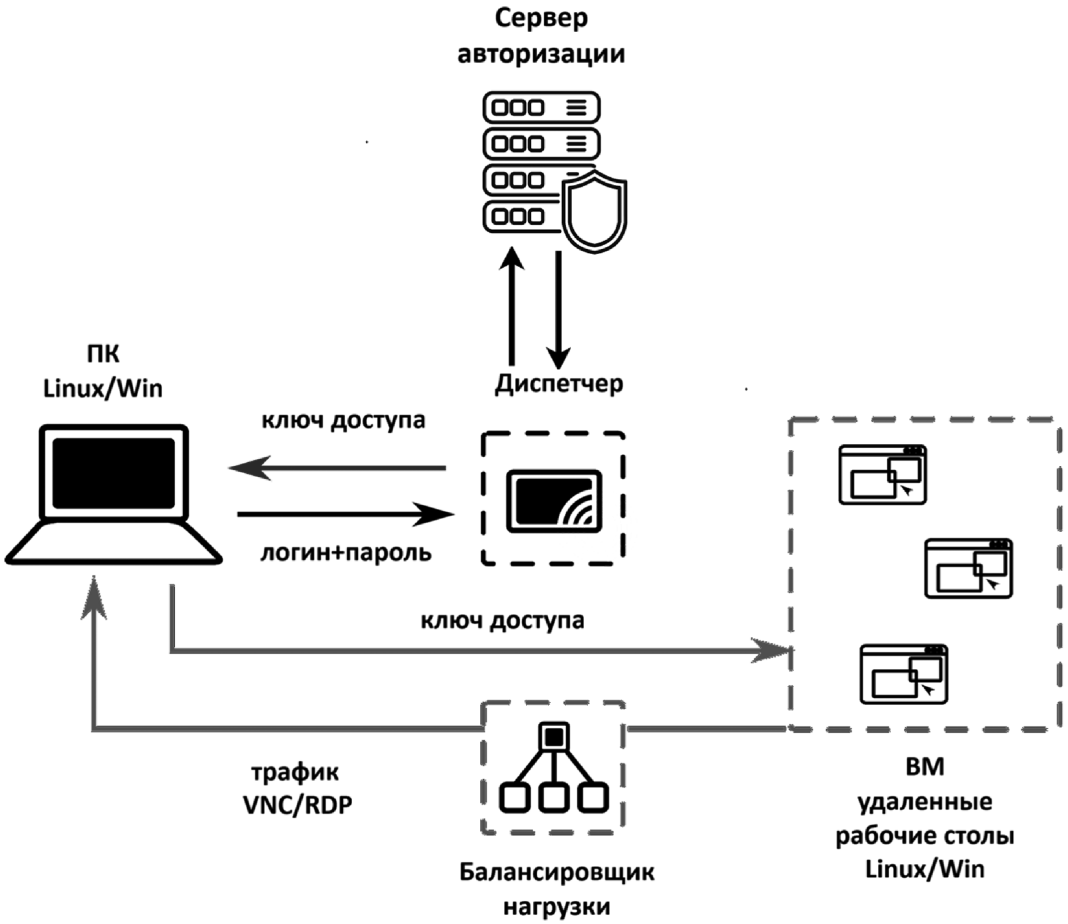


Рис. 1. Облачная инфраструктура

В функционал Диспетчера также входит:

- мониторинг пула ресурсов;
- выделение и освобождение графического узла по запросу пользователя;
- старт сессии удаленного рабочего стола и сохранение ее за пользователем;
- выдача ключей доступа к соответствующему удаленному рабочему столу.

Диспетчер входит в программный комплекс тНавигатор.

Реализация. Протокол удаленного рабочего стола с поддержкой аппаратного ускорения

Обеспечение эффективного 3D-рендеринга с поддержкой аппаратного ускорения напрямую зависит от типа ОС выделенного графического узла. В силу того, что требуется реализовать доступ к пулу ресурсов вне зависимости от ОС, рассмотрим протокола доступа согласно ОС.

Для работы с удаленным рабочим столом и 3D-приложением, использующем на нем OpenGL, применяется связка VirtualGL + TurboVNC, что предоставляет высокопроизводительное и надёжное решение для удалённого отображения 3D-приложений:

- VirtualGL — это пакет программного обеспечения с открытым исходным кодом, который перенаправляет команды 3D-рендеринга из приложений OpenGL для Unix и Linux на аппаратное обеспечение 3D-ускорителя на выделенном сервере и отправляет обработанный вывод на тонкий клиент, расположенный в другом месте сети.
- TurboVNC — клиент-серверное программное обеспечение с открытым исходным кодом. Это высокопроизводительная реализация системы удаленного рабочего стола VNC (Virtual Network Computing), оптимизированная для передачи графики с высокой скоростью и минимальными задержками [4].

RDP остается основным протоколом при подключении между хостами под управлением ОС Windows и не требует отдельной реализации ввиду его проприетарного характера и наличия нативной поддержки со стороны операционной системы, что гарантирует полную совместимость с механизмами аппаратного ускорения ОС.

API Диспетчера обеспечивает получение ключей доступа к удаленному рабочему столу. В выдаваемых ключах доступа учитывается тип протокола подключения

согласно ОС целевого узла, что обеспечивает автоматическую настройку тонкого клиента. В случае подключения по:

- VNC-протоколу — вызывается реализованный на языке C++ VNC-клиент с полученными настройками подключения: адрес хоста, порт и одноразовый пароль.
- RDP-протоколу — программно создается конфигурационный файл подключения, который открывается системным приложением, например, Remote Desktop Connection (MSTSC), RemoteApp и другим.

Доступ к пулу ресурсов осуществляется через единый портал, который автоматически инициализирует сессию по протоколу RDP или VNC в зависимости от целевого виртуального узла, что гарантирует **оптимальную передачу данных**.

При повторном подключении маршрутизация сессий гарантирует, что Диспетчер направит пользователя ровно на тот же самый узел, где сессия осталась активной, чтобы он мог продолжить работу с того же места без потери данных.

Реализация и интеграция VNC-клиента

В рамках работы реализован кроссплатформенный VNC-клиент, передающий данные по RFB-протоколу, поддерживающий визуализацию 3D графики с аппаратным ускорением на удаленном узле для интерактивной работы.

На рис. 2 представлен реализованный на языке C++ VNC-клиент с визуализацией удаленного рабочего стола. Внутри удаленной сессии открыто ресурсоемкое 3D-приложение, использующее аппаратное ускорение OpenGL на стороне сервера — программный комплекс геолого-гидродинамического моделирования тНавигатор [2]. Реализованный клиент позволяет работать с удаленным 3D-приложением как с локальным.

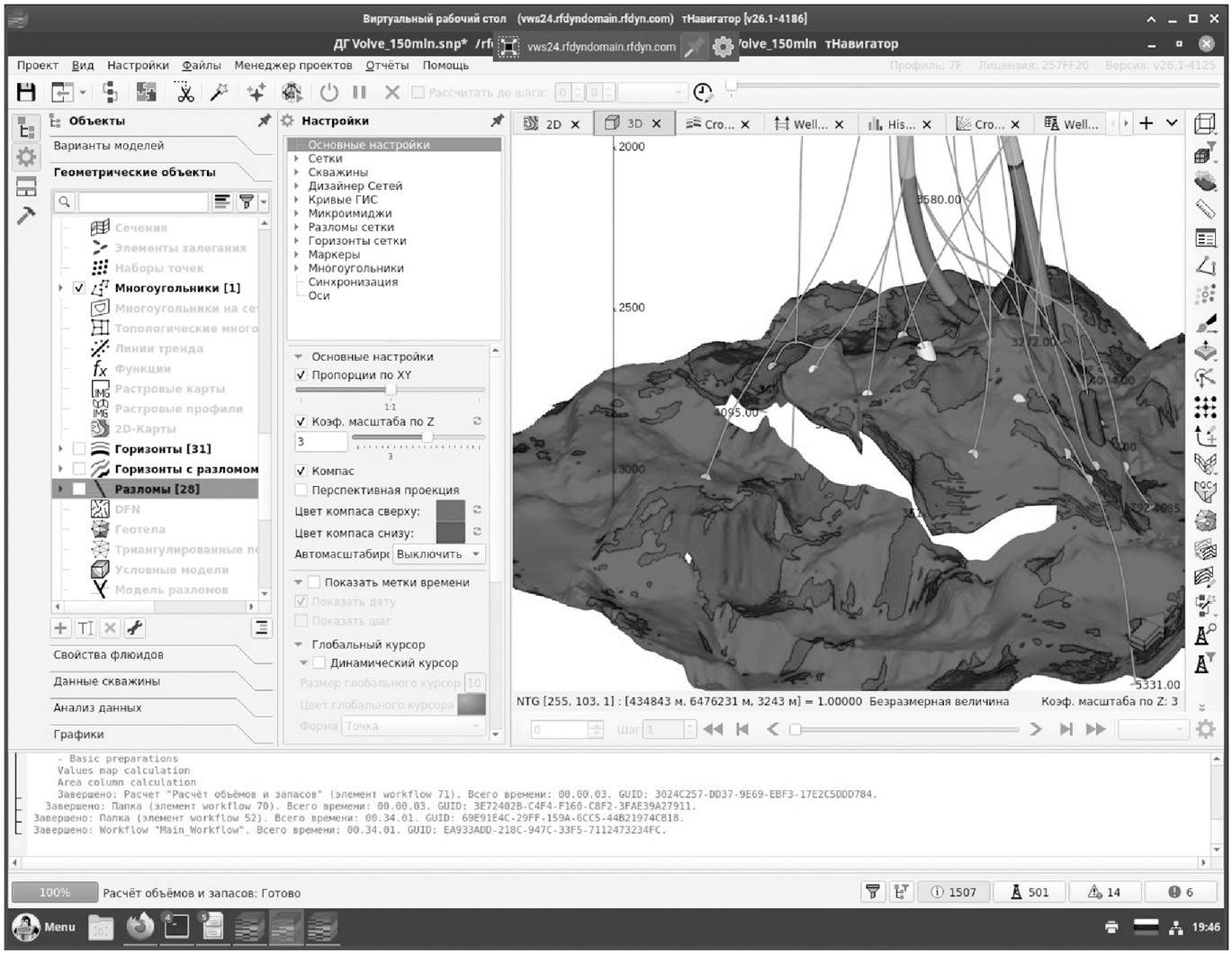


Рис. 2. VNC-клиент с визуализацией удаленного рабочего стола

Неотъемлемым функционалом VNC-клиента является:
- Полная поддержка протокола RFB;
- Поддержка JPEG-кодека посредством высокопроизводительной библиотеки libjpeg-turbo;
- Синхронизация буфера обмена удаленной сессии;
- Захват локальной клавиатуры;
- Изменение расширения экрана удалённой сессии;
- Сохранение предыдущего состояния окна, в том числе и Fullscreen;
- Поддержка алгоритмов шифрования данных для передачи по открытым каналам сети;
- Автоматическое обновление ключей (OTP — One-Time Password) и переподключение к активной сессии при обрывах сети;
- VNC-клиент реализован при помощи библиотек Qt и Boost/asio на языке C++. Сетевое взаимодействие реализовано с использованием библиотеки Boost/asio.

Интеграция VNC-клиента в ядро описываемой библиотеки позволила реализовать механизмы:
- **бесшовной авторизации** — получение ключей доступа посредством модуля Диспетчера на основе однократной настройки подключения, т.е. без повторного участия пользователя;
- **отказоустойчивости** — при разрыве соединения интегрированным клиентом запрашиваются ключи доступа через API Диспетчера, что ускоряет процесс восстановления графической трансляции активной сессии.

Апробация реализованного VNC-клиента

В таблице 1 приведено сравнение реализованного VNC-клиента с TigerVNC viewer v1.15.0, взятого за эталон реализации RFB-протокола. Тестирование описанных VNC-клиентов проводилось на ОС Windows 11, Linux openSUSE Tumbleweed-Slowroll при подключении к пулу ресурсов, доступных как в локальной сети, так и по открытым каналам связи.

Протокол RFB основан на механизме детекта изменений и передачи только «кусочков» экрана, т.е. передается на клиент только «дельта» изменений. Полностью обновленный экран из соображений экономиии не передается. Таким образом, эксперимент замера среднего FPS состоял из замера общего количества переданных данных за сессию постоянно меняющегося удаленного экрана (видео потока). Размер одного кадра составляет 1920x1145 (8.39 MB).

Из полученных результатов следует:
- реализованный VNC-клиент сопоставим по средней скорости FPS с эталонной реализацией RFB-протокола;
- среднее значение FPS находится в норме для комфортной интерактивной работы (более 35 FPS);

Таблица 1.

Сравнение реализованного VNC-клиента с TigerVNC viewer

Критерий \ Клиент	tNav-VNC	TigerVNC viewer
среднее FPS (кадров/сек)	39	45
среднее время переподключения по OTP	3 мин	отсутствует

- наличие бесшовного переподключения не только не требует действий от пользователя за счет автоматизации, но и сокращает время ожидания переподключения. В силу того, что, как правило, у конечного пользователя облачными вычислениями нет прямого доступа и прав на получение ключей.

Тестирование реализованного VNC-клиента проводилось как на инфраструктуре удаленных рабочих столов частного ЦОД компании, так и на инфраструктуре удаленных рабочих столов сервиса Yandex Cloud Desktop.

Реализованный VNC-клиент интегрирован в промышленный программный комплекс тНавигатор.

Заключение

В статье представлен комплекс программных модулей, составляющих VDI-инфраструктуру, и реализованная библиотека на языке C++, предоставляющая пользователям доступ к пулу ресурсов виртуальных графических станций. Реализованная библиотека универсального доступа позволяет работать с 3D-приложениями как с локальными вне зависимости от ОС удаленной системы.

Реализованное решение обеспечивает:
- 3D-рендеринг с аппаратным ускорением на стороне сервера независимо от ОС целевого графического узла;
- оптимизацию повторного входа на основе однократной настройки, т.е. без повторных действий пользователя;
- автоматизированное управление удаленными сессиями;
- единую точку аутентификации и авторизации посредством сервера авторизации;
- бесшовную авторизацию и отказоустойчивое переподключение к узлам с сохранением активных сессий за пользователем.

Реализованная библиотека поддерживает алгоритмы шифрования данных для возможности передачи их по открытым каналам связи.

Практическая значимость реализованного универсального клиента подтверждена:

- успешной интеграцией в промышленный программный комплекс тНавигатор [2];
- успешным двухлетним опытом использования разработанного решения в рамках задач геологического моделирования и инженерных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Информационные технологии Облачные вычисления Общие положения и терминология ГОСТ ISO/IEC 17788–2016 2019
2. ИРМ: тНавигатор. [Электронный ресурс]. — М.: ИРМ, 2025. –URL: https://irmodel.ru/. (Дата обращения: 05.11.2025).
3. Yandex Cloud Desktop [Электронный ресурс]. — https://yandex.cloud/ru/services/cloud-desktop (Дата обращения: 20.04.2026).
4. TurboVNC [Электронный ресурс]. — https://wiki.archlinux.org/title/TurboVNC (Дата обращения: 20.04.2026).
5. VirtualGL Background [Электронный ресурс]. — https://virtualgl.org/About/Background (Дата обращения: 20.04.2026).
6. TurboVNC [Электронный ресурс]. — https://turbovnc.org/ (Дата обращения: 20.04.2026).
7. NVIDIA Multi-Instance GPU and NVIDIA Virtual Compute Server [Электронный ресурс]. — https://www.nvidia.com/content/dam/en-zz/Solutions/design-visualization/solutions/resources/documents1/Technical-Brief-Multi-Instance-GPU-NVIDIA-Virtual-Compute-Server.pdf (Дата обращения: 20.04.2026).
8. NVIDIA GPU Passthrough Support [Электронный ресурс]. — https://docs.nvidia.com/datacenter/tesla/gpu-passthrough/index.html (Дата обращения: 20.04.2026).

© Львова Людмила Михайловна (lvovalm13@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.21

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В IOT-УСТРОЙСТВАХ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТАКТОВОЙ ЧАСТОТОЙ

OPTIMIZATION OF POWER CONSUMPTION IN IOT DEVICES BASED ON MICROCONTROLLERS USING DYNAMIC CLOCK FREQUENCY CONTROL

Yu. Maidanov

Summary. The article discusses methods for reducing power consumption in IoT devices powered by autonomous power sources, with an emphasis on dynamic clock frequency control (DVFS) of microcontrollers. Modern approaches to energy conservation are analyzed, including sleep modes, voltage, and frequency scaling, as well as adaptive load forecasting algorithms. The results of an experimental study of the energy efficiency of various frequency control strategies using the example of popular microcontroller platforms are presented. A hybrid model combining reactive and proactive control is proposed, which makes it possible to achieve a 35–50 % reduction in energy consumption compared to a static clock frequency while maintaining the required performance. Practical recommendations for the implementation of DVFS in Internet of Things devices have been developed.

Keywords: Internet of Things, power consumption, microcontroller, dynamic frequency control, DVFS, sleep modes, embedded systems, optimization, wireless communication, autonomous power supply.

Майданов Юрий Сергеевич
кандидат технических наук, доцент,
Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики
maidanov@sibguti.ru

Аннотация. В статье рассматриваются методы снижения энергопотребления в IoT-устройствах, работающих от автономных источников питания, с акцентом на динамическое управление тактовой частотой (DVFS) микроконтроллеров. Анализируются современные подходы к энергосбережению, включая режимы сна, масштабирование напряжения и частоты, а также адаптивные алгоритмы прогнозирования нагрузки. Представлены результаты экспериментального исследования энергоэффективности различных стратегий управления частотой на примере популярных микроконтроллерных платформ. Предложена гибридная модель, сочетающая реактивное и проактивное управление, позволяющая достичь сокращения энергопотребления на 35–50 % по сравнению со статической тактовой частотой при сохранении требуемой производительности. Разработаны практические рекомендации по внедрению DVFS в устройствах интернета вещей.

Ключевые слова: интернет вещей, энергопотребление, микроконтроллер, динамическое управление частотой, DVFS, режимы сна, встроенные системы, оптимизация, беспроводная связь, автономное питание.

Введение

Стремительное развитие интернета вещей привело к появлению огромного числа автономных устройств, работающих от батарей или аккумуляторов. По данным аналитических агентств, к 2028 году количество подключенных IoT-устройств превысит 40 миллиардов единиц. Большинство этих устройств должны функционировать годами без замены источников питания, что делает энергоэффективность критически важным параметром проектирования. Проблема усугубляется тем, что вместе с ростом числа устройств увеличивается и сложность выполняемых ими задач, требующих всё больших вычислительных ресурсов. Традиционные подходы к энергосбережению, основанные на статическом снижении тактовой частоты или использовании режимов сна, не всегда позволяют достичь оптимального баланса между производительностью и энергопотреблением. В этой связи особую актуальность приобретают методы динамического управления тактовой частотой и напряжением питания (Dynamic Voltage and Frequency Scaling, DVFS), позволяющие адаптировать работу микроконтроллера к текущей вычислительной нагрузке в реальном времени. Настоящая статья посвящена исследованию возможностей применения DVFS для оптимизации энергопотребления в IoT-устройствах и разработке практических рекомендаций по внедрению этих методов [1].

Энергопотребление микроконтроллеров и интегральных схем в целом складывается из двух основных компонентов: динамической и статической составляющих. Динамическое энергопотребление возникает при переключении транзисторов и описывается формулой $P_{dyn} = C \cdot V^2 \cdot f$, где C — ёмкость нагрузки, V — напряжение питания, f — тактовая частота. Статическое энергопотребление обусловлено токами утечки, которые растут с повышением температуры и уменьшением технологических норм. В современных микроконтроллерах, выпускаемых по технологическим процессам 90–40 нм,

динамическая составляющая преобладает при активной работе, а статическая становится доминирующей в режимах сна. Именно квадратичная зависимость динамического энергопотребления от напряжения питания ($P \propto V^2$) делает DVFS особенно привлекательным методом энергосбережения. Снижение напряжения на 30 % при пропорциональном уменьшении частоты позволяет сократить энергопотребление почти вдвое, поскольку динамическая составляющая падает пропорционально квадрату напряжения. Однако не всякое снижение напряжения возможно без нарушения стабильности работы схемы. Каждый микроконтроллер имеет минимально допустимое напряжение питания, при котором гарантируется работа на заданной частоте. Эта зависимость частоты от напряжения, известная как частотно-напряженная характеристика, определяется технологическим процессом и температурными условиями [2].

Современные микроконтроллеры, предназначенные для IoT-приложений, уже включают в себя базовые механизмы управления энергопотреблением. Практически все они поддерживают несколько режимов сна с различной глубиной отключения периферии и степенью сохранения данных. Например, в микроконтроллерах семейства STM32 (STMicroelectronics) реализованы режимы Sleep, Stop и Standby, различающиеся по току потребления и времени выхода. В режиме Sleep ядро останавливается, но периферия продолжает работать; ток потребления может составлять единицы миллиампер. В режиме Stop основная часть периферии отключается, данные сохраняются в оперативной памяти, ток падает до десятков микроампер. В режиме Standby сохраняется лишь минимальный набор регистров, ток потребления снижается до единиц микроампер, но время пробуждения существенно возрастает. Однако режимы сна эффективны только в периоды полного бездействия устройства. В активном состоянии, когда микроконтроллер выполняет вычисления, обрабатывает данные или управляет периферией, энергопотребление определяется тактовой частотой и напряжением. Здесь традиционные подходы сталкиваются с ограничениями: статический выбор частоты, обеспечивающий запас производительности для пиковых нагрузок, приводит к перерасходу энергии в периоды низкой активности. Именно для таких ситуаций DVFS предлагает решение, адаптируя вычислительные ресурсы к текущей потребности.

Методы DVFS можно классифицировать по нескольким критериям. По способу формирования управляющего сигнала выделяют реактивные и проактивные подходы. Реактивные методы изменяют частоту и напряжение в ответ на изменение загрузки процессора. Простейшим реализация является алгоритм, при котором операционная система или специализированное программное обеспечение периодически измеряет загрузку центрального процессора и, в зависимости от полученного значения, выбирает соответствующий частотно-напряженный уровень. При высокой загрузке частота повышается, при низкой — снижается. Такой подход не требует предсказания будущей нагрузки и прост в реализации, но обладает инерционностью: переход на более высокую частоту происходит с задержкой, что может привести к временному снижению производительности. Проактивные методы используют прогнозирование будущей нагрузки на основе анализа истории выполнения задач или поступления внешних событий. Например, если известно, что после приема данных по радиоканалу следует их обработка, то частота может быть повышена заранее. Более сложные алгоритмы применяют методы машинного обучения для предсказания характера рабочей нагрузки. Такие подходы могут быть более эффективными, особенно в IoT-устройствах с периодическими или квазипериодическими паттернами активности [3].

По месту реализации DVFS может осуществляться на уровне операционной системы, на уровне аппаратных прерываний или на уровне прикладного программного обеспечения. В полновесных операционных системах, таких как Linux, реализованы встроенные механизмы управления частотой, которые могут быть использованы при работе на достаточно мощных микроконтроллерах с большим объемом оперативной памяти. В легковесных RTOS (FreeRTOS, Zephyr) и в системах без операционной системы управление частотой реализуется прикладным программным обеспечением непосредственно, с использованием регистров управления тактовой системой микроконтроллера. Такой подход требует от разработчика глубокого понимания аппаратной архитектуры и временных характеристик выполняемых задач.

Третьим важным параметром классификации является степень интеграции DVFS с управлением напряжением питания. В большинстве IoT-микроконтроллеров напряжение питания фиксировано, и DVFS реализуется только за счет изменения тактовой частоты. Это связано с тем, что изменение напряжения требует наличия интегрированного регулятора питания (PMIC) или внешнего преобразователя, что увеличивает стоимость и усложняет конструкцию. Тем не менее, на рынке появляются микроконтроллеры со встроенными DC-DC преобразователями, позволяющими динамически изменять напряжение ядра. Примером может служить серия STM32U5 с технологией FlexPowerControl, позволяющая масштабировать напряжение в широком диапазоне. Наличие такой возможности позволяет реализовать полноценный DVFS с квадратичным выигрышем в энергопотреблении. В устройствах, где изменение напряжения невозможно, приходится ограничиваться управлением только частотой, что дает линейный, а не квадратичный выигрыш [4].

Эмпирические исследования показывают, что эффективность DVFS зависит от характера вычислительной нагрузки. Наибольший выигрыш достигается для рабочих нагрузок с высокой вариабельностью, например, когда периоды интенсивных вычислений чередуются с длительными паузами. Классическим примером является обработка сигналов с датчиков: считывание данных, фильтрация, вычисление среднего значения и отправка результата занимают короткие интервалы времени, между которыми процессор простаивает. При статической тактовой частоте энергия тратится и во время простоев (по крайней мере, динамическая составляющая). При использовании DVFS частота и напряжение снижаются в паузах, что позволяет сократить потребление до уровня, близкого к статическому. Исследования показывают, что для такого рода нагрузок DVFS может снизить энергопотребление на 40–60 % по сравнению с фиксированной максимальной частотой. Однако для нагрузок с почти постоянной загрузкой, когда процессор работает на пределе своих возможностей большую часть времени, выигрыш может быть минимальным, поскольку частота и напряжение постоянно находятся на высоком уровне [5].

Для количественной оценки эффективности различных стратегий управления частотой было проведено экспериментальное исследование на базе платформы Arduino Due (микроконтроллер Atmel SAM3X8E, архитектура ARM Cortex-M3, тактовая частота до 84 МГц). Данная платформа была выбрана как широко распространенная в IoT-проектах и имеющая открытую документацию по управлению тактовой системой. Было разработано специализированное программное обеспечение, позволяющее измерять энергопотребление в реальном времени с помощью прецизионного шунта и аналогово-цифрового преобразователя с частотой дискретизации 10 кГц. Исследовались три типа рабочих нагрузок, характерных для IoT-приложений: нагрузка типа А — периодический сбор данных с датчика температуры (20 измерений в секунду, простая математическая обработка); нагрузка типа В — обработка аудиосигнала с частотой дискретизации 8 кГц (цифровая фильтрация и обнаружение события); нагрузка типа С — шифрование данных алгоритмом AES-128 перед отправкой по радиоканалу (встречается относительно редко, но требует значительных ресурсов). Для каждой нагрузки сравнивались пять стратегий управления: статическая максимальная частота (84 МГц); статическая пониженная частота (42 МГц); простое реактивное управление с гистерезисом, при котором частота снижается до минимальной (21 МГц), если загрузка процессора падает ниже 30 % в течение 10 мс; адаптивное проактивное управление с предсказанием, использующее экспоненциально взвешенное скользящее среднее для прогнозирования будущей загрузки; гибридная модель, сочетающая реактивное снижение частоты и проактивное повышение на основе анализа очереди задач. Каждая стратегия тестировалась в течение 60 минут работы для каждого типа нагрузки, измерения проводились трижды с усреднением результатов [6].

Результаты эксперимента показали следующее. Для нагрузки типа А (периодический сбор данных) статическая пониженная частота 42 МГц позволила сократить энергопотребление на 42 % по сравнению с максимальной частотой при незначительном увеличении времени обработки (на 12 %). Реактивное управление дало выигрыш 51 % по сравнению с максимальной частотой, что объясняется тем, что в паузах между измерениями процессор переходил на минимальную частоту. Проактивное управление показало результат, близкий к реактивному, поскольку характер нагрузки был хорошо предсказуем. Гибридная модель достигла наилучшего результата — сокращение на 58 %, при этом время отклика на внезапное событие не превышало 5 мс. Для нагрузки типа Б (обработка аудио) статическая пониженная частота уже не могла быть использована, поскольку производительности 42 МГц не хватало для обработки сигнала в реальном времени — наблюдались пропуски данных. Реактивное управление справилось с задачей, поднимая частоту до максимальной при поступлении новых данных и снижая в паузах, но выигрыш по сравнению с фиксированной максимальной частотой составил лишь 23 %. Проактивное управление, учитывающее регулярность поступления аудиопакетов, позволило увеличить выигрыш до 31 %. Гибридная модель в этом случае также оказалась наиболее эффективной (сокращение на 34 %). Для нагрузки типа В (шифрование) закономерности оказались иными. Поскольку шифрование выполняется нерегулярно и требует значительных ресурсов, статическая пониженная частота неприменима из-за неприемлемого времени выполнения. Реактивное управление, поднимающее частоту только на время шифрования, дало выигрыш 45 % по сравнению с максимальной частотой (так как между эпизодами шифрования процессор работал на пониженной частоте). Проактивное управление в данном случае не дало преимуществ перед реактивным, так как момент начала шифрования предсказать сложно. Гибридная модель показала результат, аналогичный реактивному.

Обобщая результаты эксперимента, можно сделать следующие выводы. Во-первых, применение DVFS (даже в форме простого управления только частотой) позволяет существенно сократить энергопотребление IoT-устройств без потери производительности при правильно выбранной стратегии. Во-вторых, наиболее эффективной является гибридная модель, сочетающая реактивное снижение частоты при падении загрузки и проактивное повышение при прогнозировании роста нагрузки. В-третьих, выигрыш от применения DVFS сильно зависит от характера нагрузки: наибольший эффект достигается для задач с переменной интенсивностью

вычислений. В-четвертых, статическое понижение частоты может быть приемлемым только для задач с низкими требованиями к производительности, где запас по времени обработки позволяет работать на пониженной частоте постоянно [7].

Реализация DVFS в IoT-устройствах требует разработки алгоритма, который на основе доступной информации (текущая загрузка процессора, история нагрузки, очередь задач, внешние события) принимает решение о целесообразности изменения частоты. Простейшие алгоритмы используют пороговые значения загрузки: например, если загрузка выше 80 %, частота увеличивается; если ниже 30 % — уменьшается. Недостаток такого подхода — колебания частоты при нагрузке, близкой к пороговым значениям, и инерционность реакции на резкие изменения. Более сложные алгоритмы применяют фильтрацию измерений (экспоненциальное сглаживание) и вводят зону гистерезиса, чтобы избежать «дребезга». Такие алгоритмы реализуются с минимальными вычислительными затратами и подходят для большинства IoT-приложений.

В последние годы все большую популярность приобретают алгоритмы на основе машинного обучения, способные предсказывать будущую нагрузку на основе анализа паттернов. В контексте IoT-устройств ограниченной вычислительной мощности наиболее перспективными являются методы обучения без учителя, такие как кластеризация и анализ временных рядов. Например, можно записывать последовательность периодов активности процессора и на основе этой последовательности строить прогноз на следующий период. Простейший способ — использование скользящего среднего или экспоненциально взвешенного среднего с адаптивным коэффициентом сглаживания. Более сложный — применение рекуррентных нейронных сетей (RNN) или сетей с долгой краткосрочной памятью (LSTM), которые хорошо справляются с последовательностями. Однако для IoT-устройств с ограниченной памятью и вычислительными ресурсами такие методы могут быть недоступны. Компромиссным решением является использование простых линейных моделей, обучаемых на лету (например, метод наименьших квадратов для предсказания следующего значения временного ряда).

В исследовании была предложена гибридная модель, сочетающая реактивный и проактивный подходы. Реактивная часть работает на коротких интервалах (десятки миллисекунд), анализируя текущую загрузку. Проактивная часть запускается реже (секунды) и анализирует долгосрочные тренды, корректируя базовую частоту. Такая модель не требует сложных вычислений, но позволяет адаптироваться к изменению характера нагрузки во времени. Для прогнозирования используется простое экспоненциальное сглаживание второго порядка (модель Хольта), которая учитывает и уровень, и тренд временного ряда [8].

Особого внимания заслуживает вопрос о том, как часто можно изменять тактовую частоту. Частые переключения частоты сами по себе потребляют энергию (затраты на перезарядку паразитных емкостей и переключение регулятора напряжения) и могут вызывать нагрев кристалла. Поэтому оптимальная частота переключений — от одного до десяти раз в секунду. Если нагрузка меняется быстрее, имеет смысл не переключать частоту, а работать на фиксированной частоте, рассчитанной на пиковую нагрузку. В исследованных нагрузках наиболее эффективным оказалось переключение не чаще 5 раз в секунду.

Внедрение DVFS в IoT-устройствах требует дополнительных затрат на разработку и тестирование программного обеспечения. Поэтому возникает вопрос: оправданы ли эти затраты? Ответ зависит от масштаба производства и требований к сроку службы устройства. Для устройств, выпускаемых миллионными тиражами (например, счетчики воды или электроэнергии, носимые фитнес-трекеры), даже небольшое сокращение энергопотребления приводит к значительной экономии на элементах питания (меньшая емкость батареи) или к увеличению срока службы без замены батареи, что снижает эксплуатационные расходы. Для устройств, работающих в труднодоступных местах (например, датчики в скважинах), увеличение срока службы с 1 года до 2 лет сокращает затраты на сервисное обслуживание вдвое. В этих случаях затраты на разработку DVFS окупаются многократно. Для мелкосерийных устройств, где стоимость разработки доминирует над стоимостью компонентов, DVFS может быть экономически нецелесообразным, и проще использовать микроконтроллер с пониженным энергопотреблением «в железе» или батарею большей емкости [9].

В проведенном исследовании была проведена приблизительная оценка экономической эффективности для гипотетического устройства-датчика температуры, работающего от батареи CR2032 (емкость 240 мА·ч) и передающего данные раз в минуту через Bluetooth Low Energy. Без DVFS устройство работало 18 месяцев (потребление в активном режиме 15 мА, в режиме сна 5 мкА). С внедрением гибридного DVFS активное потребление снизилось до 10 мА, за счет чего срок службы увеличился до 27 месяцев — на 9 месяцев или на 50 % дольше. Если учесть, что замена батареи стоит 500 рублей (работа техника), то за 5 лет эксплуатации экономия на сервисных вызовах составит 1000 рублей (вместо трех замен две). При себестоимости устройства 2000 рублей экономия в 1000 рублей за срок службы является существенной.

Развитие технологий энергосбережения в IoT-устройствах идет по нескольким направлениям. Во-первых, совершенствуются сами микроконтроллеры: уменьшаются технологические нормы (28 нм, 22 нм, 16 нм), что снижает как динамическое, так и статическое энергопотребление. Появляются новые архитектуры, оптимизированные для IoT, например, Arm Cortex-M0+ с низким энергопотреблением и расширенными возможностями DVFS. Во-вторых, развиваются алгоритмические методы: машинное обучение на периферии, позволяющее выполнять анализ данных без передачи их в облако, что сокращает время работы радиомодуля — самого энергоемкого компонента многих IoT-устройств. В-третьих, совершенствуются протоколы беспроводной связи: появляются низкоэнергетические режимы Bluetooth 5.2, ZigBee 3.0, LoRaWAN, позволяющие передавать данные с минимальными затратами энергии [10].

Особого внимания заслуживают методы сбора энергии из окружающей среды: солнечной, тепловой, вибрационной, радиоволновой. В комбинации с DVFS эти методы могут привести к созданию полностью автономных устройств, не требующих замены батарей. Когда энергии достаточно, DVFS поднимает частоту и напряжение, позволяя выполнять более сложные вычисления; когда энергии мало, частота снижается, чтобы не допустить разрядки накопителя. Адаптивные алгоритмы, управляющие частотой в зависимости от уровня энергии, являются перспективной областью исследований.

На основе проведенных исследований и анализа литературных данных можно сформулировать ряд практических рекомендаций для разработчиков IoT-устройств, стремящихся оптимизировать энергопотребление с помощью динамического управления частотой.

Первая рекомендация касается выбора микроконтроллера. При прочих равных условиях следует отдавать предпочтение моделям, поддерживающим динамическое изменение частоты с минимальными задержками на переключение. Важным параметром является время перехода с одной частоты на другую: если оно составляет микросекунды, то управление может осуществляться практически без потерь; если миллисекунды, то частоту нецелесообразно изменять при кратковременных изменениях нагрузки. Второй важный параметр — наличие встроенного регулятора напряжения. Если микроконтроллер поддерживает изменение напряжения питания ядра, то выигрыш от DVFS может быть увеличен в разы (за счет квадратичной зависимости). Если такой возможности нет, управление только частотой все равно дает существенный выигрыш, особенно для нагрузок с большими паузами между вычислениями.

Вторая рекомендация связана с выбором стратегии управления. Для простых устройств с предсказуемой нагрузкой (например, датчики, передающие показания с фиксированным интервалом) может оказаться достаточной статическая пониженная частота, выбранная из условия успешной обработки данных в отведенное время. Для устройств, работающих в режиме реального времени, где важна минимизация задержек, предпочтительнее реактивное управление с порогами загрузки. Наиболее гибким и эффективным является проактивное управление с прогнозированием нагрузки, однако его реализация требует больших вычислительных затрат и может быть оправдана только для относительно мощных IoT-устройств с избыточной производительностью.

Третья рекомендация касается реализации DVFS в программном обеспечении. При работе без операционной системы управление частотой должно быть интегрировано в главный цикл программы. Перед каждым блоком вычислений следует оценить необходимую производительность и установить соответствующую частоту. Для этого полезно использовать системный таймер, измеряющий время выполнения предыдущих операций. Если фактическое время оказалось меньше предельно допустимого, частоту можно снизить; если больше — повысить. Важно предусмотреть гистерезис, чтобы избежать частых переключений частоты туда-обратно. При работе с RTOS управление частотой может быть вынесено в отдельную задачу (idle task), которая понижает частоту в моменты простоя системы и повышает при поступлении событий. Во многих RTOS предусмотрены встроенные механизмы для этого (например, tickless idle mode в FreeRTOS).

Четвертая рекомендация — сочетание DVFS с другими методами энергосбережения. Наиболее эффективно DVFS работает в комбинации с режимами сна. В периоды полного бездействия микроконтроллер должен переводиться в глубокий сон (Stop или Standby mode), а при выходе из сна частота может устанавливаться на минимальном уровне, достаточном для оценки характера поступившего события. Если событие требует интенсивной обработки, частота повышается. Такой подход позволяет минимизировать энергопотребление во всех состояниях: статическое — за счет сна, динамическое — за счет DVFS.

Пятая рекомендация касается учета энергопотребления периферийных устройств. DVFS управляет только энергопотреблением ядра микроконтроллера, но не влияет на датчики, радиомодули, дисплеи и другие компоненты. В многих IoT-устройствах периферия может потреблять значительно больше, чем ядро. Поэтому, прежде чем внедрять сложные алгоритмы DVFS, необходимо убедиться, что именно ядро является основным потребителем энергии. В противном случае усилия по оптимизации могут не дать ожидаемого эффекта. Рекомендуется проводить профилирование энергопотре-

бления всего устройства, чтобы выявить «узкие места» и направить усилия на их устранение.

Заключение

В заключение следует отметить, что динамическое управление тактовой частотой является мощным и доступным инструментом оптимизации энергопотребления в IoT-устройствах. Оно не требует замены элементной базы или кардинального пересмотра архитектуры; достаточно внести изменения в программное обеспечение. При этом выигрыш в энергопотреблении может достигать десятков процентов. Разработчикам IoT-устройств рекомендуется включать DVFS в арсенал методов энергосбережения и использовать его при проектировании новых продуктов, особенно предназначенных для автономной работы от батарей в течение длительного времени. Предложенные в статье рекомендации и результаты эксперимента могут служить практическим руководством для внедрения DVFS в реальных проектах. Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание самообучающихся алгоритмов, адаптирующихся к конкретным условиям эксплуатации, а также на интеграцию DVFS с другими методами энергосбережения, такими как управление напряжением питания и адаптивное управление частотой беспроводной связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев А.И., Колбанев А.М., Колбанев М.О. Модель оптимизации энергопотребления умными вещами // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. №7. С. 46–51.
2. Довгаль В.А., Довгаль Д.В. Анализ проблем обеспечения информационной безопасности беспроводных сенсорных сетей и методов обеспечения безопасности интернета вещей // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2021. №1(276). С. 75–83.
3. Иванов А.А., Петров Б.Б. «Современные технологии мониторинга энергопотребления». Журнал «Энергоэффективность», 2020. С. 181–186.
4. Кузнецов С.Г. «Безопасность IoT-систем в энергетическом секторе». Издательство «Технологии будущего», 2019. С. 91–95.
5. Мутханна А.С. Модель интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» и метод выгрузки трафика для сетей интернета вещей высокой и сверхвысокой плотности // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. №3. С. 42–59.
6. Смирнова Е.В. «Применение машинного обучения для оптимизации энергосистем». Научный сборник «Информационные технологии в энергетике», 2021. С. 85–89.
7. Шиков С.А. Проблемы информационной безопасности: интернет вещей // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 27. №1. С. 27–40.
8. Шешалевич В.В. LPWAN-низкопотребляющие сети большого радиуса действия. Связь для интернета вещей // Безопасность информационных технологий. 2023. Т. 24. №3. С. 7–17.
9. Черняк Л.Г. Интернет вещей: новые вызовы и новые технологии // Открытые системы. СУБД. 2023. №4. С. 14–18.
10. Ядровская М.В., Поркшеян М.В., Синельников А.А. Перспективы технологии интернета вещей // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2021. Т. 21. №2. С. 207–217.

© Майданов Юрий Сергеевич (maidanov@sibguti.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.22

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

USING FUZZY LOGIC ALGORITHMS TO DETERMINE THE CONDITION OF HETEROGENEOUS TELECOMMUNICATION NETWORKS

A. Medelyanova
E. Bychkov

Summary. The article discusses the issues of determining the state of telecommunication network equipment in an uncertain environment and analyzes and processes statistical data of events on network elements using fuzzy logic algorithms. The article also proposes membership functions for determining the duration of damage and service loss, performs calculations with fuzzy sets, and determines the degree of truth of the modus ponens rule.

Keywords: telecommunication network, service loss, duration of damage, algorithm, fuzzy logic, statistics, fuzzy sets, membership function, modus ponens rule.

Меделянова Александра Витальевна
Аспирант, ФГБОУ ВО Омский государственный университет путей сообщения
alexia79@mail.ru
Бычков Евгений Дмитриевич
Доктор технических наук, ФГБОУ ВО Омский государственный университет путей сообщения
bychkov_ev@mail.ru

Аннотация. В материалах статьи рассмотрены вопросы определения состояния оборудования телекоммуникационной сети в неопределенной обстановке, выполнены анализ и обработка статистических данных событий на элементах сети с использованием алгоритмов нечеткой логики. В статье также предложены функции принадлежности для определения параметров длительности повреждения и потери услуг, выполнены расчеты с нечеткими множествами, определена степень истинности правила modus ponens.

Ключевые слова: телекоммуникационная сеть, потеря услуг, длительность повреждения, алгоритм, нечеткая логика, статистика, нечеткие множества, функция принадлежности, правило modus ponens.

Введение

Гетерогенные телекоммуникационные сети представляют собой сложные системы, состоящие из разнородного оборудования, работающего в различных условиях. Прогнозирование состояния такого оборудования является важной задачей для обеспечения бесперебойной работы сети и минимизации потерь [1].

Традиционные методы прогнозирования часто сталкиваются с трудностями из-за неполноты данных, наличия шумов и неопределенности в описании процессов. Нечеткая логика предоставляет эффективный инструмент для решения задач, связанных с неопределенностью и неточностью информации. Она позволяет моделировать сложные системы, используя лингвистические переменные и нечеткие множества.

Применение нечеткой логики в прогнозировании состояния оборудования гетерогенных сетей имеет ряд преимуществ:

1) Учет нечеткости — нечеткая логика позволяет оперировать с нечеткими понятиями, такими как «высокая нагрузка», «низкое качество сигнала», что более соответствует реальным условиям работы сети.
2) Гибкость — модели на основе нечеткой логики легко адаптируются к изменениям в сети и новым типам оборудования.
3) Интерпретируемость — правила нечеткой логики могут быть представлены в виде лингвистических выражений, что облегчает их понимание и настройку.

Предметом моделирования и прогнозирования в таких телекоммуникационных сетях является система, воспроизводящая объект исследования так, что на ее основе могут быть изучены структура и размещение явлений, их изменения во времени, связи и зависимости [2].

Для решения подобных задач, связанных с анализом данных при наличии случайных воздействий, предназначен аппарат прикладной статистики, составной частью которого являются статистические методы прогнозирования. Эти методы позволяют выявлять закономерности на фоне случайностей, делать обоснованные прогнозы и оценивать вероятность их выполнения [3].

Постановка задачи

Для оценки состояния оборудования коммутаторов доступа и коммутаторов агрегации требуется выполнить

прогнозирование состояния коммутаторов, используя алгоритмы нечеткой логики.

Сбор исходных данных для прогнозирования состояния оборудования гетерогенных телекоммуникационных сетей

Для выполнения исследований использовались исходные данные состояния оборудования коммутаторов доступа и коммутаторов агрегации за годовой период 2025 год из программы мониторинга SOVA.

Исходные данные представлены массивом, состоящим из 7958 строк (временные срезы состояний оборудования) и 5 столбцов (характеристики событий на оборудовании коммутаторов доступа и коммутаторов агрегации телекоммуникационной сети).

Фрагмент исходных данных, содержащий следующие показатели: дата и время события, территория, тип коммутатора, длительность повреждения, потеря услуг/количество абонентов, представлен в таблице 1.

Таблица 1.

Фрагмент исходных данных

№ п/п	Дата и время события	Территория	Тип коммутатора	Длительность повреждения, мин.	Потеря услуг Количество абонентов
1	01.01.2025 11:09:25	СЦ г. Тара	Коммутатор доступа	4	3
2	04.01.2025 17:29:59	СЦ г. Калачинск	Коммутатор доступа	51	20
3	05.01.2025 16:09:23	СЦ рп. Таврическое	Коммутатор доступа	11	2
4	06.01.2025 19:20:48	СЦ г. Омск	Коммутатор доступа	3	16
5	08.01.2025 11:30:56	СЦ рп. Марьяновка	Коммутатор доступа	55	3
…	…	…	…	…	…
7958	28.12.2025 10:00:05	СЦ г. Омск	Коммутатор агрегации	16	162

Источник: Составлено автором на основании выгрузки из отчетных данных системы мониторинга SOVA.

Для решения поставленной задачи необходимо определить состояние телекоммуникационной сети трех видов [4,5]:

1. B_1 — пред отказное состояние сети,
2. B_2 — пред аварийное состояние сети,
3. B_3 — аварийное состояние сети.

Вводятся следующие правила базовых импликативных нечетких высказываний:

A_1 — если длительность повреждения малая и потеря услуг незначительная, то следует выбирать состояние B_1.

A_2 — если длительность повреждения средняя и потеря услуг средняя, то следует выбирать состояние B_2.

A_3 — если длительность повреждения большая и потеря услуг значительная, то следует выбирать состояние B_3.

Решение данной задачи разобьем на этапы [6,7,8].

Этап 1.

На данном этапе определим следующие нечеткие числа:

C_1 = малая, C_2 = средняя, C_3 = большая.

D_1 = незначительная, D_2 = средняя, D_3= значительная.

По данным табл. 1 определяем область функции принадлежности для длительности повреждений и потерь услуг (количество пострадавших абонентов при аварийной ситуации на сети).

Графики функции принадлежности длительности повреждения и потери услуг представлен на рис. 1. и рис. 2.

Данные нечеткие числа входят в нечеткие высказывания и имеют следующий вид (задаем их априорно, определяем по графикам функции принадлежностей на рис. 1. и рис. 2):

$$C_1 = \left\{\frac{0,6}{2}, \frac{0,2}{4}\right\}, C_2 = \left\{\frac{0}{2}, \frac{0,9}{30}, \frac{0,2}{75}\right\}, C_3 = \left\{\frac{0,2}{130}, \frac{0,7}{75}\right\}.$$

$$D_1 = \left\{\frac{0,8}{2}, \frac{0,1}{8}\right\}, D_2 = \left\{\frac{0,3}{8}, \frac{0,8}{35}, \frac{1,0}{40}, \frac{0,8}{45}, \frac{0,3}{70}\right\},$$

$$D_3 = \left\{\frac{0}{40}, \frac{0,9}{140}, \frac{0,2}{70}\right\}.$$

В соответствии с правилами модификации сложных нечетких высказываний A_1, A_2, A_3 могут быть преобразованы в $\widetilde{\propto_1} \equiv L_1$ есть U_1, $\widetilde{\propto_2} \equiv L_2$ есть U_2, $\widetilde{\propto_3} \equiv L_3$ есть U_3.

При этом L_1, L_2, L_3 являются нечеткими отношениями, функции принадлежности которых построены по правилам модификации [4,6,7,8]:

$$M_{L1}(x,y) = \\ = \left(M_{C1}(x) \wedge M_{D1}(y)\right) \vee \left(M_{C1}(x) \wedge M_{D2}(y)\right). \quad (1)$$

$$M_{L2}(x,y) = \\ = \left(M_{C1}(x) \wedge M_{D3}(y)\right) \vee \left(M_{C2}(x) \wedge M_{D1}(y)\right). \quad (2)$$

$$M_{L3}(x,y) = \\ = \left(M_{C2}(x) \wedge M_{D2}(y)\right) \vee \left(M_{C3}(x) \wedge \vee M_{D1}(y)\right). \quad (3)$$

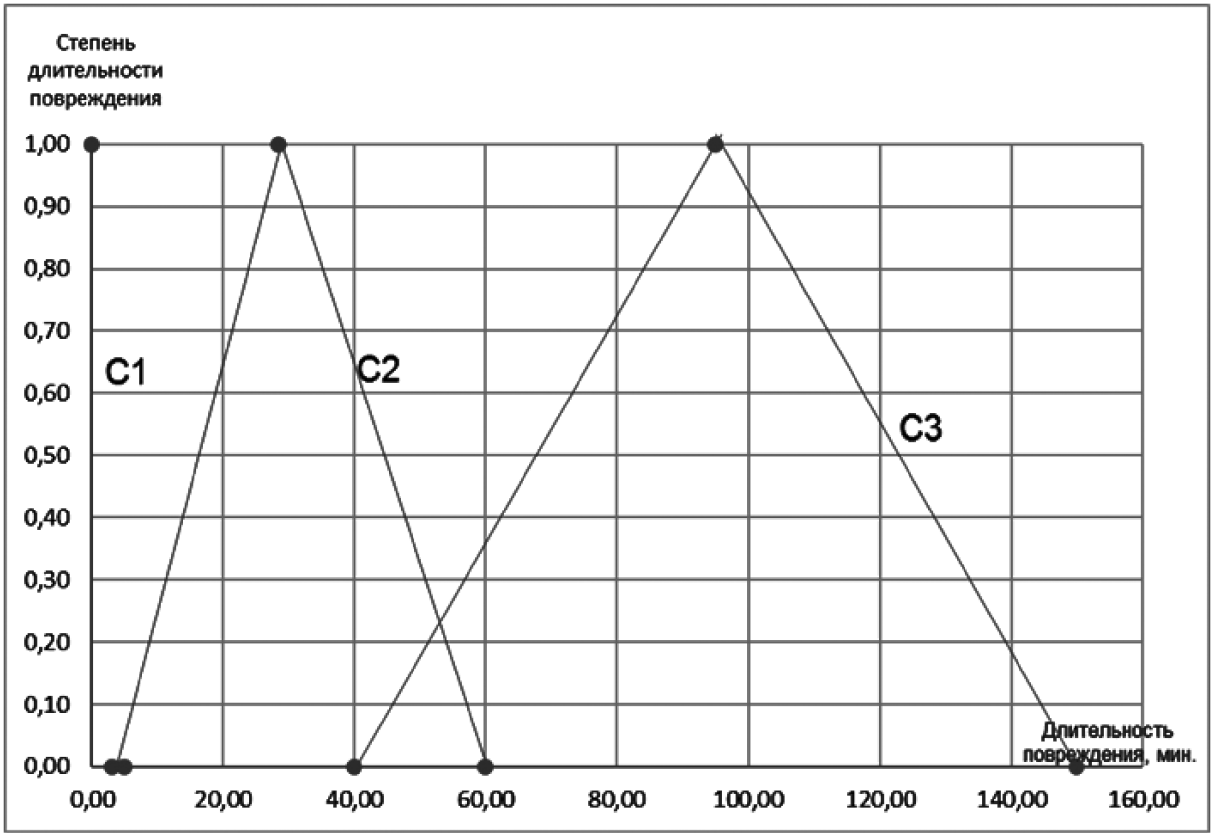


Рис. 1. График функции принадлежности длительности повреждения

Источник: Составлено автором на основании данных табл. 1.

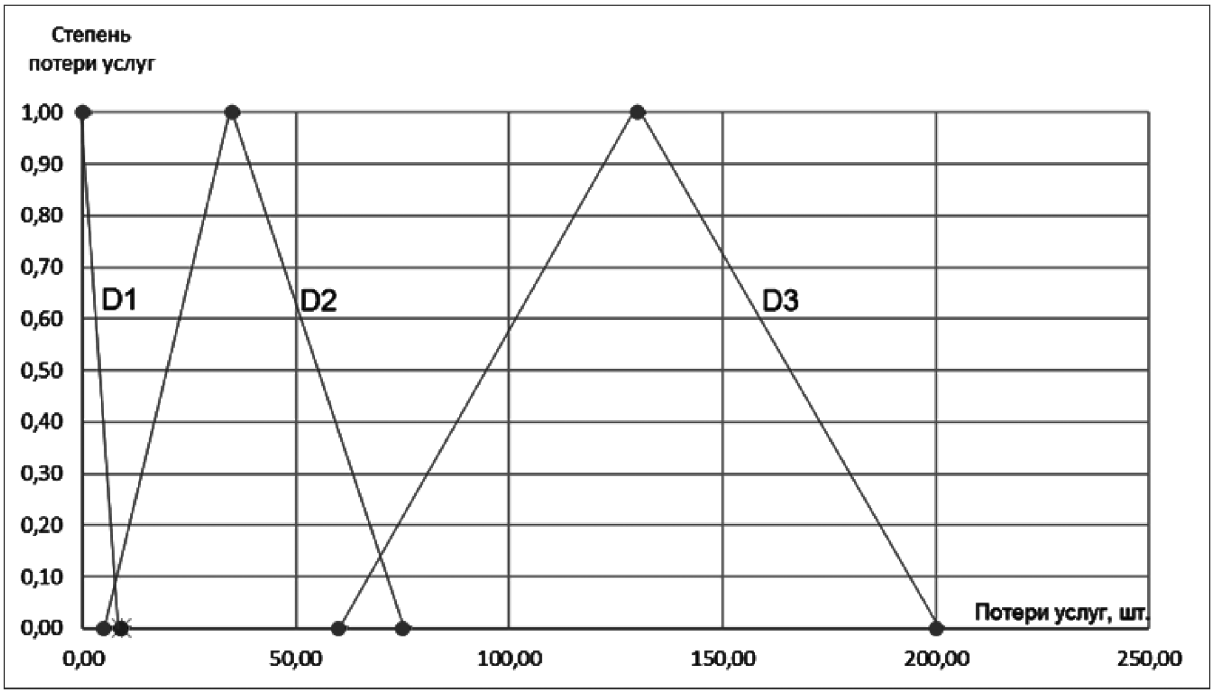


Рис. 2. График функции принадлежности потери услуг

Источник: Составлено автором на основании данных табл. 1.

Этап 2.

На втором этапе введем следующие обозначения для четких высказываний [4,6,7,8]:

U_1= <Рекомендуется выбирать состояние оборудования вида B_1>:

$$U_1 = \left\{\frac{1,0}{B_1}, \frac{0}{B_2}, \frac{0}{B_3}\right\}. \quad (4)$$

U_2= <Рекомендуется выбирать состояние B_2>:

$$U_2 = \left\{\frac{0}{B_1}, \frac{1,0}{B_2}, \frac{0}{B_3}\right\}. \quad (5)$$

U_3= <Рекомендуется выбирать состояние B_3>:

$$U_3 = \left\{\frac{0}{B_1}, \frac{0}{B_2}, \frac{1,0}{B_3}\right\}. \quad (6)$$

Этап 3.

На третьем этапе предположим, что длительность повреждения составляет 4 минуты и потеря услуг составляет 6 абонентов. Это означает, что в терминах нечетких чисел имеем отношение с четкими одноэлементными числами.

$$F = \left\{\frac{1,0}{4}\right\}, G = \left\{\frac{1,0}{6}\right\}$$

Отношение четких чисел составит:

$$L = \left\{\frac{1,0}{(4;6)}\right\}. \quad (7)$$

Этап 4.

Поставим задачу выбора одного из трех состояний, учитывая полученное отношение (7).

Для этого проведем оценку степени истинности заданной схемы вывода путем декомпозиции на три схемы вывода. Отображение:

$A_1: L_1 \to U_1\, A_{1i}: L_1 \to U_1\, A_{2i}: L_2 \to U_2\, A_{3i}: L_3 \to U_3$

$A_2: L_2 \to U_2 \frac{R}{Z_i}\frac{R}{Z_i}\frac{R}{Z_i}$

$A_3: L_3 \to U_3$

$$\frac{R}{Z_i}, i = 1,2,3$$

Для осуществления расчетов необходимо провести подготовительные построения.

Пусть задано x=4 и y=6.

Подставив значения в формулу (1), получаем:

$$M_{L1}(4,6) = \left(M_{C1}(4) \wedge M_{D1}(6)\right) \vee \left(M_{C1}(4) \wedge M_{D2}(6)\right) =$$
$$= (0,2 \wedge 0,3) \vee (0,4 \wedge 0,1) = 0,2.$$

Подставив значения в формулу (2), получаем:

$$M_{L2}(4,6) = \left(M_{C1}(4) \wedge M_{D3}(6)\right) \vee \left(M_{C2}(4) \wedge M_{D1}(6)\right) =$$
$$= (0,2 \wedge 0) \vee (0,1 \wedge 0,3) = 0,1.$$

Подставив значения в формулу (3), получаем:

$$M_{L3}(4,6) = \left(M_{C2}(4) \wedge M_{D2}(6)\right) \vee \left(M_{C3}(4) \wedge M_{D1}(6)\right) =$$
$$= (0,1 \wedge 0,1) \vee (0 \wedge 0,3) = 0,1.$$

Из этого следует:

$$L_1 = \left\{\frac{0,2}{(4;6)}\right\}, L_2 = \left\{\frac{0,1}{(4;6)}\right\}, L_3 = \left\{\frac{0,1}{(4;6)}\right\}, L = \left\{\frac{1,0}{(4;6)}\right\}$$

Введем показатель T — степень истинности — обратное отношение. Отсюда следует:

$$T\left(\frac{L}{L_1}\right) = \left\{\frac{0,2}{1,0}\right\}, T\left(\frac{L}{L_2}\right) = \left\{\frac{0,1}{1,0}\right\}, T\left(\frac{L}{L_3}\right) = \left\{\frac{0,1}{1,0}\right\},$$
$$T\left(\frac{U_i}{U_i}\right) = \left\{\frac{1,0}{1,0}\right\}, T\left(\frac{U_i}{U_j}\right) = \left\{\frac{0}{1,0}\right\}, \text{ при } i \neq j.$$

Этап 5.

Далее определим степень истинности для схемы вывода A_{11}, используя выражение:

$$\widetilde{T_{11}} = \widetilde{T_{11}}(A_{11}; L, U_1). \quad (8)$$

Для вычисления выражения применим формулу:

$$M_{\widetilde{T_{11}}}(\tau) = 1 \wedge \left(1 - M_{T\left(\frac{L}{L_1}\right)}(\tau) + M_{T\left(\frac{Z_1}{Z_1}\right)}(\tau)\right), \tau \in [0;1]$$

При τ=1,0 получим:

$$M_{\widetilde{T_{11}}}(1,0) = 1 \wedge \left(1 - M_{T\left(\frac{L}{L_1}\right)}(1,0) + M_{T\left(\frac{Z_1}{Z_1}\right)}(1,0)\right) =$$
$$= 1 \wedge (1 - 0,2 + 1) = 1 \wedge 1,8 = 1,0.$$

Найдем степень истинности для схемы вывода A_{21}:

$$\widetilde{T_{21}} = \widetilde{T_{21}}(A_{21}; L, U_1)$$

$$M_{\widetilde{T_{21}}}(\tau) = 1 \wedge \left(1 - M_{T\left(\frac{L}{L_2}\right)}(\tau) + M_{T\left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)}(\tau)\right),$$

$$M_{\widetilde{T_{21}}}(1,0) = 1 \wedge \left(1 - M_{T\left(\frac{L}{L_2}\right)}(1,0) + M_{T\left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)}(1,0)\right) =$$
$$= 1 \wedge (1 - 0,1 + 0) = 0,9$$

Также определим степень истинности для третьей схемы вывода A_{31}:

$$\widetilde{T_{31}} = \widetilde{T_{31}}(A_{31}; L, U_1)$$

$$M_{\widetilde{T_{31}}}(\tau) = 1 \wedge \left(1 - M_{T\left(\frac{L}{L_3}\right)}(\tau) + M_{T\left(\frac{Z_1}{Z_3}\right)}(\tau)\right)$$

$$M_{\widetilde{T_{31}}}(1,0) = 1 \wedge \left(1 - M_{T\left(\frac{L}{L_3}\right)}(1,0) + M_{T\left(\frac{Z_1}{Z_3}\right)}(1,0)\right) =$$

$$= 1 \wedge (1 - 0{,}1 + 0) = 0{,}9.$$

Этап 6.

Определим результирующие степени истинности правила вывода для выбора каждого вида состояния.

К примеру, при выборе первого вида состояния B_1 степень истинности определяется, как:

$$M_{\widetilde{T_1}}(\tau) = \min\left(M_{\widetilde{T_{11}}}, M_{\widetilde{T_{21}}}, M_{\widetilde{T_{31}}}\right) = \min(1{,}0; 0{,}9; 0{,}9) = 0{,}9.$$

При выборе второго вида состояния B_2 степень истинности определяется, как:

$$M_{\widetilde{T_2}}(\tau) = \min\left(M_{\widetilde{T_{12}}}, M_{\widetilde{T_{22}}}, M_{\widetilde{T_{32}}}\right) = \min(0; 1{,}0; 0) = 0.$$

При выборе третьего вида состояния B_3 степень истинности определяется, как:

$$M_{\widetilde{T_3}}(\tau) = \min\left(M_{\widetilde{T_{13}}}, M_{\widetilde{T_{23}}}, M_{\widetilde{T_{33}}}\right) = \min(0; 0; 1{,}0) = 0$$

Далее из трех значений $M_{\widetilde{T_1}}(\tau), M_{\widetilde{T_2}}(\tau), M_{\widetilde{T_3}}(\tau)$ выбираем максимальное, т.е. выбор состояния B_1, B_2, B_3 максимизирует степень истинности правила modus ponens.

Из этого следует, что при длительности повреждения 4 минуты и потери услуг 6 абонентов является наиболее приемлемым выбор состояния сети B_1 — пред отказное состояние сети.

Обсуждение результатов

В проведенном исследовании были рассмотрены вопросы использования алгоритмов нечеткой логики применительно к определению состояния оборудования телекоммуникационной сети. Приведенный пример показывает, что данная модель работоспособна для определения элементов телекоммуникационной сети в неопределенных условиях.

Заключение

Предложенная модель дает оперативную оценку состояния элементов сети в реальном масштабе времени в сложной ситуационной обстановке.

Нечеткая логика является перспективным инструментом для прогнозирования состояния оборудования гетерогенных телекоммуникационных сетей. Ее применение позволяет повысить надежность и эффективность работы сетей, снизить затраты на обслуживание и предотвратить сбои оборудования сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Меделянова А.В. Прогнозирование состояния оборудования сети передачи данных на основе анализа реальной статистики перезагрузок коммутаторов// «Известия Тульского государственного университета» № 5, 2024. Тула, 2024.
2. Меделянова А.В. Обработка статистики отказов оборудования на телекоммуникационной сети с целью прогнозирования состояний элементов сети// в сборнике научных статей по итогам работы Международного научного форума Наука и инновации — современные концепции. Москва, 2024. Том 2.
3. Меделянова А.В., Бычков Е.Д. Исследование реальной статистики повреждений на гетерогенной телекоммуникационной сети // в сборнике: Актуальные проблемы развития транспортно-промышленного комплекса: инфраструктурный, управленческий и образовательный аспекты. Материалы XX Международной научно-практической конференции. Федеральное агентство железнодорожного транспорта, Министерство транспорта Донецкой народной республики. Донецкий институт железнодорожного транспорта. Ростовский государственный университет путей сообщения. 2023.
4. Бычков Е.Д. Математические модели управления состояниями цифровой телекоммуникационной сети с использованием теории нечетких множеств/ Монография, Омск, 2010.
5. Сигел Э. Практическая бизнес-статистика.: Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2002.
6. Medelyanova A.V. Research of a mathematical model for assessing the state of telecommunication network elements using fuzzy set theory algorithms// International Scientific Conference «European Research: Theory, Practice and Innovation». Hungary, 2026.
7. Medelyanova A.V. Advantages of using fuzzy logic to predict and determine the condition of telecommunication network equipment in real time//International Scientific Conference "Scientific research of the sco countries: Synergy and Integration", China, 2025.
8. Меделянова А.В., Бычков Е.Д. Исследование прогнозирования аварийных событий на телекоммуникационной сети с применением теории нечеткой логики// в сборнике научных статей по итогам работы научной конференции, посвященной Дню Российской науки Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте. Омск, 2025.

© Меделянова Александра Витальевна (alexia79@mail.ru); Бычков Евгений Дмитриевич (bychkov_ev@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.26

ЯЗЫКОВАЯ СПЕЦИФИКА ДАТАСЕТОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОДЛИННОСТИ РУКОПИСНОЙ ПОДПИСИ

LANGUAGE-SPECIFIC FEATURES OF DATASETS FOR HANDWRITTEN SIGNATURE AUTHENTICITY VERIFICATION

S. Ovechkina
S. Hreniykov
A. Brysin
A. Ladynin

Summary. This paper presents a comprehensive study of the automatic verification of handwritten signatures. The work covers four aspects: the forensic criteria of the identification examination of signatures used by handwriting experts, including the system of general, particular and diagnostic features; the language-specific characteristics of public signature datasets for European, Arabic, East Asian (CJK) and Indian writing systems, with a description of the key visual features that neural networks rely on during training; and a comparative alphabetic analysis of the Russian and English languages with respect to the visual coincidence of the printed and handwritten letterforms, applied to the study of anthroponyms.

Keywords: signature verification, neural network, Vision Transformer, handwriting (forensic) examination, dataset, domain shift, alphabetic analysis, anthroponyms, threat model, GAN, biometrics.

Овечкина София Аркадьевна
МИРЭА — Российский технологический университет
brysin@rambler.ru
Хреняков Степан Владимирович
МИРЭА — Российский технологический университет
brysin@rambler.ru
Брысин Андрей Николаевич
кандидат технических наук, доцент,
МИРЭА — Российский технологический университет
brysin@rambler.ru
Ладынин Андрей Иванович
доктор экономических наук, профессор,
МИРЭА — Российский технологический университет
Andrey.ladynin@hotmail.com

Аннотация. Настоящая статья представляет собой комплексное исследование задачи автоматической верификации рукописных подписей. Работа охватывает четыре аспекта: криминалистические критерии идентификационного исследования подписей, применяемые специалистами-почерковедами, включая систему общих, частных и диагностических признаков; языковую специфику публичных датасетов подписей для европейских, арабских, восточных (CJK) и индийских письменных систем с описанием ключевых визуальных признаков, на которые ориентируются нейронные сети при обучении; сравнительный алфавитный анализ русского и английского языков в части визуального совпадения печатных и письменных начертаний букв с применением к исследованию антропонимов.

Ключевые слова: верификация подписи, нейронная сеть, Vision Transformer, почерковедческая экспертиза, датасет, доменный сдвиг, алфавитный анализ, антропонимы, модель угроз, ГАН, биометрия.

Рукописная подпись занимает особое место в системе идентификации личности: она одновременно является биометрическим объектом, юридически значимым реквизитом документа и предметом судебно-криминалистической экспертизы. Несмотря на стремительное распространение электронных средств удостоверения, бумажный документооборот сохраняет полную юридическую силу в большинстве правоотношений — нотариальных, наследственных, банковских, корпоративных. Это делает подделку рукописных подписей устойчивым и технологически развивающимся вектором мошенничества. По данным судебной практики, именно подпись как реквизит выступает предметом фальсификации в значительной доле дел, квалифицируемых по статье 327 Уголовного кодекса Российской Федерации, нередко в совокупности со статьёй 159 («Мошенничество») [1].

Технологическое развитие последнего десятилетия изменило ландшафт угроз. Если ещё двадцать лет назад подделка подписи требовала ручного мастерства и значительного времени, то сегодня нарушитель, оснащённый генеративной состязательной нейронной сетью (ГАН), способен синтезировать визуально правдоподобные образцы по нескольким фотографиям. Механические манипуляторы с числовым программным управлением (ЧПУ), оснащённые шариковой ручкой, физически воспроизводят траектории подписей с такой точностью, что offline системы автоматической верификации [2]. принимают результат в 32–40 % случаев без специальной дообученности. Параллельно методы глубокого обучения — прежде всего свёрточные сети и трансформеры — значительно улучшили точность автоматической верификации [3], однако за этим прогрессом скрывается нерешённая проблема доменного сдвига: система, достигающая равного уровня ошибок (EER) менее 2 %

на крупнейшем европейском датасете GPDS [4], ухудшает результат при переносе на другую письменную систему — будь то арабский, хинди или, как предполагается, кириллический скрипт.

Формируется оригинальная база данных, включающая подлинные подписи, ручные подделки различного уровня искусности и механические подделки, воспроизведённые гравировальным станком с ЧПУ с применением держателя пера, изготовленного методом трёхмерной печати. Результаты первичного эксперимента показали, что нейронная сеть SigViT, обученная исключительно на латинских образцах, не способна надёжно верифицировать кириллические подписи — ни подлинные, ни поддельные, что подтверждает необходимость кириллической составляющей в обучающей выборке.

Общая методика идентификационного исследования подписи, разработанная рядом отечественных авторов [5], предусматривает четыре последовательных этапа: предварительное исследование, раздельное детальное исследование, сравнительное исследование и оценку с формулировкой вывода

Для каждого совпадающего признака оцениваются устойчивость (насколько постоянно он проявляется в разных образцах), сложность исполнения (чем сложнее воспроизвести признак, тем выше его идентификационная ценность) и диагностическая значимость. Для различающихся признаков устанавливается их существенность и независимость от условий выполнения. Оценка совокупности признаков определяет характер вывода. Категорический положительный вывод (подпись выполнена конкретным лицом) формируется при наличии устойчивого комплекса идентификационно значимых совпадающих признаков в отсутствие существенных различий. Категорический отрицательный вывод (подпись выполнена иным лицом) — при наличии



Рис. 1. Методика идентификационного исследования подписи

устойчивых и существенных различий, не объяснимых условиями выполнения. Вероятный вывод свидетельствует о том, что совокупность признаков недостаточна для категорического суждения. Вывод о невозможности решения вопроса по существу (НПВ) формируется при краткости подписи, низком качестве материала или высокой вариативности почерка исполнителя [5].

Русский язык имеет свои уникальные особенности, известно, что только в нем употребляются определенно-личные односоставные предложения [6] чего нет в других языках мира. Часть букв русского языка Отсутствие открытого русскоязычного датасета рукописных подписей является одним из ключевых препятствий для применения современных систем АВП (автоматическая верификация подписей) в отечественном документообороте. В рамках настоящего исследования разрабатывается оригинальная база данных, включающая три класса образцов.

Для сбора оригиналов используется бланк формата А4, расположенный горизонтально. Бланк размечен на 16 равных прямоугольных полей, образующих матрицу из четырёх строк и четырёх столбцов. Каждая строка закреплена за одним экземпляром подписанта: четыре поля предназначены для четырёх последовательных воспроизведений подписи слева направо. В крайнем левом поле строки проставляется порядковый номер экземпляра, что обеспечивает однозначную идентификацию при последующей оцифровке. Допускается использование различных пишущих инструментов — шариковых, гелевых или перьевых ручек, карандашей — в том числе чернил различных цветов, что повышает вариативность материала.

Для сбора ручных подделок на каждого подписанта формируется отдельный бланк аналогичной структуры. К участию привлекаются четыре имитатора — лица без профессиональной подготовки в области почерковедения. Каждому имитатору предъявляется бланк с оригинальными подписями данного подписанта. Имитатор занимает одну строку бланка подделок: имитатор с порядковым номером i выполняет воспроизведения в строке i. В пределах своей строки он последовательно имитирует все четыре варианта оригинала слева направо. Итого для каждого варианта оригинала формируются четыре подделки, выполненные четырьмя разными людьми, по одной попытке каждого.

Класс машинных подделок создаётся с применением гравировального станка с числовым программным управлением, оснащённого держателем пера, изготовленным методом послойного наплавления (FDM). Управляющая G-code-программа генерируется по растеризованному изображению подписи. На каждый вариант оригинала создаётся четыре машинные подделки с разными углами наклона. Первичный эксперимент показал неоднозначные результаты: нейронная сеть SigViT, обученная на иностранных подписях, не давала надёжных предсказаний для русскоязычных образцов в целом — как подлинных, так и машинных. Данный факт подтверждает существование доменного сдвига и обосновывает необходимость дообучения на кириллическом материале.

Оцифровка бланков производится с разрешением не менее 300 dpi в режиме RGB. Каждая подпись вырезается в отдельный файл, изображения приводятся к размеру 224 × 224 пикселя методом масштабирования с сохранением пропорций и добавления белых полей. Все данные обезличиваются: сведения о личности участников не включаются в датасет. Структура хранения полностью совместима с пайплайном обучения модели SigViT: папки вида ID/ для оригиналов и ID_forg/ для подделок.

Языковая специфика датасетов и ключевые признаки для нейросетевой верификации. Рукописная подпись как биометрический объект существенно различается в зависимости от письменной культуры подписанта. Это проявляется не только в визуальном облике образцов, но и в том, какие именно признаки несут идентификационную нагрузку и, следовательно, должны быть извлечены нейронной сетью. Понимание этих различий принципиально важно для проектирования многоязычных и кросс-доменных систем верификации [8].

Крупнейшими открытыми ресурсами, в которых содержаться англоязычные датасеты являются GPDS (960 авторов, 24 оригинала и 30 умелых подделок на автора), CEDAR (55 авторов) и MCYT-75 (75 авторов) [4]. Европейские подписи представляют собой, как правило, абстрактный личный росчерк, не совпадающий с полным написанием имени и фамилии. Буквенный состав может полностью отсутствовать или быть редуцирован до начальных букв. Именно поэтому ключевыми признаками для нейронных сетей, обученных на европейских данных, являются: глобальная топология траектории, характер петель, угловые соотношения элементов, пространственные пропорции [9].

Арабское письмо принципиально отличается от европейского сплошным курсивным характером: большинство букв письма меняет форму в зависимости от положения в слове (изолированная, начальная, серединная, конечная формы). Арабские подписи содержат лигатуры — соединения двух и более букв в единый графический элемент, — диакритические знаки (огласовки, харакат), а также «отложенные штрихи»: элементы, дописываемые поверх уже завершённого слова. Ключевыми признаками для нейронных сетей выступают конфигурация лигатур и взаиморасположение диакритических знаков [10]. Открытые датасеты (ARABASE, QU-

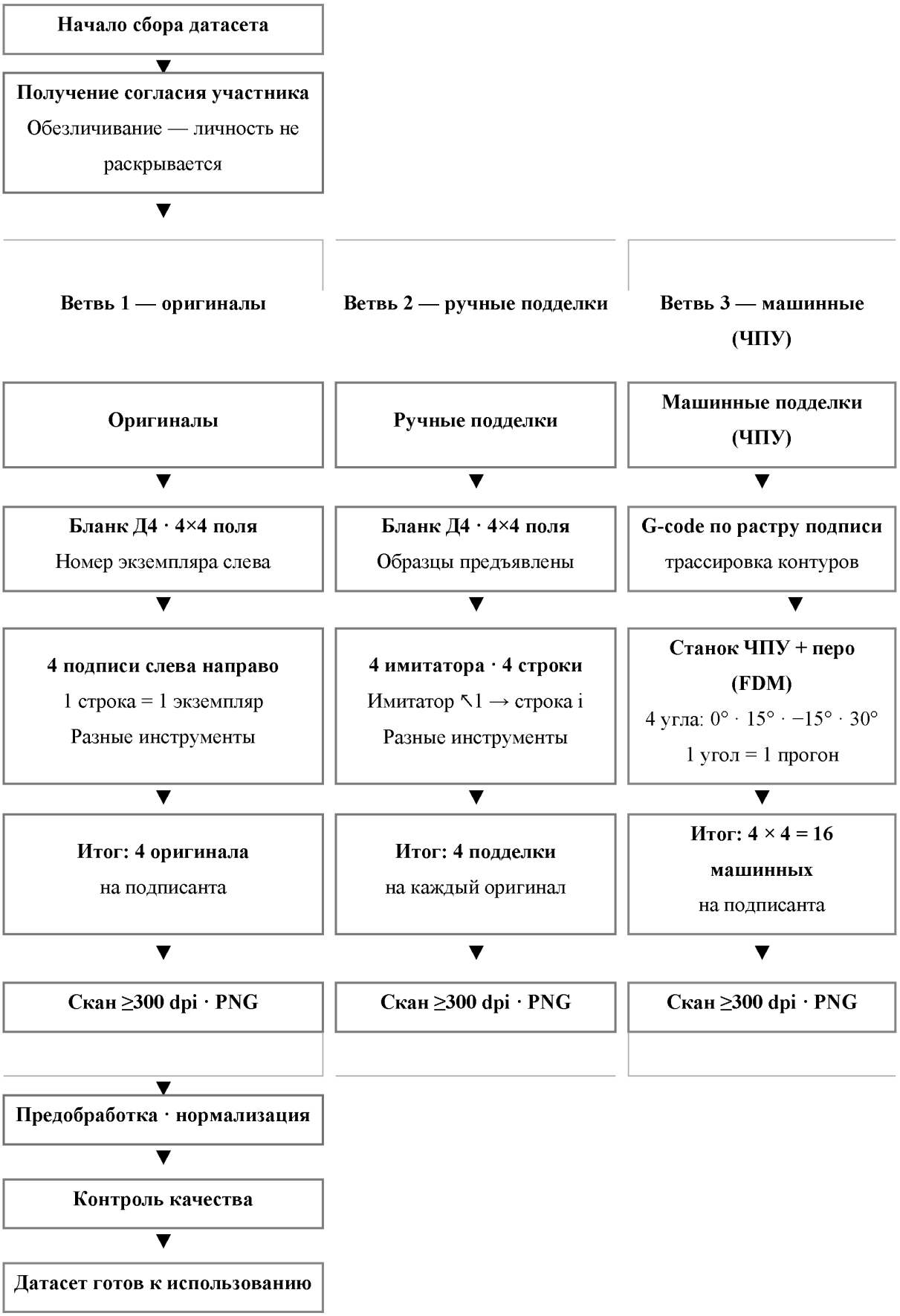


Рис. 2. Методика сбора русскоязычного датасета рукописных подписей

ISDB) остаются немногочисленными, что существенно ограничивает обучение глубоких моделей [10]. Модель, обученная на латинице, не способна интерпретировать арабские лигатуры как осмысленные признаки, что обусловливает высокий уровень доменного сдвига.

Китайские, японские и корейские подписи строятся на иероглифическом письме. Каждый знак несёт самостоятельную смысловую нагрузку и имеет строго определённый порядок написания штрихов (stroke order), который на статическом offline изображении не виден. Именно это обстоятельство делает задачу offline верификации иероглифических подписей особенно сложной: два визуально идентичных иероглифа могут быть написаны разными людьми, но лишь online система способна различить их по порядку штрихов. Ключевыми признаками для нейронных сетей являются пространственные соотношения радикалов (смысловых компонентов иероглифа) и число штрихов. Датасет MSDS (238 китайских авторов, 35 400 образцов) является крупнейшим в данном домене [11].

Слоговые алфавиты — деванагари (хинди) и бенгальское письмо — отличаются горизонтальной связующей линией, называемой матрой, и высокой читаемостью подписи, как правило совпадающей с полным написанием имени подписанта. Датасет BHSig260 включает 260 авторов с подписями на двух языках [4]. Близость подписи к тексту имени означает, что нейронная сеть подвергается риску выучить языковые (скриптовые) особенности вместо индивидуальных биометрических характеристик, что может привести к ложным совпадениям между авторами со схожими именами.

Кириллические подписи, занимающие срединное положение, обладают рядом специфических черт. С одной стороны, они ближе к европейской каллиграфической традиции, чем к иероглифической или курсивной арабской. С другой стороны, кириллический алфавит содержит ряд визуально отличных от латинских букв, создающих специфические топологические структуры в подписи. Модель, обученная исключительно на латинских образцах, интерпретирует эти структуры как «нестандартные» и систематически ошибается в классификации.

Сравнительный алфавитный анализ русского и английского языков. Визуальное сходство букв двух алфавитов оказывает прямое влияние на задачу кросс-лингвистической верификации подписей. Если нейронная сеть обучена на латинских образцах, она может ошибочно интерпретировать визуально схожие кириллические буквы — такие как О/о, М/м или К/к — как их латинские аналоги, активируя нерелевантные признаки. Это является одним из механизмов возникновения доменного сдвига, дополнительным к различию письменных традиций.

В настоящем исследовании анализируются буквы, печатные или письменные начертания которых визуально идентичны в обоих алфавитах. Различаются два типа начертания: печатное — стандартная типографская форма, характерная для документов, бланков и заголовочной части подписи; письменное (каллиграфическое) — рукописная связная форма, используемая непосредственно при написании личных росчерков. Для задачи верификации подписи наибольшую роль играет именно пись-

Таблица 1.

Языковая специфика датасетов рукописных подписей

Параметр сравнения	Европейские / латинские	Арабские	Восточные (CJK)	Индийские (хинди, бенгали)
Ключевые датасеты	GPDS-960, CEDAR, MCYT-75, BiosecureDS2	ARABASE, QU-ISDB, SigComp 2011 Arabic	MSDS (238 авторов), SigComp 2011 Chinese/ Japanese	BHSig260 (бенгали + хинди, 260 авторов)
Характер письма	Абстрактный росчерк с инициалами; подпись ≠ полное имя	Сплошное курсивное; буква меняет форму по позиции в слове	Иероглифы; каждый знак несёт смысловую нагрузку	Слоговое; подпись ≈ полное имя, читаема
Ключевой признак для нейросети	Глобальная топология: траектория, петли, пропорции, нажим	Лигатуры, диакритические знаки (харакат), отложенные штрихи	Порядок и число штрихов, радикалы, пространственные соотношения	Форма матры, угловые характеристики слогов, структура имени
Ключевая трудность верификации	Высокая внутриклассовая вариативность; имитация росчерков	Сложная сегментация; мало открытых датасетов	Порядок штрихов не виден на offline изображении	Модель рискует выучить языковые паттерны вместо почерка
Доменный сдвиг при переносе	Умеренный между латинскими датасетами; высокий на другие скрипты	Высокий: латинская модель не распознаёт лигатуры	Очень высокий: иероглифические признаки принципиально иные	Высокий: скриптозависимые паттерны имён-подписей

менное начертание, однако печатные формы важны при анализе подписей, содержащих буквенную составляющую в виде инициалов или аббревиатур.

На основании анализа выделяются три функциональные группы. Первая — визуально совпадающие в обоих начертаниях: О/о — О/о (полное совпадение формы овала как в печатном, так и в большинстве письменных вариантов); М/м — M/m (совпадение в печатном; схожесть в письменном с характерными двумя «горбами»). Данные пары создают наибольший риск ошибочной кросслингвистической интерпретации. Вторая группа — совпадающие в печатном, расходящиеся в письменном: А/а — A/a, Е/е — E/e, Т/т — T/t, К/к — K/k. В рукописном исполнении эти пары существенно расходятся по способу соединения со смежными буквами и по характеру скорописи, что может служить диагностическим признаком при экспертном исследовании. Третья группа — кажущиеся схожими, но функционально различные: Р/р — R/r (у латинской R есть диагональная «нога», отсутствующая у кириллической Р); Н/н — H/h (внешне схожи в печатном исполнении, однако различаются системой соединений в рукописном); В/в — B/b (в письменном значительно расходятся); X/x — X/x (визуально схожи в печатном, но различны в рукописном из-за разных лигатур).

Сравнительный анализ русских и английских фамилий. Практическое значение алфавитного анализа проявляется при исследовании антропонимов — фамилий, которые могут одновременно присутствовать в документе в кириллическом и латинском написании (например, в загранпаспорте). Расхождение между визуальными характеристиками двух вариантов одной и той же фамилии создаёт специфические задачи для систем верификации и криминалистической экспертизы.

Для классификации фамилий вводятся четыре категории. Графически идентичные: все буквы фамилии совпадают визуально в обоих начертаниях — крайне редкий случай ввиду принципиальных различий алфавитов. Частично схожие: не менее двух букв имеют визуально схожие аналоги в обоих языках; суммарное сходство составляет не менее 50 % буквенного состава. Похожие (транслитерация): фамилии фонетически близки, но графически различны; большинство букв не имеют визуальных аналогов. Полностью различные: фамилия содержит буквы, не имеющие латинских визуальных аналогов (Щ, Ж, Ю, Я, Ё, ъ, ь).

Статистический анализ, проведенный по пятидесяти наиболее распространённым российским фамилиям позволяет сделать следующие выводы относительно их распределения по категориям. Подавляющее большинство — около 56 % — составляют фамилии, которые при транслитерации фонетически близки к оригиналу, однако графически расходятся с ним почти полностью. Около

Таблица 2.

Сравнение печатных и письменных начертаний русских и английских букв

Буква	Печатная (рус.)	Письменная (рус.)	Буква	Печатная (англ.)	Письменная (англ.)
А/а	А, а (прямое)	Аа (связанные)	A/a	A, a	Aa (различаются)
Е/е	Е, е	Ее	E/e	E, e	Ee
О/о	О, о (овал)	Оо (овал, схоже)	O/o	O, o	Oo (овал, схоже)
С/с	С, с (дуга)	Сс (дуга)	C/c	C, c (дуга)	Cc (дуга, схоже)
Т/т	Т, т	Тт (перекладина)	T/t	T, t	Tt (схоже)
Р/р	Р, р (≠R: нет «ноги»)	Рр	R/r	R, r (есть «нога»)	Rr (различаются)
Н/н	Н, н (перемычка по центру)	Нн	H/h	H, h (перемычка по центру)	Hh (схоже)
В/в	В, в (≠B: иная форма)	Вв	B/b	B, b	Bb (различаются)
М/м	М, м	Мм	M/m	M, m	Mm (схоже)
К/к	К, к	Кк	K/k	K, k	Kk (схоже)
Х/х	Х, х (≠X)	Хх	X/x	X, x	Xx (схоже)
У/у	У, у (хвост вниз)	Уу	Y/y	Y, y (хвост вниз)	Yy (схоже)

28 % фамилий содержат не менее двух букв с визуально схожими аналогами и могут быть охарактеризованы как частично схожие. Около 12 % фамилий полностью графически различны в обоих языках ввиду наличия букв без латинских аналогов. Менее 4 % составляют фамилии, которые в отдельных шрифтовых начертаниях могут быть восприняты как визуально близкие к идентичным — и то при условии схожести конкретного шрифта.

Данные результаты имеют прикладное значение для систем верификации в пограничном и нотариальном контексте. При сверке подписи в загранпаспорте (где фамилия дублирована на двух языках) нейронная сеть, не знакомая с кириллическим скриптом, не может использовать буквенный состав фамилии как опорный признак в 96 % случаев. Это вынуждает модель опираться исключительно на топологические и динамические характеристики росчерка, что повышает важность скриптонезависимых архитектур — таких как Vision Transformer с вниманием на уровне патчей, используемый в системе SigViT.

Таблица 3.

Сравнительный анализ фамилий в русском и английском написании

Фамилия (рус. / англ.)	Категория	Печатное сходство	Письменное	Комментарий
Попов / Popov	Частично схожие	П≠P; О=O; В≠V	Схожая (О/o)	О/o совпадают; П и P различаются
Козлов / Kozlov	Частично схожие	К=K; О=O; З≠Z	Схожая (О, К)	К/к и K/k, О/o визуально идентичны в печати
Романов / Romanov	Частично схожие	Р≠R; О=O; М=M	Схожая (О, М)	О/o и М/м совпадают; Р и R различаются
Морозов / Morozov	Частично схожие	М=M; О=O; Р≠R	Схожая (М, О)	М/м и О/o совпадают; Р и R различаются
Нова / Nova	Частично схожие	Н≠N; О=O; В≠V	Схожая (О)	Только О/o совпадает визуально
Коко / Coco	Частично схожие	К≠C; О=O	Схожая (О)	К и С различаются: у К есть диагонали, у С — нет; О/o совпадают
Ким / Kim	Частично схожие	К=K; И≠I; М=M	Схожая (К, М)	К/к и K/k, М/м и M/m совпадают; И и I различаются

Таблица 4.

Распределение топ-50 российских фамилий по категориям графического сходства

Категория	Кол-во (топ-50)	Доля, %	Примеры
Графически идентичные (все буквы совпадают визуально в обоих начертаниях)	~1–2	~2–4 %	Крайне редкие случаи при совпадении шрифта
Частично схожие (≥2 буквы имеют визуально схожие аналоги)	~14	~28 %	Попов/Popov, Морозов/Morozov, Козлов/Kozlov
Похожие по звучанию, графически различные (транслитерация)	~28	~56 %	Иванов/Ivanov, Петров/Petrov, Смирнов/Smirnov
Полностью различные (нет общих визуальных элементов)	~6	~12 %	Щербаков/ Shcherbakov, Журавлёв/Zhuravlev

Алгоритм работы программного обеспечения верификации подписей SigViT. Программный комплекс реализован в виде REST API-сервиса на базе FastAPI и состоит из трёх взаимосвязанных модулей: Model.py (архитектура нейронной сети), inference.py (загрузка модели и инференс) и main.py (HTTP). Конфигурация пользовательского интерфейса вынесена в отдельный файл .config в формате JSON, что обеспечивает возможность локализации и настройки без изменения программного кода.

При запуске сервера функция load_model загружает чекпоинт best_model.pt посредством torch.load с параметром weights_only=True. Из словаря состояний восстанавливается архитектура SigViT (~4.8 млн параметров), при этом автоматически обрабатываются ключи с префиксом _orig_mod., возникающие при компиляции через torch.compile. Из чекпоинта также извлекается пороговый коэффициент threshold, настроенный в процессе обучения. Модель переводится в режим eval() и размещается на доступном вычислительном устройстве (CUDA при наличии, иначе CPU).

Конечная точка POST /compare принимает два файла в формате multipart/form-data. Функция preprocess_image реализует единый конвейер: PIL.Image.open → RGB → resize(224 × 224, LANCZOS) → numpy → тензор [C,H,W] → нормализация $\div 255 \times 2 - 1$ → итоговый тензор [1, 3, 224, 224] в диапазоне [−1, 1].

Метод _encode_branch применяется к обоим тензорам с использованием общих весов (weight sharing). PatchEmbed реализован свёрткой Conv2d (3→192, kernel=16, stride=16), преобразующей изображение в 196 патч-токенов [12]; к ним присоединяется обучаемый CLS-токен. Восемь блоков TransformerBlock последовательно обрабатывают последовательность: каждый содержит LayerNorm → многоголовое самовнимание с двумерным ротационным позиционным кодированием RoPE2D (без обучаемых позиционных параметров) [12] → DropPath → LayerNorm → FFN на базе SwiGLU (произведение двух линейных проекций с SiLU) [12]. Выходная последовательность нормализуется финальным LayerNorm.

Закодированные токены обеих ветвей поочерёдно обмениваются контекстом в двух блоках CrossAttentionBlock: токены оригинала используют токены теста как ключи и значения и наоборот. В последнем блоке включается режим _store_attn=True, при котором сохраняются матрицы весов внимания cross_attn_on_ref и cross_attn_on_probe форматом [B, H, 197, 197]. После кросс-аттенции патч-токены усредняются и проецируются через embed_proj с L2-нормализацией в эмбеддинги emb_ref и emb_probe.

MLP-голова получает четырёхкомпонентный дескриптор размером 768: конкатенацию [emb_ref ‖ emb_probe ‖ |emb_ref − emb_probe| ‖ emb_ref ⊙ emb_probe]. Три линейных слоя (768→192→96→1) с GELU и Dropout(0.4) выдают скалярный логит [13]. sigmoid(logit)

сравнивается с threshold: при превышении возвращается статус «ОРИГИНАЛ», иначе — «ПОДДЕЛКА». Уверенность возвращается как min(⌊prob × 100⌋, 100) %.

Функция _extract_attn_grid усредняет матрицы внимания по головам с исключением CLS-строки и CLS-столбца, формируя карты 14 × 14 для каждого изображения. Карты сериализуются в JSON и передаются клиенту для визуализации зон интереса модели.

Таблица 5.

Ключевые параметры модели SigViT

Компонент	Параметры	Назначение
PatchEmbed	Conv2d(3→192, 16×16); 196 патч-токенов	Разбиение на патчи и проекция в пространство эмбеддингов
RoPE2D	dim=32/head; θ=10000; max_ h=max_w=15	2D позиционное кодирование без обучаемых параметров
TransformerBlock × 8	embed=192, heads=6, SwiGLU(×8/3), drop=0.1, dpr=0–0.05	Контекстные признаки подписи (self-attention)
CrossAttentionBlock × 2	Взаимный обмен контекстом; последний блок хранит карты	Сопоставление пары подписей с захватом карт внимания
MLP-голова	768→192→96→1; GELU; Dropout(0.4)×2	Бинарная классификация по 4-компонентному дескриптору
Threshold	Хранится в чекпоинте; default=0.5	Адаптивный порог отсечения, настроенный при обучении

Заключение

В настоящей статье предпринята попытка комплексного исследования задачи верификации рукописных подписей с объединением криминалистической, лингвистической, технологической и правовой перспектив. Такой подход обусловлен природой самого объекта исследования: рукописная подпись одновременно является биометрическим феноменом, культурным артефактом и юридическим реквизитом, и полноценная защита от её подделки требует понимания всех этих измерений.

Систематизация криминалистических критериев показала, что система идентификационных признаков почерковедческой экспертизы — общих, частных и диагностических — во многом соответствует типам визуальных характеристик, извлекаемых нейронными сетями из изображений подписей. Это соответствие не случайно: оба подхода решают одну и ту же задачу — различение индивидуальной моторной программы подписанта от её имитаций. Данная параллель открывает возможность для более тесной интеграции криминалистической методологии в проектирование алгоритмических систем, что до сих пор остаётся недостаточно исследованным направлением.

Анализ языковой специфики датасетов подтвердил, что письменная система определяет не только визуальный облик подписей, но и сам набор информативных признаков, доступных для автоматической верификации [8]. Для европейских систем это глобальная топология и динамические параметры; для арабских — конфигурация лигатур и отложенных штрихов; для иероглифических — порядок и взаиморасположение штрихов; для слоговых индийских — структура матры. Следствием является высокий доменный сдвиг при переносе моделей между письменными системами, и кириллический домен в этом отношении не является исключением.

Сравнительный алфавитный анализ установил, что около 28 % наиболее распространённых российских фамилий содержат буквы с визуально схожими латинскими аналогами в печатном начертании. В письменном (рукописном) начертании данный показатель существенно ниже ввиду расхождения скорописных форм. Это означает, что кросс-языковая верификация подписей — актуальная задача для систем пограничного и нотариального контроля — сталкивается с ограниченной поддержкой буквенного состава как опорного признака.

Дальнейшие направления исследования включают: завершение формирования русскоязычного датасета и верификацию его качества; дообучение системы SigViT на кириллических данных для ручных и машинных подделок; разработку детектора, специализированного на выявлении механических (ЧПУ) подделок.

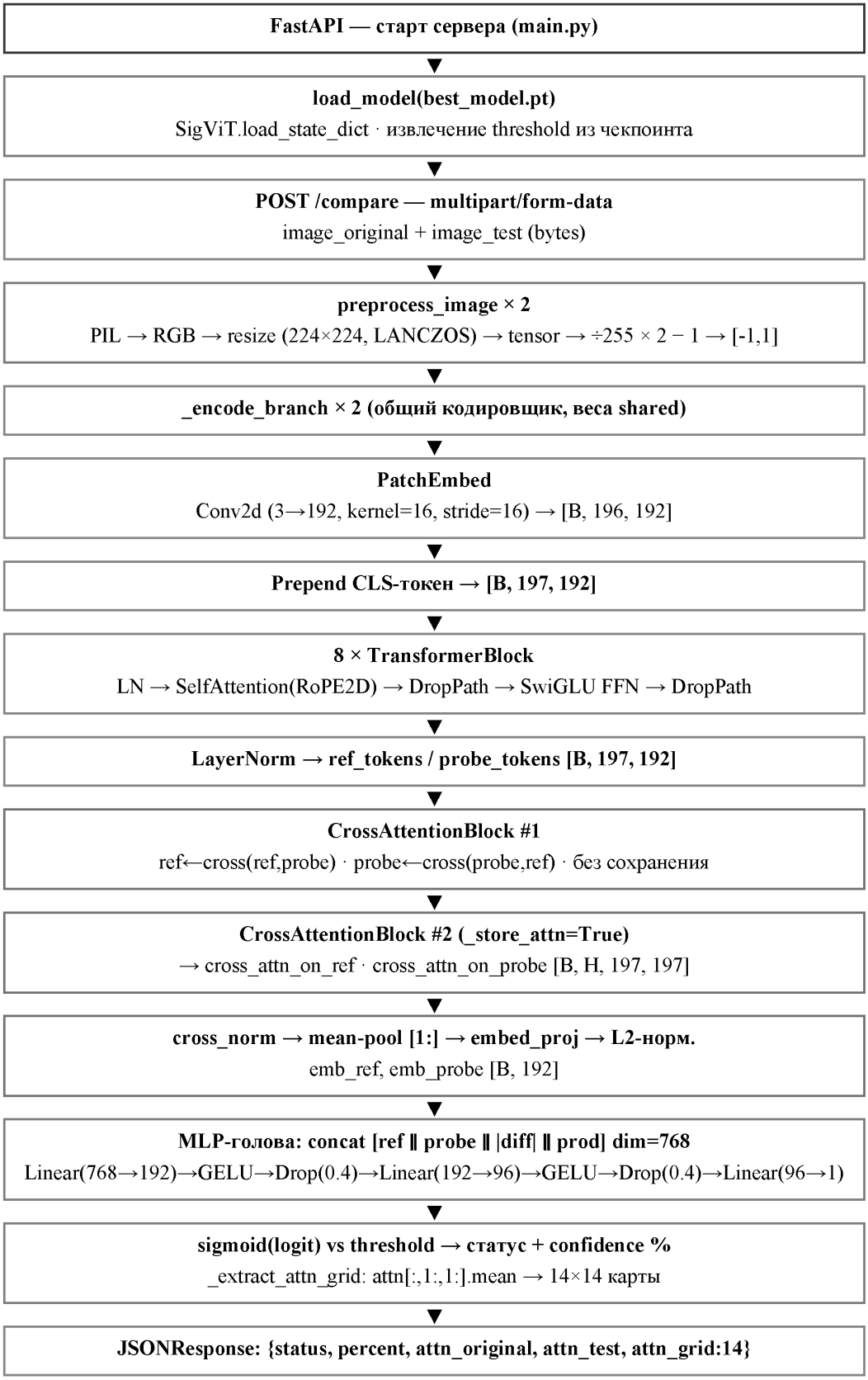


Рис. 4. Блок-схема алгоритма верификации подписей SigViT

ЛИТЕРАТУРА

1. Уголовный кодекс Российской Федерации от 13.06.1996 № 63-ФЗ. Статья 327: Подделка, изготовление или оборот поддельных документов; статья 159: Мошенничество. — М.: КонсультантПлюс, 2024.
2. Tolosana R., Vera-Rodriguez R., Fierrez J., Ortega-Garcia J. Writer-Independent Signature Verification: Evaluation of Robotic and Generative Adversarial Attacks // Information Fusion. — 2023. — Vol. 91. — P. 547–558.
3. Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A. et al. An Image is Worth 16×16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale // Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR). — 2021.
4. Hafemann L.G., Sabourin R., Oliveira L.S. Offline Handwritten Signature Verification — Literature Review // Proceedings of the 7th International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications (IPTA). — IEEE, 2017. — P. 1–8.
5. Рубцова И.И., Волкова С.В. Общая методика почерковедческого исследования подписи. — М.: ЭКЦ МВД России, 2019.
6. Брысина Т.Н. Однословные односоставные предложения в художественном тексте Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Русская филология. 2015. № 4. С. 8–13.
7. Сысоева Л.А. Методические рекомендации по исследованию подписей. — СПб.: ЭКЦ ГУВД, 2018.
8. Diaz M., Ferrer M.A., Impedovo D. et al. A Perspective Analysis of Handwritten Signature Technology // ACM Computing Surveys. — 2019. — Vol. 51, No. 6.
9. Impedovo D., Pirlo G. Automatic Signature Verification: The State of the Art // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part C: Applications and Reviews. — 2008. — Vol. 38, No. 5. — P. 609–635.
10. One-Class Arabic Signature Verification: A Progressive Fusion of Optimal Features // Computers, Materials and Continua. — 2023. — Vol. 75, No. 1.
11. MSDS: A Large-Scale Chinese Signature and Token Digit String Dataset // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2022.
12. Методика оценки угроз безопасности информации. Утв. ФСТЭК России 05.02.2021. — М.: ФСТЭК России, 2021.
13. Lin T.Y., Goyal P., Girshick R., He K., Dollár P. Focal Loss for Dense Object Detection // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). — 2017.

© Овечкина София Аркадьевна (brysin@rambler.ru); Хреняков Степан Владимирович (brysin@rambler.ru);
Брысин Андрей Николаевич (brysin@rambler.ru); Ладынин Андрей Иванович (Andrey.ladynin@hotmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.31

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГЕНЕРАТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ СИНТЕЗА 10-СЕКУНДНЫХ 12-КАНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММ: GAN-АРХИТЕКТУРЫ И ДИФФУЗИОННЫЕ МОДЕЛИ

COMPARATIVE ANALYSIS OF GENERATIVE DEEP LEARNING MODELS FOR THE SYNTHESIS OF 10-SECOND 12-CHANNEL ELECTROCARDIOGRAMS: GAN ARCHITECTURES AND DIFFUSION MODELS

Soanhu Javier Wilfried

Summary. The paper presents a comparative analysis of four generative deep learning models for the synthesis of 10-second 12-channel electrocardiograms (ECG): two GAN models (WaveGAN*, Pulse2Pulse) and two diffusion models (SSSD-ECG, DSAT-ECG). The experiments were conducted on the PTB-XL dataset under uniform controlled conditions using a multi-level evaluation metric system. Based on the results of the study, a hierarchy of model quality has been established: DSAT-ECG ≥ SSSD-ECG ≫ Pulse2Pulse ≈ WaveGAN*. It was concluded that diffusion models outperform GAN architectures by 60 times in KID_ECG and by 5–6 percentage points in TSTR AUROC. DSAT-ECG achieves the best TSTR AUROC = 94.56 % with the fewest parameters (28.8 million). The fundamental problem of GAN models is the collapse of modes, which limits the variety of synthetic samples and reduces their applicability for augmentation of rare classes. The developed system includes traditional metrics (MMD), as well as new spectral metrics (PSD-MMD, PSD-PRD) and feature space metrics based on the pre-trained ECG-ViT model (FID_ECG, KID_ECG). The developed system overcomes the limitations of existing assessment systems and can be used as a reproducible protocol for comparing new generative ECG architectures.

Keywords: electrocardiography, PTB-XL, generative models, diffusion models, DSAT-ECG, SSSD-ECG, WaveGAN*, Pulse2Pulse, FID, KID.

Соанху Хавьэ Вилфриэд
Аспирант, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
odiwilfried@gmail.com

Аннотация. В работе представлен сравнительный анализ четырёх генеративных моделей глубокого обучения для синтеза 10-секундных 12-канальных электрокардиограмм (ЭКГ): двух GAN-моделей (WaveGAN*, Pulse2Pulse) и двух диффузионных моделей (SSSD-ECG, DSAT-ECG). Эксперименты проводились на наборе данных PTB-XL в единых контролируемых условиях с применением многоуровневой системы метрик оценки. По результатам проведенного исследования установлена иерархия качества моделей: DSAT-ECG ≥ SSSD-ECG ≫ Pulse2Pulse ≈ WaveGAN*. Получен вывод, что диффузионные модели превосходят GAN-архитектуры по KID_ECG в 60 раз и по TSTR AUROC на 5–6 процентных пунктов. DSAT-ECG достигает наилучшего показателя TSTR AUROC = 94,56 % при наименьшем числе параметров (28,8 млн). Выявлена принципиальная проблема GAN-моделей — коллапс мод, ограничивающий разнообразие синтетических образцов и снижающий их применимость для аугментации редких классов. Разработанная система включает традиционные метрики (MMD), а также новые спектральные метрики (PSD-MMD, PSD-PRD) и метрики признакового пространства на основе предобученной модели ECG-ViT (FID_ECG, KID_ECG). Разработанная система преодолевает ограничения существующих систем оценки и может применяться как воспроизводимый протокол для сравнения новых генеративных архитектур ЭКГ.

Ключевые слова: электрокардиография, PTB-XL, генеративные модели, диффузионные модели, DSAT-ECG, SSSD-ECG, WaveGAN*, Pulse2Pulse, FID, KID.

В современных условиях применение методов глубокого обучения для автоматического анализа электрокардиограмм (ЭКГ) сталкивается с ограничением, которое выражается в дефиците размеченных клинических данных. Особенно актуально это для редких диагностических классов, наличие которых критически важно для обучения чувствительных диагностических алгоритмов. Генеративные модели глубокого обучения предлагают решение этой проблемы через синтез физиологически достоверных ЭКГ-сигналов в неограниченном количестве и без нарушения конфиденциальности пациентов.

В последние годы для синтеза ЭКГ предложен ряд систем, относящихся в основном к двум классам: генеративно-состязательным сетям (GAN) и диффузионным моделям. GAN-модели могут сгенерировать результат за один проход, но они останавливаются на ограниченном наборе образцов, не принимая во внимание другие варианты, особенно в малочисленных классах. Диффу-

зионные модели, напротив, постепенно очищают изображение от шума, проходя множество шагов, что дает более высокое качество.

Целью работы является сравнение четырёх современных генеративных моделей для синтеза 10-секундных 12-канальных ЭКГ: WaveGAN* и Pulse2Pulse (P2P) — GAN-архитектуры; SSSD-ECG и DSAT-ECG — диффузионные модели. При отборе генеративных моделей нами применены три строгих критерия: способность генерировать 10-секундные записи с 1000 временными точками при частоте 100 Гц; формирование полноценных 12-канальных сигналов для корректного представления клинических данных; реализация условной генерации, соответствующей заданным диагностическим классам набора PTB-XL (NORM, MI, STTC, CD, HYP). Четыре выбранные модели, удовлетворяющие данным критериям, представляют два различных подхода. Они реализованы максимально близко к исходным публикациям для обеспечения воспроизводимости архитектуры и гиперпараметров.

Модель WaveGAN* была разработана V. Thambawita, J.L. Isaksen, S.A. Hicks [9] с помощью адаптации WaveGAN [3] — архитектуры, изначально предназначенной для синтеза аудиосигналов. J.M.L. Alcaraz, N. Strodthoff [1] впоследствии расширили модель механизмом условной генерации. Модель WaveGAN* построена на Wasserstein GAN и состоит из двух частей: генератора и критика. Генератор получает на вход равномерно распределённый шумовой вектор размером 1000 с 8 каналами (значения от –1 до 1), а также условный вектор, указывающий, к какому классу принадлежит генерируемый сигнал. Шум обрабатывается через пять последовательных блоков, каждый из которых выполняет: повышение дискретизации (увеличение длины сигнала), заполнение нулями, одномерную свёртку, условную пакетную нормализацию и активацию ReLU. В последнем блоке ReLU заменяется на tanh — это сжимает выходные значения в диапазон от –1 до 1, чтобы сигнал имел реалистичную амплитуду.

Условная пакетная нормализация [2] подстраивает параметры масштабирования и сдвига отдельно для каждого класса, позволяя генератору «понимать», какой именно сигнал от него требуется — например, нормальный ритм или аритмию. Критик содержит шесть свёрточных слоёв с активацией Leaky ReLU и фазовым перемешиванием (phase shuffle) во всех слоях кроме последнего, который имеет линейный выход. Критик не использует условную информацию и фокусируется на различении реальных и синтетических сигналов. Функция потерь WGAN-GP для критика:

$$L=\frac{1}{B}\sum_{n=1}^{B}\left(\begin{array}{l} C\left(G\left(z_n,c_n\right)\right)- \\ -\ C\left(x_n\right)+\lambda.\left[\left(\left\|\nabla_{\hat{x}_n}C\left(\hat{x}_n\right)\right\|_2-1\right)^2\right] \end{array}\right) \quad (1)$$

где B — размер пакета, x_n — реальный образец, z_n — шумовой вектор, $\hat{x}_n$ — интерполированный образец, c_n — условный вектор, λ = 10 — коэффициент градиентного штрафа. Генератор обучается минимизировать $-\frac{1}{B}\sum_{n=1}^{B}(C\left(G\left(z_n,c_n\right)\right)$. Параметры критика обновляются на каждой итерации, генератора, каждые пять итераций при замороженном критике. Модель обучается 3000 эпох с размером пакета 32 и скоростью обучения 1×10^{-4}.

Другая модель — Pulse2Pulse, — предложенная теми же авторами [9], является усовершенствованной версией WaveGAN* с принципиально иным генератором, построенным по архитектуре U-Net [7]. Генератор принимает 8-канальный шумовой вектор из U (–1, 1) длиной 1000 и многометочный условный вектор. Кодировщик состоит из пяти свёрточных блоков (Conv1D + BatchNorm + Leaky ReLU), каждый из которых уменьшает разрешение в два раза. Декодер симметричен и включает пять этапов деконволюции с условной пакетной нормализацией. Отличительный элемент данной модели — пропускающие связи, которые соединяют соответствующие блоки кодировщика и декодировщика одинакового разрешения. Пропускающие связи сохраняют высокочастотные детали морфологии ЭКГ (быстрые фронты зубцов Q и R, узкие зубцы S), которые могут быть утрачены при сжатии. Критик идентичен критику WaveGAN*; функция потерь и протокол обучения аналогичны (формула (1).

Модель SSSD-ECG (Structured State Space Diffusion), предложенная J.M.L. Alcaraz, N. Strodthoff [1], основана на диффузионных вероятностных моделях (DDPM) [5]. В качестве базы использован DiffWave [6], но вместо свёрток с расширением (дилатированных) в ней применены слои S4, которые лучше улавливают долгосрочные зависимости в сигнале. Прямой процесс диффузии добавляет гауссовский шум к исходной ЭКГ за 200 шагов, следуя марковской цепи. Благодаря этому зашумлённый сигнал на любом шаге t можно вычислить напрямую, без последовательного прохода по всем промежуточным шагам по формуле (2):

$$q\left(x_t \mid x_{t-1}\right)=\mathcal{N}\left(x_t;\sqrt{1-\beta_t}\,x_{t-1},\beta_t I\right) \quad (2)$$

Модель SSSD-ECG включает 36 остаточных слоёв с 256 каналами в каждом и 256 каналами пропускания. Каждый слой обрабатывает три входа. Это сигнал с предыдущего слоя, проекция класса (размерность 128) и вложение шага диффузии (размерность 512). Центром каждого слоя являются два последовательных блока S4. Далее была обучена сеть ε_θ для получения компонента шума, добавленного на шаге *t*. Функция потерь была выражена формулой (3):

$$L=\frac{1}{B}\sum_{n=1}^{B}\left(\varepsilon_n-\varepsilon_\theta\left(\sqrt{\bar{\alpha}_{t_n}}x_{0,n}+\sqrt{1-\bar{\alpha}_{t_n}}\,\varepsilon_n,c_n,t_n\right)\right)^2 \quad (3)$$

На этапе вывода модель восстанавливает сигнал из шума за 200 шагов обратного диффузионного процесса. Обучение длится 1000 эпох (приблизительно 1,09 млн итераций) с пакетом 16, оптимизатором Adam и скоростью 2×10^{-4}.

Еще одна рассмотренная нами модель — DSAT-ECG (Diffusion State Space Augmented Transformer), предложенная M. Zama и F. Schwenker [10]. Она отличается от предшественницы SSSD-ECG заменой слоёв S4 на гибридные слои SPADE (State Space Augmented Transformer) как совокупности блока S4 и четырёх блоков с локальным скользящим вниманием в каждой. При этом глобальный контекст (периодичность ритма, базовая линия, длительные тренды) эффективно улавливается блоком S4, а локальный контекст (морфология отдельных комплексов, соотношения между зубцами) обрабатывается механизмом внимания. С целью снижения сложности с $O(L^2)$ до $O(L\cdot w)$ нами использовано локальное скользящее внимание с окном w. В модели DSAT-ECG число остаточных слоёв сокращено с 36 до 4, благодаря большей выразительности слоёв SPADE, так как один такой слой моделирует более сложные зависимости по сравнению с одним S4-блоком. В результате модель имеет наименьшее число параметров среди всех четырёх сравниваемых моделей — 28,8 млн против 50,2–53,5 млн. Это говорит о наивысшей параметрической эффективности. Функция потерь и гиперпараметры обучения остались теми же, что и у модели SSSD-ECG.

В таблице 1 представим сравнительную характеристику генеративных моделей для синтеза ЭКГ.

Существующие метрики характеризуются двумя принципиальными ограничениями: чувствительностью к фазовым сдвигам при сравнении мультицикловых ЭКГ и отсутствием оценки физиологических межотведенческих взаимосвязей. Нами разработана многоуровневая система метрик, объединяющая традиционные подходы с новыми методами. Все метрики вычисляются пакетами по 256 образцов для обеспечения статистической надёжности оценок, особенно для метрик, чувствительных к размеру выборки (FID_{ECG}, KID_{ECG}). Итоговое значение метрики определяется как среднее по всем пакетам. Традиционные метрики Maximum Mean Discrepancy (MMD) с ядром RBF [4] измеряют расстояние между двумя вероятностными распределениями в воспроизводящем гильбертовом пространстве. Несмещённая оценка MMD^2 была рассчитана по формуле (3):

$$\widehat{MMD_u^2} = \frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}K(x_i,x_j) - \frac{2}{mn}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}K(x_i,y_j) + \\ + \frac{1}{m(m-1)}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}K(y_i,y_j) \quad (3)$$

Таблица 1.
Сравнительная характеристика генеративных моделей для синтеза ЭКГ

Характеристика	WaveGAN*	P2P	SSSD-ECG	DSAT-ECG
Тип архитектуры	GAN (WGAN-GP)	GAN (WGAN-GP)	Диффузионная	Диффузионная
Структура генератора	5 деконв.	U-Net	36 слоёв S4	4 слоя SPADE
Условное встраивание	Усл. BatchNorm	Усл. BatchNorm	Лин. проекция	Лин. проекция
Параметры (млн)	50,3	53,5	50,2	28,8
Эпохи обучения	3000	3000	1000	1000
Размер пакета	32	32	16	16
Скорость обучения	1×10^{-4}	1×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}
Функция потерь	WGAN-GP	WGAN-GP	MSE	MSE
Шагов вывода	1	1	200	200

где $K(x,y) = exp\left(-\frac{x_i - y_j^{\,2}}{2\sigma^2}\right)$, параметр σ определяется методом медианной эвристики. Нулевое значение MMD теоретически указывает на идентичность распределений.

Метрики на основе классификаторов реализуют протоколы TSTR (Train on Synthetic, Test on Real) и TRTS (Train on Real, Test on Synthetic) с использованием классификатора xresnet1d101 [8]. TSTR проверяет, сохраняется ли диагностически значимая информация в синтетических образцах. TRTS оценивает правдоподобие синтетических данных. Базовый протокол TRTR (Train on Real, Test on Real) задаёт верхнюю границу качества.

Для устранения чувствительности к фазовым сдвигам нами разработаны три метрики на основе нормализованной спектральной плотности мощности (PSD). Спектральная плотность мощности (PSD) была рассчитана для каждого из 12 каналов с помощью метода Уэлча. Для этого нами использовано окно Хэмминга длиной 512 точек, перекрытие между окнами составляет 256 точек, а быстрое преобразование Фурье (FFT) выполнено на 512 точках. Полученный спектр был нормализован по суммарной мощности $P[f] = S[f] / \sum_f S\{f\}$, каждая частотная компонента поделена на общую сумму всех компонент. Благодаря этому мы сделали спектр инвариантным к временным сдвигам, то есть сдвиг сигнала во времени не меняет форму спектра. На основе этих нормализованных PSD-векторов нами были рассчитаны два показателя:

— PSD-MMD — метрика, основанная на максимальном среднем расхождении (MMD), которая оценивает сходство распределений спектральных плотностей без привязки к временной синхронизации сигналов;
— PSD-PRD — количественная мера процентного различия между спектрами двух сигналов, вычисляемая как корневая среднеквадратичная ошибка, нормированная на сумму спектральных компонент и выраженная в процентах:

$$PSD - PRD = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{K}\sum_{f=1}^{F}\left(P_{i,k}[f]-P_{j,k}[f]\right)^2}{\sum_{k=1}^{K}\sum_{f=1}^{F}\left(\frac{P_{i,k}[f]^2+P_{j,k}[f]^2}{2}\right)}}.100\% \quad (4)$$

Для выделения морфологических признаков мы использовали ECG-ViT — трансформер, обученный на базах CinC2020, Zheng и Ribeiro. Далее определили FID_{ECG} — расстояние Фреше между гауссовскими аппроксимациями распределений вложений реальных r и синтетических s данных:

$$FID_{ECG} = \mu_r - \mu_s^2 + Tr\left(\Sigma_r + \Sigma_s - 2\left(\Sigma_r\Sigma_s\right)^{1/2}\right) \quad (5)$$

Затем рассчитали показатель KID_ECG, который представляет собой оценку MMD^2 в том же признаковом пространстве. Он не требует предположения о гауссовском распределении признаков, а значит, более надёжный при нестандартных распределениях.

Чтобы оценить, насколько точно модель воспроизводит физиологическую структуру многоканальной ЭКГ, мы использовали нормализованную взаимную информацию (NMI). Для каждой из 66 пар отведений этот показатель вычислялся гистограммным методом с 32 интервалами. Затем мы построили матрицы NMI размером 12×12 для реальных и синтетических сигналов. Сравнение этих матриц дало прямую количественную оценку того, насколько хорошо сохранены зависимости.

На основе проведенного анализа кривых потерь нами была оценена сходимость и стабильность обучения. GAN-модели за 3000 эпох показали характерную для WGAN-GP тенденцию, в частности потери критика отразили обратное расстояние Вассерштейна. Модель WaveGAN*, начав с −18,325, достигла минимума на уровне −19,284 на 76-й эпохе и закончила на уровне −13,857. Другая модель P2P начала с −12,852, достигла минимума на значении −16,778 на 42-й эпохе, закончив на уровне −8,814 (таблица 2).

Нами была выявлена чёткая иерархия моделей, подтверждающая тезис о том, что диффузионные модели значительно превосходят GAN по всем показателям. Модель P2P хорошо воспроизводит статистику сигналов во временной и частотной областях, но ошибается в пространстве диагностических признаков. Это причина коллапса мод.

Таблица 2.
Метрики качества генеративных моделей

Модель	MMD	PSD-MMD	PSD-PRD, %	FID_{ECG}	KID_{ECG}
Реальные (база)	0,0001	0,0013	116,03	31,46	0,0003
WaveGAN*	0,0055	0,0681	111,66	31,46	0,3025
Pulse2Pulse	0,0034	0,0671	114,23	325,56	0,3203
SSSD-ECG	0,0026	0,0023*	113,82	32,38*	0,0020*
DSAT-ECG	0,0012*	0,0040	114,53*	40,32	0,0050

Примечание: * — лучшее значение среди генеративных моделей, α <0,05, критерий Уилкоксона

Далее были рассчитаны результаты по протоколу TSTR — метрике клинической применимости синтетических данных (табл. 3).

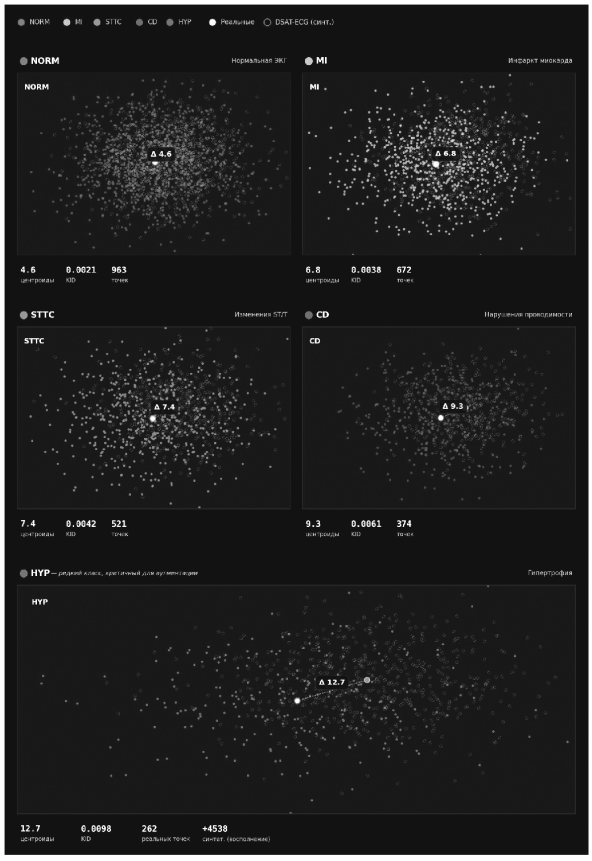
Таблица 3.
Оценка подлинности синтетических ЭКГ (TSTR)

Модель / протокол	Accuracy, %	AUROC, %
TRTR — реальные данные	96,38	94,67
TSTR — DSAT-ECG	95,84	94,56
TSTR — SSSD-ECG	95,01	93,98
TSTR — Pulse2Pulse	89,67	89,58
TSTR — WaveGAN*	89,32	88,34

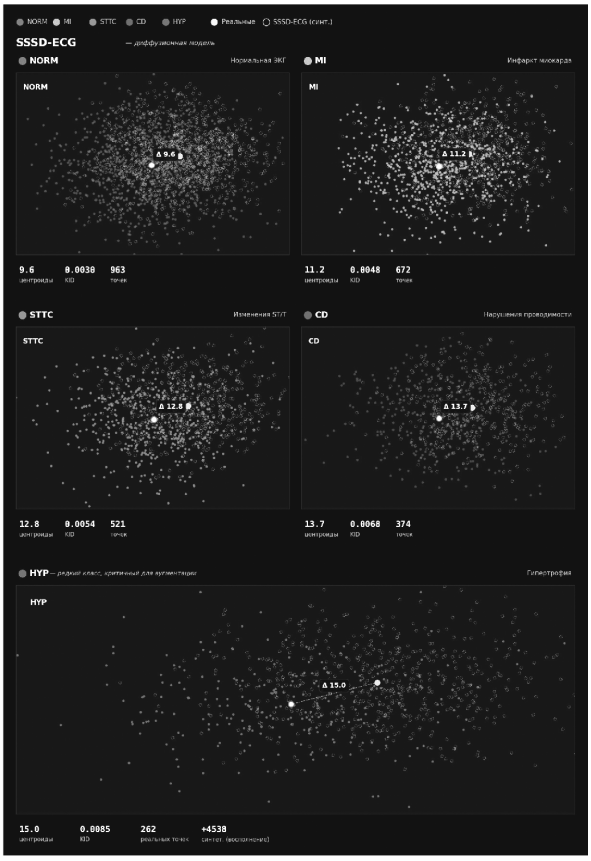
Проведенная нами t-SNE визуализация показала, как синтетические ЭКГ соотносятся с реальными. На рисунке 1 видно, что диффузионные модели создают точки, хорошо перекрывающиеся с реальными кластерами. У модели DSAT-ECG расстояния между центрами синтетических и реальных классов составляют 4,6–12,7 единиц, а у модели SSSD-ECG — 9,6–15,0.

Тогда как у GAN-моделей точки образуют компактные изолированные кластеры, значительно удалённые от реальных, на 82,8–142,4 единиц у модели WaveGAN* и на 74,7–91,5 — у модели P2P, что можно увидеть на рисунке 2.

GAN-модели, как видно на рисунке, показывают коллапс мод, так как порождают усреднённые прототипы классов и не сохраняют их естественной вариативности. Поэтому они менее ценны для аугментации редких классов. Такие образцы дают лишь усреднённый «типичный» вариант патологии, но не содержат той вариабельности, которая необходима классификатору для надёжной ра-

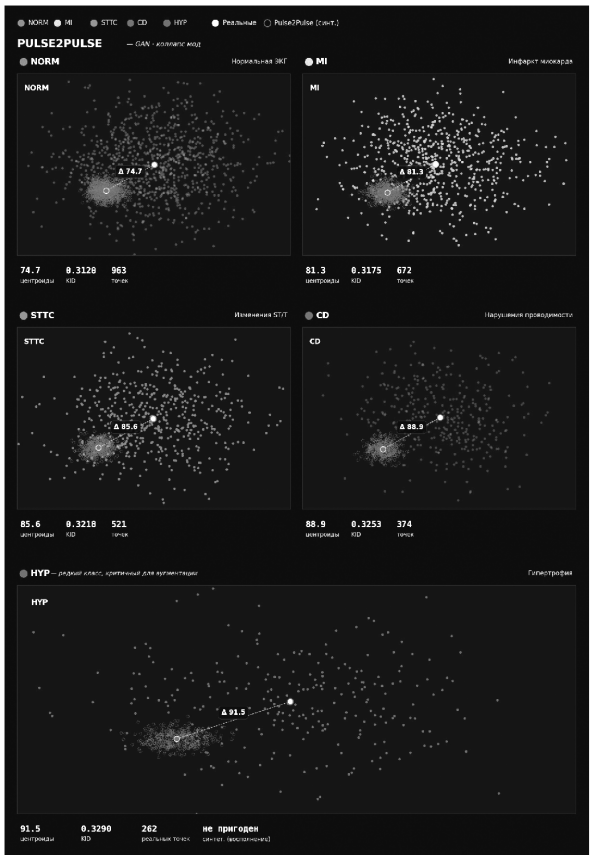


а)

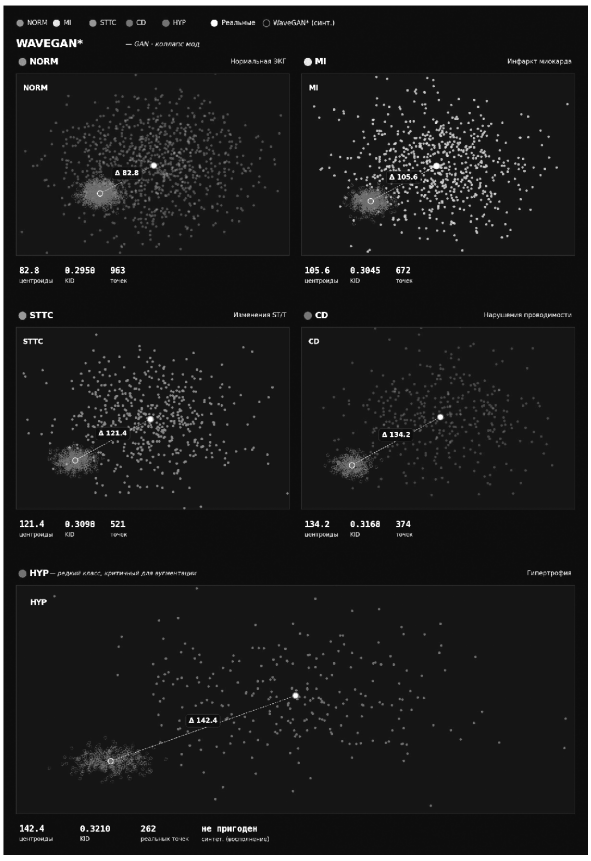


б)

Рис. 1. t-SNE визуализация вложений ECG-ViT для а) DSAT-ECG; б) SSSD-ECG (диффузионные модели)



а)



б)

Рис. 2. t-SNE визуализация вложений ECG-ViT для а) Pulse2Pulse (GAN); б) WaveGAN* (GAN)

боты с реальными данными. В отличие от них, синтетические точки хорошо перекрываются с реальными кластерами.

Мы пришли к выводу, что диффузионные модели превосходят GAN-модели по всем метрикам качества сигнала и распределения. Разрыв особенно значителен по KID_ECG (более чем в 60 раз) и по показателям TSTR (5–6 п. п.). Также отметим, что DSAT-ECG показывает наилучший баланс между качеством генерации, разнообразием образцов и числом параметров. Меньшее число параметров (28,8 млн против ~50 млн у остальных) в сочетании с высокими метриками подтверждает эффективность гибридной архитектуры SPADE. Проведенная t-SNE визуализация и KID_ECG выявили критическую проблему GAN-моделей — коллапс мод.

Разработанная многоуровневая система метрик, объединяющая MMD, PSD-метрики и FID/KID на основе ECG-ViT, обеспечивает комплексную оценку, устойчивую к фазовым сдвигам, и не зависит от изменения амплитуды сигнала. Совместное применение нескольких взаимодополняющих метрик позволяет выявлять различные аспекты качества синтетических данных, не обнаруживаемые одной метрикой. В частности, FID_ECG с признаками ECG-ViT выявил коллапс мод Pulse2Pulse, незамеченный традиционными временными метриками.

Таким образом, в статье представлен сравнительный анализ четырёх генеративных моделей для синтеза 10-секундных 12-канальных электрокардиограмм. Все модели реализованы в единых контролируемых условиях с применением многоуровневой системы метрик оценки. Установлена иерархия качества: DSAT-ECG ≥ SSSD-ECG ≫ Pulse2Pulse ≈ WaveGAN*. Получен вывод, что диффузионные модели превосходят GAN-архитектуры по KID_ECG в 60 раз и по TSTR AUROC на 5–6 процентных пунктов. DSAT-ECG достигает наилучшего показателя TSTR AUROC = 94,56 % при наименьшем числе параметров (28,8 млн). Выявлена принципиальная проблема GAN-моделей — коллапс мод, ограничивающий разнообразие синтетических образцов и снижающий их применимость для аугментации редких классов. Разработанная многоуровневая система метрик, объединяющая традиционные подходы со спектральными методами и метриками признакового пространства, преодолевает ограничения существующих систем оценки и может применяться как воспроизводимый протокол для сравнения новых генеративных архитектур ЭКГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alcaraz J.M.L., Strodthoff N. Diffusion-based conditional ECG generation with structured state space models // Computers in Biology and Medicine. — 2023. — Vol. 163. — pp. 107115.
2. De Vries H., Strub F., Mary J., Larochelle H., Pietquin O., Courville A. et al. Modulating early visual processing by language // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). — 2017. — Vol. 30. — pp. 6594–6604.
3. Donahue C., McAuley J., Puckette M. Adversarial audio synthesis // International Conference on Learning Representations (ICLR). — URL: https://openreview.net/pdf?id=ByMVTsR5KQ (date of application: 16.04.2026).
4. Gretton A., Borgwardt K.M., Rasch M.J. et al. A kernel two-sample test // Journal of Machine Learning Research. — 2012. — Vol. 13. — pp. 723–773.
5. Ho J., Jain A., Abbeel P. Denoising Diffusion Probabilistic Models // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). — 2020. — Vol. 33. — pp. 6840–6851.
6. Kong Z., Ping W., Huang J. et al. DiffWave: A versatile diffusion model for audio synthesis // International Conference on Learning Representations (ICLR). — 2021. — pp. 1–15.
7. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI). — 2015. — pp. 234–241.
8. Strodthoff N., Wagner P., Schaeffter T., Samek W. Deep learning for ECG analysis: benchmarks and insights from PTB-XL // IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics. — 2021. — Vol. 25, № 5. — pp. 1519–1528.
9. Thambawita V., Isaksen J.L., Hicks S.A. et al. DeepFake electrocardiograms using generative adversarial networks // Scientific Reports. — 2021. — Vol. 11. — pp. 21896.
10. Zama M., Schwenker F. ECG synthesis via diffusion-based state space augmented transformer // Sensors. — 2023. — Vol. 23, № 19. — pp. 8328.

© Соанху Хавьэ Вилфриэд (odiwilfried@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.35

СТАТИКО-ЛЕКСИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ФУНКЦИОНАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО КОДА БИБЛИОТЕКИ-РАСШИРЕНИЯ PIANOSYN.LSP (PIANO SYNTHESIZER) ПАКЕТА NYQUISTIDE С ВАРИАТИВНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИЕЙ СИНТАКСИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ВЫРАЖЕНИЙ И ОПЕРАТОРОВ В РЕДАКТОРЕ AUDACITY® ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ СХЕМ ИНЖЕНЕРНОГО РЕДАКТИРОВАНИЯ АУДИОМАТЕРИАЛОВ (ЧАСТЬ II)

STATIC-LEXICAL ANALYSIS AND FUNCTIONAL-TECHNICAL CAPABILITIES OF THE SOURCE CODE OF THE EXTENSION LIBRARY PIANOSYN. LSP (PIANO SYNTHESIZER) FOR THE NYQUISTIDE PACKAGE WITH VARIABLE INTERPRETATION OF SYNTACTIC ELEMENTS, EXPRESSIONS, AND OPERATORS IN THE AUDACITY® EDITOR DURING THE IMPLEMENTATION OF COMPLEX ENGINEERING SCHEMES FOR AUDIO MATERIAL EDITING (PART II)

V. Taran

Summary. This article presents a comprehensive analysis of the potential of the extension library pianosyn.lsp for the Nyquist programming language, including the identification of inter-code functional relationships based on static-lexical analysis. It reviews methods of digital piano sound modeling employing harmonic frequency synthesis, amplitude envelopes, and MIDI data processing for the automatic generation of audio-synthetic textures. The study covers practical aspects of developing complex audio data editing schemes utilizing the capabilities of the pianosyn.lsp extension library. The article is published in two parts under the same title. The first part provides a structural analysis of the program's prologue, supplemented by comments on the use of key library functions within the NyquistIDE environment and the Nyquist command-line interface integrated into the Audacity® audio editor. The second part complements the preliminary investigation and focuses on technical procedures of computer-based audio synthesis that models piano sound with high accuracy by employing pre-recorded sound samples to form spectral and psychoacoustic characteristics. This section presents functions responsible for processing harmonic information, amplitude envelopes, temporal parameters, as well as for generating

Таран Василий Васильевич
кандидат культурологии, заведующий,
Лаборатория компьютерного дизайна и прикладной информатики «SPLASH»
allscience@lenta.ru

Аннотация. В данной статье представлен комплексный анализ потенциала библиотеки-расширения pianosyn.lsp для языка программирования Nyquist, включающий выявление межкодовых функциональных взаимосвязей на основе статико-лексического анализа. Рассмотрены методы цифрового моделирования звука фортепиано с применением синтеза гармонических частот, амплитудных огибающих и обработки MIDI-*записей* для автоматической генерации аудиально-синтетических фактур. Исследование охватывает практические аспекты разработки сложных схем инженерного редактирования аудиоданных с использованием возможностей библиотеки-*расширения* pianosyn.lsp. Статья публикуется в двух частях с одноимённым названием. В первой части проведён структурный разбор пролога программы, дополненный комментариями по использованию ключевых функций библиотеки в среде NyquistIDE и интерфейсе-приглашении Nyquist, интегрированном в аудиоредактор Audacity®. Вторая часть органично дополняет предварительное исследование и посвящена техническим процедурам компьютерного аудиосинтеза, моделирующего звучание фортепиано с высокой точностью посредством использования предзаписанных звуковых образцов (семплов) для формирования спектроакустических характеристик. В этом разделе статьи представлены функции, задачей которых является обработка информации о гармониках, амплитудных огибающих, временных параметрах, а также для генерации нот и последовательностей на основе MIDI-*файлов*. Основное внимание уделено компонентам моделирования, включающим в себя синусоидальные прототипы звуковых волн, построение огибающих для имитации атаки и затухания, а также управление динамическими уровнями. Используемые алгоритмы обеспечивают реалистичное звучание за счёт алгебраической комбинаторики и модификации указанных параметров. Цель исследования — создание универсального инструмента для синтеза фортепианных звуков с возможностью варьирования тональностей, назначения и переназначения элементов связи (модулятор-демодулятор) во внутрисигнальной системе маршрутизации библиотеки, а также воспроизведение имитационных псевдосигналов для клавиш (MIDI-*аранжировка*). Эти методы особенно актуальны при автома-

notes and sequences based on MIDI files. Emphasis is placed on modeling components, including sinusoidal prototypes of sound waves, envelope construction to imitate attack and decay, and management of dynamic levels. The algorithms utilized ensure realistic sound production through algebraic combination and modification of the specified parameters. The aim of the research is to create a universal tool for piano sound synthesis with the ability to vary tonalities, assign and reassign connection elements (modulator-demodulator) within the library's internal routing system, and to reproduce pseudo-signals for keys (MIDI arrangements). These methods are especially relevant for automatic music generation, sound recording, and the development of stylized accompaniments. Thanks to the application of modern algorithms and pre-recorded audio materials, the library can reproduce complex acoustic properties of the instrument, ensuring high quality and realism of the sound. The conclusion summarizes the overall findings of the work conducted.

Keywords: extension library, pianosyn.lsp — «piano synthesizer», NyquistIDE, Nyquist programming language, MIDI data, Audacity®, computer science, audio engineering, audio informatics, static-lexical analysis, syntactic elements, expressions, operators, audio synthesis, sound manipulation, source code, functional style, algorithmic combinatorics, artificial intelligence, computing technology, programming practices, JAVA™, C, C++, Python™, LISP, Lisp-1, Common Lisp, ANSI LISP, AutoLisp (VLisp), Scheme, XLISP, Arctic, Canon, Fugue, SAL.

тической генерации музыкальных произведений, звукозаписи и разработке стилизованных аккомпанементов. Благодаря применению современных алгоритмов и предварительно записанных аудиоматериалов библиотека способна воспроизводить сложные акустические свойства инструмента, обеспечивая высокое качество и реалистичность звука. В заключении подведены обобщённые итоги проделанной работы.

Ключевые слова: библиотека-*расширение*, pianosyn.lsp — «piano synthesizer», NyquistIDE, язык программирования Nyquist, MIDI-данные, Audacity®, компьютерные науки, аудиоинженерия, аудиоинформатика, статико-лексический анализ, синтаксические элементы, выражения, операторы, аудиосинтез, манипуляции со звуком, программный код, функциональный стиль, алгоритмическая комбинаторика, искусственный интеллект, вычислительная техника, практики программирования, JAVA™, Си, C++, Python™, LISP, Lisp-1, Common Lisp, ANSI LISP, AutoLisp (VLisp), Scheme, XLISP, Arctic, Canon, Fugue, SAL.

Настоящее исследование является продолжением работы, посвящённой статико-лексическому анализу функционально-технических возможностей библиотеки-*расширения* pianosyn.lsp, изложенного в первой части статьи с аналогичным названием. Оно также продолжает цикл исследований автора, фокусирующихся на библиотеках языка программирования Nyquist. Предыдущий анализ охватил основные характеристики вводной части (*пролога*) программного кода библиотеки, предназначенного для решения задач, связанных с синтезом клавишных инструментов. В частности, были рассмотрены функциональные параметры инициализации нот в соответствии с неявными инструкциями, заложенными в алгоритм библиотеки, а также ключевые функции, отвечающие за чтение и маршрутизацию аудиоданных внутри нотационной системы. Кроме того, был освещён вопрос масштабирования аудиосигнала с использованием амплитудных (неявных) огибающих. Автор дал технические комментарии относительно механизмов работы библиотеки как *расширения* языка программирования Nyquist (NyquistIDE) с учётом их фрагментарной кодовой интерпретации в приглашении Nyquist — Audacity®, включая аспекты акустических метрик аудиосигнала [1,2,3]. В данной части исследования основное внимание уделяется изучению циклов аддитивности, субтрактивности, мультипликативности и делительной модальности, с целью формирования мультичастотных (*многокомпонентных*) аудиосигналов в контексте разработки комбинаторно-алгоритмических аудиокомпозиций и синтеза полифонических мелодий.

После вычисления отношения значения, полученного *функцией* sref {по коду: setf (aref *scalegmag1* i) → (/ (sref (aref → (aref gmagmini whichone) i) (— gmagendtimemini → (aref dtmini whichone)))) envpoint))}, к разнице между *gmagendtimemini* и соответствующим элементом *dtmini*, а также сохранения результата в массив scalegmag1 по индексу i, работу *которой* в математическом виде (*рекурсивно*) можно выразить следующим образом:

Формула №1

$$\text{scalegmag1}_i = \\ = \frac{\text{sref}\left(\text{aref}\left(\text{aref}\left(gmagmini, \text{whichone}\right), i\right), \text{envpoint}\right)}{\left(\text{gmagendtimemini} - \text{aref}\left(\text{dtmini}, \text{whichone}\right)\right)}$$

Где:

1) scalegmag1_i — элемент массива scalegmag1 с индексом *i*.
2) aref (*gmagmini*, whichone) — элемент массива gmagmini *по индексу* whichone.
3) aref (..., *i*) — элемент по индексу *i* внутри полученного массива.

4) sref (..., envpoint) — результат функции sref, применённой к этому элементу и envpoint.
5) В знаменателе: *gmagendtimemini* — aref (*dtmini*, whichone).

Перейдём к фрагменту кода, который управляет созданием и повторением звуковых сигналов с заданными огибающими и параметрами в рамках системы синтеза (*ресинтеза*) и моделирования музыкальных композиций, а также выработкой генерации синтетических элементов аудиоматериала, имеющих сложную структуру:

```
(scale 0.5
(sim (at 0 (set-logical-stop (cue (scale attnamp attsound)) sc-duration))
(at 0 (cue (simrep (i ngroup2)[1]
(mult (piano-envelope i sc-duration gmagendtime
gmagendtimemini (aref (aref gmag whichone) i)
(aref gmagmini whichone) scalegmag1)
(piano-group i (+ sc-duration endingtime) freq
(aref wavetab whichone1)))))))
```

Этот код представляет собой часть программы, которая генерирует и озвучивает музыкальный сигнал. Он использует функции и *переменные*, связанные с синтезом звука, обработкой сигналов и управлением аудиоданными. (scale 0.5...) — используется функция scale, которая управляет объёмом и громкостью звука. Аргумент «0.5» означает, что объём будет уменьшен в два раза. (sim (at 0 (set-logical-stop...)) ...) — sim: функция синтеза сигнала, (at 0...) — функция, которая устанавливает значение сигнала в конкретный момент времени (в данном случае — в начальный момент времени, обозначаемый 0). (set-logical-stop...) — функция, которая устанавливает логический конец сигнала с учётом sc-duration (максимального времени, продолжительности сигнала). (cue (simrep (i ngroup2) ...)) — cue: функция, которая управляет воспроизведением сигналов. Simrep — функция, которая осуществляет подготовку (репетицию) сигналов в целях создания более сложной структуры звука. (i ngroup2) — цикл, группы (идентификатор), указывающий на набор элементов и процессов, которые будут повторяться энное количество раз, используя *переменную* i в качестве индекса (номера ноты/*элемента*). (mult (piano-envelope...)) → mult — функция, которая управляет умножением сигналов. (piano-envelope...) — функция, которая генерирует сигнал «фортепиано», являющегося частью синтеза звука. sc-duration, endingtime, freq и wavetab:

1) sc-duration — длительность (максимальное время воспроизведения сигнала).
2) endingtime — время окончания сигнала.
3) freq — *переменная*, которая хранит частоту звука.
4) wavetab — таблица или список, который содержит информацию для генерации сигналов.

(aref (aref gmag whichone) i) → (aref gmagmini whichone), и (aref (aref gmag whichone) i):

1) aref — функция, которая получает элемент из двумерного или трёхмерного массива.
2) gmag и gmagmini — массивы (списки), которые содержат информацию для синтеза сигнала.
3) whichone и i — *переменные*, которые используются для индексации этих массивов.

Этот код использует функции синтеза звука, управления сигналами и логическими концевыми связками для создания сложной музыкальной структуры. Он включает в себя циклы, операции умножения и управление объёмом, а также использование массивов и таблиц для генерации сигналов. Фрагмент кода ниже:

```
(defun piano-note-2 (sc-pitch sc-dynamic)
(let ((dur (get-duration 1)))
(stretch-abs 1 (piano-note dur sc-pitch sc-dynamic))))
(defun piano-midi (midiin)
(let (midi-seq midifile)
(setf midi-seq (seq-create))
(setf midifile (open-binary midiin))
(seq-read-smf midi-seq midifile)
(close midifile)
(seq-midi midi-seq
(note (channel pitch velocity)
(piano-note-2 pitch velocity)))))
```

Фрагмент можно выразить в виде следующей *рекурсивной* формулы:

Пусть

1) sc_pitch — музыкальный тон,
2) (sc_dynamic) — динамика (громкость),
3) (dur = get_duration(1)) — длительность ноты,
4) (stretch_abs(a, b)) — функция растяжения (или масштабирования) с *коэффициентом* (a),
5) (piano_note(dur, pitch, dynamic)) — функция генерации ноты с длительностью (dur), тоном (pitch) и динамикой (dynamic),
6) (midiin) — MIDI входные данные.

Тогда

1) Расчёт длительности ноты:

$$dur = get\_duration\ (1)$$

2) Генерация ноты с учётом растяжения:

$$note\_data = stretch\_abs\ (1, piano\_note\ (dur, sc\_pitch, sc\_dynamic))$$

3) Воспроизведение ноты через MIDI:

$$midi\_message = note\ (channel, pitch, velocity)$$

[1] Прим. автора. at 0 — немедленное (синхронное на момент времени 0) выполнение → cue — запуск события → simrep — повторяющаяся симуляция, цикл или репликация процесса → (igroup2) — группа (идентификатор), указывающий на набор элементов либо процессов, которые будут повторяться.

где
1) *channel* = канал,
2) *pitch* = *sc_pitch*,
3) *velocity* = *sc_dynamic*.

Общая формула для отправки MIDI-*сообщения* будет выглядеть так:

Формула №2

$$\text{Отправить note} \rightarrow \underbrace{MIDI}_{\downarrow}\ \underbrace{MIDI = send\left(\begin{matrix} note \rightarrow (channel, sc\hat{}pitch \rightarrow sc\_dynamic), \\ duration = dur, \text{ с учетом } stretch\_abs \end{matrix}\right)}_{\begin{matrix}(channel, sc\_pitch, sc\_dymanic) \text{ с длительностью} \\ dur \text{ и масштабированием} \\ stretch\_abs \rightarrow (1, piano\_note(dur, sc\_pitch \rightarrow sc\_dynamic))\end{matrix}}$$

Теперь представим процесс масштабирования в виде функции с делителем:

Пусть
1) *get_duration*(1) = *D* — длительность,
2) (*piano_note* (*D, p, v*) = *N*) — функция генерации ноты для длительности *D*, тона *p*, динамики *v*,
3) (*stretch_abs* (1, *N*)) — функция растяжения/масштабирования (здесь с делителем 1, что означает без изменения, но в общем случае можно заменить на делитель *k*,
4) send_midi (*channel, p, v, D'*)) — функция отправки MIDI-*сообщения* с параметрами.

Тогда формула функции:

Формула №3

$$\text{play\_note}(channel, p, v) = \underbrace{\text{send\_midi}}_{\downarrow}$$

$$\left(\text{channel}, p, v \rightarrow \frac{1}{k} \times \text{stretch\_abs}\left(k, piano\_note(D, p, v)\right)\right)$$

Формула №4

$$\text{play\_note}(channel, p, v) =$$

$$= \text{send\_midi}\left(\underset{channel}{p, v}, \frac{1}{k} \times stretch\_abs(k, N)\right)$$

1) *N* = *piano_note* (*D,p,v*),
2) *D* = get_duration (1)),
3) *k* — делитель, регулирующий масштаб.

Если k=1, то формула упрощается до:

$$\text{play\_note}(channel, p, v) =$$
$$= \text{send\_midi}(p, v, stretch\_abs(1, piano\_note(D, p, v)))$$

Определены две функции: piano-note-2 — создаёт звуковой сигнал для одной ноты, основываясь на её тональности (sc-pitch) и динамике (sc-dynamic), piano-midi — читает MIDI-*файл* и преобразует его в сигналы, соответствующие нотам. (defun piano-note-2 (sc-pitch sc-dynamic) ...) — создает звуковой сигнал, имитирующий ноту фортепиано. Имеет следующие параметры:
1) sc-pitch — тональность ноты (например, MIDI-*номер* или частота).
2) sc-dynamic — уровень громкости или интенсивности (velocity).

get-duration 1 — вызывает функцию, возвращающую длительность ноты. В данном случае — с *параметром* «1». get-duration — возвращает стандартную длительность ноты. piano-note — функция, генерирующая звуковой сигнал фортепиано для заданной *длительности*, *тональности* и *динамики*. stretch-abs 1 ... — функция, которая растягивает или изменяет длину сигнала, в данном случае — с коэффициентом «1», то есть оставляя длительность без изменений. (defun piano-midi (midiin) ...) — читает MIDI-*файл* и превращает его в звуковой сигнал. Параметры этой функции — midi-seq — последовательность MIDI-*сообщений*, midifile — файловый дескриптор для MIDI-*файла*. Создаётся *пустая* последовательность MIDI (seq-create). Открывается MIDI-*файл* для чтения (open-binary). Считывается содержимое файла в *последовательность* → (seq-read-smf). Файл закрывается (close). Для каждого MIDI-*сообщения* вызывается seq-midi, которая преобразует MIDI-*сообщения* в аудиосигналы:
1) (note (channel pitch velocity) ...) — для каждого нотного события извлекаются *channel*, *pitch*, *velocity*.
2) Для каждого из этих событий вызывается piano-note-2 с параметрами *pitch* и *velocity*, что генерирует соответствующий звуковой сигнал.

Генерация *последовательностей* для создания WAV-*файла* на основе MIDI-*данных*:

```
1.| (defun piano-midi2file (midiin out-name)
2.| (princ «\nBegin sound production\n»)
3.| (princ «============================\n»)
4.| (s-save (piano-midi midiin)
5.| ny:all (string out-name) :play T)
6.| (princ «============================\n»)
7.| (princ «End sound production\n»))
```

Фрагмент кода определяет функцию piano-midi2file, которая преобразует MIDI-*файл* в *аудиофайл* и сохраняет его на диске. defun piano-midi2file → (midiin out-name) ...) — это определение функции piano-midi2file с двумя параметрами: midiin — входной MIDI-*файл*, out-name — имя выходного аудиофайла. (princ «\nBegin sound production\n») → princ — функция Common Lisp для вывода строки. (s-save (piano-midi midiin) ny:all (string out-name): play T) → s-save — функция, которая сохраняет аудиосигнал в файл, piano-midi — функция, которая преобразует MIDI-*файл* в аудиосигнал, ny:all — параметр, который указывает на то, что процесс должен сохранить все каналы (в данном случае все ноты из MIDI-*файла*),

(string out-name) преобразует out-name в строку, которая будет использована в качестве *имени* выходного файла, :play T — параметр, который указывает на то, что аудиосигнал должен быть воспроизведен после сохранения в файл. (princ «==========\n») — выводит строку линии разделителя. (princ «End sound production\n») — выводит строку, указывающую на конец процесса создания звука (конец звукового воспроизведения). В качестве функции *вывода* объекта в поток — princ, является условным стандартом, обеспечивающим вывод без дополнительных символов (кавычек, абзаца строки и т.п.) [4]. Функция piano-midi2file — выводит сообщение о начале процесса создания звука, преобразует MIDI-*файл* в аудиосигнал с помощью функции piano-midi, сохраняет аудиосигнал в файл на диске, включая *воспроизведение* сигнала *после* сохранения, выводит разделитель, выводит сообщение о конце процесса создания звука. Код необходим для преобразования MIDI-*файлов* в аудиофайлы и сохранения их на диске, а также воспроизведения после сохранения. Следующий фрагмент кода выполняет подготовительные операции, связанные с выделением памяти, настройкой параметров синтезатора и определением ключевых констант. Он включает условную проверку, инициализацию *переменных* и настройку параметров аудиосигнала:

```
1.| (if (not (boundp '*piano-srate*)) ;; if pianosyn.lsp wasn't loaded already
2.| (expand 70)) ;; we'll allocate a lot of nodes for data, so expand now
3.| (setf *pianosyn-save-gc-flag* *gc-flag*)
4.| (setf *gc-flag* nil) ;; we'll do a lot of gc, so turn off messages
5.| ;; Definite some constant
6.| (setq NPITCH 22 GROUPCON 23)
7.| (setq MAXAMP 32767.0)
8.| (setq TWOPI (+ pi pi))
9.| (setq *piano-srate* *default-sound-srate*)
10.| (setq bits 32)
```

Оригинальные комментарии на аглийском языке:

```
1.| ;; 512 gives pretty good SNR for interpolated sines
2.| ;; some tables will be larger: 512 is just the minimum
3.| (setq tabsize 512)
4.| ;; For ending time, use 30 msec. (This was originally 0.1 msec,
5.| ;; about 4 samples, but that's too short to avoid clicks.)
6.| ;; This not only must avoid clicks but it simulates the damper.
7.| ;; This is the time to decay to 0.001 of the original, so it's
8.| ;; actually quite a rapid decay.
9.| (setq endingtime 0.03)
```

Проверка и расширение памяти

```
1) (if (not (boundp '*piano-srate*)) ;; if pianosyn.lsp wasn't loaded already
2) (expand 70)) ;; we'll allocate a lot of nodes for data, so expand now
```

Цель — проверка, определена ли *переменная* *piano-srate*. Если нет — предполагается, что *библиотека* или её модуль pianosyn.lsp еще не был загружен. Параметры подобной проверки уже были рассмотрены автором в предыдущих исследованиях [5,6]. Действие: в случае если *переменная* не определена, вызывается функция expand с аргументом «70», которая увеличивает выделенную память для таблицы узлов с целью последующего использования. Настройка *сборщика мусора*:

```
1.| (setf *pianosyn-save-gc-flag* *gc-flag*)
2.| (setf *gc-flag* nil) ;; we'll do a lot of gc, so turn off messages
```

Цель — сохранить текущий флаг *gc-flag* в *pianosyn-save-gc-flag* для возможного восстановления. Установить *gc-flag* в nil, что, судя по комментариям, означает отключение сообщений о сборке мусора, чтобы не засорять вывод во время интенсивных операций. Определение *констант*:

```
1.| (setq NPITCH 22 GROUPCON 23)
2.| (setq MAXAMP 32767.0)
3.| (setq TWOPI (+ pi pi))
4.| (setq *piano-srate* *default-sound-srate*)
5.| (setq bits 32)
```

NPITCH — количество возможных тонов или нот (22) для синтезируемого инструмента. GROUPCON — значение 23 — это группировка (конфигурация), например, группировка голосов или каналов. MAXAMP — максимальная амплитуда сигнала, равная 32767.0, что соответствует 16-битному диапазону (от –32768 до 32767). Используется для нормализации или ограничения амплитуды. TWOPI — значение 2π, используется при расчётах *синусоидальных* волн (синусы, фазы и периоды). piano-srate — устанавливается в значение *default-sound-srate*, которое, задаёт частоту дискретизации (например, 44100 Гц). Bits — значение 32 — битность внутреннего представления данных или точности вычислений. Размер таблиц:

```
1.| ;; 512 gives pretty good SNR for interpolated sines
2.| ;; some tables will be larger: 512 is just the minimum
3.| (setq tabsize 512)
1) ;; Размер таблицы 512 обеспечивает достаточно высокий коэффициент сигнал/шум для интерполированных синусов
2) ;; Некоторые таблицы могут иметь больший размер: 512 — минимально допустимый
3) (setq tabsize 512)
```

tabsize — размер таблицы для хранения прогона или предвычисленных значений (например, синусоидальных волн). 512 — минимальный размер, который обеспечивает хорошее отношение *сигнал/шум* для *интер-*

полированных синусов. Время затухания (end time):

```
;; For ending time, use 30 msec[2]. (This was originally 0.1 msec,
;; about 4 samples, but that's too short to avoid clicks.)
;; This not only must avoid clicks but it simulates the damper.
;; This is the time to decay to 0.001 of the original, so it's
;; actually quite a rapid decay.
(setq endingtime 0.03)
;; Время завершения установлено на 30 миллисекунд (во избежание щелчков) (Изначально было 0,1 миллисекунды, примерно 4 сэмпла, но это оказалось слишком коротко).
;; Этот параметр не только предназначен для предотвращения щелчков, но и имитирует работу демпфера.
;; За указанное время сигнал затухает до 0,001 от первоначальной амплитуды, что соответствует достаточно быстрому затуханию.
(setq endingtime 0.03)
```

endingtime — время затухания звука при завершении фрагмента аудиосигнала установлено в 30 миллисекунд. Контекст: ранее использовалось очень короткое время 0.1 миллисекунды, что вызвало бы щелчки (клики) при завершении звука, поэтому выбрано более длительное значение. Функция — время, за которое амплитуда сигнала падает до 0.001 от начальной метки — быстрый, но не резкий спад, имитирующий работу демпфера (затухания), характерного для акустических инструментов. Этот код подготавливает среду для синтеза звука с учётом памяти, управления сборщиком мусора, определения базовых физических и цифровых параметров (частота дискретизации, размеры таблиц), а также настроек окончательного затухания звука для предотвращения щелчков и имитации демпфирования. Следующий фрагмент кода параметрически распределяет данные. В нём используются функции *setf*, *list*, *make-array*, а также *переменные*, связанные с таблицами и параметрами звука.

```
(setf hkframe (list 66 73 82 90 99 108 116 123 130 135 138 140 138
133 126 117 107 102 105 127 153 187 200))
(setf attsratelist (list 8000 11025 16000 22050 32000 44100 48000))
(setf gmax1 (make-array GROUPCON))
(setf scalegmag1 (make-array GROUPCON))
(setf scale1 (make-array GROUPCON))
(setf wavetab (make-array GROUPCON))
(setf ti (make-array GROUPCON))
(setf tstep (make-array GROUPCON))
(setf gmaxtabdim (make-array 4))
(setf gmaxtab (make-array 64768))
(setf durtabdim (make-array 4))
(setf durtab (make-array 16384))
(setf rlsratetabdim (make-array 4))
(setf rlsratetab (make-array 11392))
(setf fa (make-array GROUPCON))
(setf dt (make-array GROUPCON))
(setf ngroup (make-array GROUPCON))
(setf npts (make-array GROUPCON))
(setf gmag (make-array GROUPCON))
(setf nhar (make-array GROUPCON))
(setf gmagmini (make-array GROUPCON))
(setf dtmini (make-array GROUPCON))
(setf nptsmini (make-array GROUPCON))
(setf cw (make-array GROUPCON))
(setf phase (make-array GROUPCON))
(setf hfrom (make-array GROUPCON))
(setf hto (make-array GROUPCON))
(setf *zero-table* (scale 0 (build-harmonic 1 tabsize)))
```

Код инициализирует множество *переменных*, в основном массивов (make-array) и списков (list). list — это классическая форма создания нового списка из переданных элементов [7]. Используются *переменные*, содержащие параметры частот, времени, амплитуд и групповых структур. Это часть программы для генерации и обработки звука синтезатора. В ней используются функции *setf*, *list*, *make-array*, а также *переменные*, связанные с таблицами и параметрами звука. hkframe — setf hkframe (list 66 73 82 90 99 108 116 123 130 135 138 140 138 133 126 117 107 102 105 127 153 187 200)). Создаётся список hkframe с набором чисел. Далее следует массив кадров или точек, связанных с характеристиками звука (например, частота, амплитуда, фаза). Значения растут и убывают, что может указывать на *амплитудный* либо *частотный* профиль. attsratelist — (setf attsratelist (list 8000 11025 16000 22050 32000 44100 48000)). Список частот: 8 кГц, 11.025 кГц, 16 кГц, 22.05 кГц, 32 кГц, 44.1 кГц, 48 кГц. Это список допустимых частот дискретизации для звуковых данных или фильтров. Создание массивов (make-array) → (setf gmax1 (make-array GROUPCON)), (setf scalegmag1 (make-array GROUPCON)). GROUPCON — предполагаемый символ или константа, обозначающая размерность массивов. Массивы связаны с группами параметров — gmax1 → максимальные значения групп, scalegmag1 — масштабированные значения амплитуд групп, scale1 — общий масштаб, wavetab — таблица волн, (ti) tstep — временные параметры (начальное время, шаги времени). Gmaxtabdim, durtabdim, rlsratetabdim — размерности таблиц (4 элемента каждое). Gmaxtab, durtab, rlsratetab — основные таблицы параметров, в которых выделены большие массивы (64768, 16384, 11392 элементов). Размеры массивов указывают на работу с большими объёмами данных — таблицами для хране-

[2] Прим.автора. Для времени окончания используем 30 мс. (Ранее было 0.1 мс, около 4 сэмплов, но это слишком коротко, чтобы избежать щелчки). Это правило должно помочь не только избежать щелчков, но и моделировать демпфер. Это время, за которое амплитуда уменьшается до 0.001 от исходной, то есть это достаточно быстрое затухание.

ния звуковых характеристик. Другие массивы: fa — это частоты или амплитуды, dt — временные интервалы, ngroup — количество групп или сегментов, npts — количество точек (samples), gmag — амплитуды групп, nhar — гармоники или гармонический состав. Gmagmini, dtmini, nptsmini — минимальные значения для амплитуд, времени и количества точек для обработки или сравнения звуковых форм. Cw — фаза или фаза-*временная* (этап цикла колебания волны на текущий момент) характеристика, phase — фаза, hfrom (hto) — диапазон гармоник (частот). После определения структуры массивов следует таблица нулевых гармоник — (setf *zero-table* (scale 0 (build-harmonic 1 tabsize))). Создаётся таблица *zero-table*, состоящая из нулевых гармоник. build-harmonic — функция, создающая гармоники, с параметром 1 и размером tabsize (базовый размер таблицы). scale 0 — масштабирование с коэффициентом 0 — это инициализация таблицы нулей. Код предназначен для подготовки данных и структур для обработки или синтеза звука. Большие массивы и таблицы позволяют работать с большими объёмами данных, что характерно для цифрового звукового *анализа*/*синтеза*. Названия переменных свидетельствуют о работе с группами гармоник, частотами, амплитудами и временными характеристиками. Использование функций list, make-array, scale, build-harmonic говорит о модульной структуре, где данные подготавливаются для последующих вычислений. Далее располагается фрагмент кода, отвечающий за инициализацию клавишной партитуры для формирования единого звучания инструмента фортепиано.

```
;; ==================================
;; run-once initilization: pianoActor construction
;; ==================================
(princ «\nBegin Instrument-wise initialization...\n»)
(princ «==========================\n»)
(princ «Reading source files:\n»)
;; Read gmax.tab
(readdat «gmax.tab» gmaxtabdim gmaxtab)
;; Read dur.tab
(readdat «dur.tab» durtabdim durtab)
;; Read rlsrate.tab
(readdat «rlsrate.tab» rlsratetabdim rlsratetab)
;; Read cwxx.cwd
(dotimes (pncount GROUPCON)
(format t «~A « pncount)
(setq filename (strcat «pn»
(string (int-char (+ (truncate (/ pncount 10)) 48)))
(string (int-char (+ (rem pncount 10) 48)))
«.cod»))
(setq filename (strcat *pianosyn-path* filename))
(setq fp (open-binary filename))
;; Read cwdHdr in cwxx.cwd
(setq cwdHdr-ckID (read-int fp) cwdHdr-type (read-int fp))
;; «CNDN» == 1129202766
```

Первые три строчки кода характеризуют процесс вывода в консоль сообщения о начале чтения исходных данных для инструмента. Далее происходит чтение данных из нескольких файлов с помощью функции readdat — эти файлы содержат параметры, связанные с характеристиками инструмента:

- gmax.tab — содержит максимум значений (например, амплитуды или уровня громкости);
- dur.tab — длительности нот;
- rlsrate.tab — скорость затухания, релизные характеристики.

Потом следует *цикл*, который инициализирует набор *пэдов* или клавиш (*групп инструментов*). GROUPCON — число групп или элементов, которые нужно инициализировать. Разберём структуру цикла:

здесь формируется имя файла, pn — префикс имени файла, потом происходит генерация двух цифр номера, что предполагает, что pncount — число, у которого нужно получить двузначное представление, (/ pncount 10) — деление для получения десятков, rem pncount 10 — остаток для получения единиц, (+ ... 48) — преобразование числа в ASCII-код символа цифры (код ‘0’ равен 48), int-char — преобразует ASCII-код обратно в символ, strcat — объединяет части: «pn», две цифры → .cod. Затем формируется полный путь к файлу — (setq filename (strcat *pianosyn-path* filename)). После этого происходит открытие файла в *бинарном* виде для чтения — (setq fp (open-binary filename)). Следующая конструкция читает заголовок структуры данных — (setq cwdHdr-ckID (read-int fp) cwdHdr-type (read-int fp)). Здесь cwdHdr-ckID — это контрольный идентификатор (контрольная сумма) → метка (дисковое пространство), cwdHdr-type — тип данных или формат файла. «CNDN» == 1129202766 — это пример значения контрольной суммы или идентификатора, указывающего на правильность файла. Обобщим процессуальную логику этого фрагмента кода:

1) Код предназначен для инициализации нескольких элементов (групп или клавиш) инструмента, по крайней мере, 10 или более (в зависимости от GROUPCON).
2) Для каждого элемента формируется имя файла по шаблону pnXY.cod, где XY — двузначный номер.
3) В каждом файле происходит чтение заголовка, который содержит контрольные данные (идентификатор и тип).
4) После этих процедур следует чтение содержимого файла, который связан с характеристиками ближайшего элемента (например, параметры звука, временные характеристики и т.д.).
5) Далее эти параметры предсохраняются в структуре данных для дальнейшего использования в моделировании волновой структуры — ресинтезе звука. Итак, код:

— *выводит сообщения о начале процесса,*
— *читает глобальные параметры из таблиц,*
— *циклически по группам формирует имена файлов,*
— *открывает файлы и читает их заголовки.*

Дальнейшие операции связаны с загрузкой параметров звука для каждого элемента инструмента.

Следующий раздел кода предназначен для проверки идентификаторов заголовков (*чанк*-меток) при чтении данных из файла. В системах, связанных с бинарными файлами (например, музыкальных или звуковых форматов), часто используют так называемые «*чанки*» или «*блоки*» с определёнными метками, чтобы убедиться в правильности структурных данных. Начнём анализ с *комментария*:

```
1.| ;; That is for «FORM»==cwdHdr-ckID
2.| ;;(if (and (= cwdHdr-ckID 1179603533) (= cwdHdr-type 1129202766))
3.| ;; ()
4.| ;; (error «Error in reading chunk header.»))
5.| ;;That is for «SYNC»==cwdHdr-ckID
6.| (if (and (= cwdHdr-ckID 1398361667) (= cwdHdr-type 1129202766))
7.| ()
8.| (error «Error in reading chunk header.»))
```

Расшифровка *действий* фрагмента кода:

'FORM' — это стандартный идентификатор в форматах RIFF или подобным ему, где заголовок «FORM» указывает на начало блока данных. Число 1179603533 — это ASCII-код строки 'FORM' в виде 4 байт, закодированных в число. При анализе схем построения контрольных сумм и описания образов данных, а также программирования доступа к ним, автор использовал *следующую литературу* — [8,9,10,11,12,13,14,15]. Аналогично, cwdHdr-type проверяется на значение 1129202766, которое соответствует строке 'CNDN' либо другой метке. Далее следует текущий активный блок проверки. Тестируется, что cwdHdr-ckID равен 1398361667 и cwdHdr-type равен 1129202766. Если оба *условия* выполняются — ничего не происходит (() — пустой блок). Если хотя бы одно условие не выполняется — вызывается ошибка с сообщением «Error in reading chunk header» (Ошибка при чтении заголовка блока). Теперь расшифруем числа строки. Для того чтобы понять, что означают эти числа, можно преобразовать их обратно в строки ASCII, предполагая, что они закодированы как 4 байта.

Преобразование чисел в строки (пример):

1) 1179603533 — 'FORM'
2) 1398361667 — 'SYNC'
3) 1129202766 — 'CNDN'

В ASCII коды для букв:

1) 'F' = 70
2) 'O' = 79
3) 'R' = 82
4) 'M' = 77

Обратное преобразование для числа 1179603533:

Представим его в 4 байта (big-endian или little-endian зависит от системы, но обычно в файлах big-endian), к примеру, в Python™ это можно сделать *следующим образом*:

```
1.| hex_number = hex (1179603533) # 0x464f524d
2.| bytes_value = hex_number.to_bytes (4, byteorder='big')
3.| print(bytes_value) # b'FORM'
```

На выводе будет 'FORM'.

Такое преобразование служит подтверждением правильности нашего анализа кода, что числа — это ASCII-коды строк, *закодированные* в 4 байта. Итоговая логика проверки: для «FORM» (*закомментировано*) — проверка, что текущий заголовок файла — 'FORM', для «SYNC» — активная проверка, что заголовок равен 'SYNC', в случае несоответствия выбрасывается ошибка. После данных процедур следует выполнение чтения блока данных, связанного с «COMMCK» (это часть файла с определённым идентификатором) и сохранение полученных параметров в массивы для дальнейшего использования.

```
1.| ;; Read COMMCK in cwxx.cwd
2.| (setq COMMCK-ckID (read-int fp))
3.| (if (= COMMCK-ckID 1129270605) () (error «COMMCK chunk not found.»))
4.| (setq COMMCK-fa (read-float fp) COMMCK-dt (read-float fp))
5.| (setf (aref fa pncount) COMMCK-fa)
6.| (setf (aref dt pncount) COMMCK-dt)
7.| (setf (aref dtmini pncount) (* 10 COMMCK-dt))
8.| (setq COMMCK-npts (read-int fp) COMMCK-ngroup (read-int fp))
9.| (setf (aref npts pncount) COMMCK-npts)
10.| (setf (aref nptsmini pncount)
11.| (truncate (/ (+ 9 (— COMMCK-npts (nth pncount hkframe))) 10)))
12.| (setf (aref ngroup pncount) COMMCK-ngroup)
```

Чтение идентификатора блока (setq COMMCK-ckID (read-int fp)). Читает целое число из файла fp, которое является идентификатором текущего блока данных (*чанка*). Обычно, такие *идентификаторы* — это 4-*байтовые* коды, например ASCII-строки, закодированные в число, чтобы определить тип блока. Проверка корректности блока: (if (= COMMCK-ckID 1129270605) → () (error «COMMCK chunk not found.»)). Проверяет, что COMMCK-ckID равен 1129270605, если равно — действие отсутствует (() — *пустой блок*), если не равно — вызывается

ошибка «COMMCK chunk not found». Расшифровка числа: 1129270605 — это, ASCII-код строки 'COMM' в 4 байта. Читает два числа с плавающей запятой: COMMCK-fa — «фактическое» значение, уровень, амплитуда, COMMCK-dt — длительность или таймингновый параметр. Далее происходит сохранение параметров в массивы: (setf (aref fa pncount) COMMCK-fa), (setf (aref dt pncount) COMMCK-dt), (setf (aref dtmini pncount) (* 10 COMMCK-dt)). fa, dt, dtmini — массивы, в которых хранятся соответствующие параметры для каждого элемента (pncount — индекс элемента), значение COMMCK-fa сохраняется в массив fa. Значение COMMCK-dt — в dt, dtmini получает значение 10 * COMMCK-dt. Чтение дополнительных параметров: (setq COMMCK-npts (read-int fp) COMMCK-ngroup (read-int fp)). Читает два целых числа: COMMCK-npts — число точек для звукового сигнала или временной сетки, COMMCK-ngroup — число групп (групп звука) или каналов. Сохранение данных о количестве точек: (setf (aref npts pncount) COMMCK-npts), (setf (aref nptsmini pncount), (truncate (/ (+ 9 (— COMMCK-npts (nth pncount hkframe))) 10))). npts — массив, где сохраняется число точек для текущего элемента, nptsmini — массив, в который сохраняется уменьшенная версия числа точек, рассчитанная по формуле: (truncate (/ (+ 9 (— COMMCK-npts (nth pncount hkframe))) 10)). Формула:

Формула №5

$$\text{result} = \text{truncate}\left(\frac{9 + \begin{pmatrix} -(COMMCK - npts) + \\ +\text{nth}(pncount, hkframe) \end{pmatrix}}{10}\right)$$

Здесь:

1) COMMCK — некоторая *переменная*;
2) npts — число или *переменная*;
3) pncount — индекс или *переменная*;
4) hkframe — список или массив;
5) (nth pncount hkframe) — элемент списка hkframe на позиции pncount.

Объяснение формулы:

1) (— COMMCK npts) — вычисляет разницу между COMMCK и npts.
2) (+ 9 (— COMMCK npts (nth pncount hkframe))) — прибавляет 9 к результату, полученному из предыдущего шага.
3) (/ ... 10) — делит сумму на 10.
4) truncate — округляет результат деления в сторону нуля до целого числа.

Это *выражение*, по сути, берет разницу, прибавляет 9, делит на 10 и округляет в сторону нуля. Здесь используется «nth pncount hkframe», что говорит о наличии массива hkframe, содержащего параметры, связанные с кадрами (*фреймами*). Формула делит *скорректированное* число точек на 10, с добавлением 9 — это типичный способ *округления* «вверх» при делении. Сохранение количества групп: (setf (aref ngroup pncount) COMMCK-ngroup). В массив ngroup заносится число групп для текущего элемента. Итоговая логика и назначения. Этот фрагмент кода считывает блок данных с меткой 'COMM' — сохраняет параметры, связанные с акустической характеристикой, временными параметрами и структурой сигнала (*количество точек, группы*). Расчёт nptsmini служит для получения уменьшенной версии количества точек и быстрого (предварительного) анализа или оптимизации. Следующий блок кода предназначен для чтения раздела данных «DATACK» из файла, его структурирования и сохранения в соответствующие массивы.

```
1.| ;; Read DATACK in cwxx.cwd
2.| (setq DATACK-ckID (read-int fp))
3.| (if (= DATACK-ckID 1346458196) () (error «DATACK
    chunk not found.»))
4.| (setf (aref nhar pncount) (read-int fp))
5.| (setf (aref cw pncount) (make-array (aref nhar
    pncount)))
6.| (setf (aref phase pncount) (make-array (aref nhar
    pncount)))
7.| (dotimes (count (aref nhar pncount))
8.| (setf (aref (aref cw pncount) count) (read-float fp)))
9.| (dotimes (count (aref nhar pncount))
10.| (setf (aref (aref phase pncount) count) (read-float fp)))
```

Код предназначен для обработки данных, связанных с «DATACK» (это часть файла с акустическими или звуковыми сигналами). Он читает параметры из файла и структурирует их для дальнейшего анализа или обработки. Чтение идентификатора блока (setq DATACK-ckID (read-int fp)) — читает целое число из файла fp, которое является идентификатором блока данных. Обычно, как уже говорилось в начале статьи, такие идентификаторы — это 4-байтовые коды, закодированные в число (например, ASCII-строки). Проверка корректности блока: (if (= DATACK-ckID 1346458196) → () (error «DATACK chunk not found.»)). Проверяет, что прочитанный идентификатор равен 1346458196, если равно — продолжается выполнение, если не равно — вызывается ошибка «DATACK chunk not found. Чтение и создание массива nhar — (setf (aref nhar pncount) (read-int fp)). Читает целое число из файла — значение nhar для текущего элемента pncount, nhar — массив, где для каждого элемента хранится число «гармоник» или других характеристик сигнала. Далее, на основе этого значения создаются два двумерных массива: (setf (aref cw pncount) (make-array (aref nhar pncount))), (setf (aref phase pncount) → (make-array (aref nhar pncount))). Создаются массивы cw и phase для текущего pncount, размер которых равен nhar[pncount]. Заполнение массива cw:

```
1.| (dotimes (count (aref nhar pncount))
2.| (setf (aref (aref cw pncount) count) (read-float fp)))
```

Цикл dotimes пробегает по диапазону от 0 до nhar[pncount]-1. В каждом шаге читается число

с плавающей запятой из файла. Значение сохраняется в cw[pncount][count]. Заполнение массива phase:

```
1.| (dotimes (count (aref nhar pncount))
2.| (setf (aref (aref phase pncount) count) (read-float fp)))
```

Аналогично первому циклу заполняется массив phase, тоже длиной nhar[pncount]. В каждом элементе — число с плавающей запятой, считанное из файла. *Подытожим логику кода следующими комментариями*:

Проверка блока → убеждаемся, что читаемый блок — это DATACK. Чтение параметра nhar — число «гармоник» или элементов для текущего pncount. Создание двумерных массивов cw и phase — для хранения характеристик каждого элемента. Заполнение массивов — для каждого элемента nhar[pncount] читаются значения cw и phase с файла и сохраняются. Следующий блок кода читает данные из файла (*бинарного* или *текстового*), связанного с обработкой групповых данных. Он включает проверку «магического» числа (идентификатора блока), производит выделение памяти для массивов, а также осуществляет чтение последовательных значений float.

```
1.| ;; Read GRUPCK in cwxx.cwd
2.| (setq GRUPCK-ckID (read-int fp))
3.| (if (= GRUPCK-ckID 1196578128) () (error «GRUPCK
    chunk not found.»))
4.| (setf (aref hfrom pncount) (make-array (aref ngroup
    pncount)))
5.| (setf (aref hto pncount) (make-array (aref ngroup
    pncount)))
6.| ;(display «reading grupck» (aref ngroup pncount)
    (aref nhar pncount) pncount)
7.| (dotimes (count (aref ngroup pncount))
8.| (setf (aref (aref hfrom pncount) count)
9.| (read-float fp)))
10.| (dotimes (count (aref ngroup pncount))
11.| (setf (aref (aref hto pncount) count) (read-float fp)))
```

Проведём построчный анализ данного кода. (setq GRUPCK-ckID (read-int fp)) — читает целое число из файла fp и сохраняет его в *переменную* GRUPCK-ckID (read-int — это функция для чтения 4 байт, интерпретируемых как *целое* число, fp — файловый поток), (if (= GRUPCK-ckID 1196578128) → () (error «GRUPCK chunk not found.»)) — проверяет, равен ли прочитанный ID числу 1196578128.

Логика:

Если равен — действие отсутствует (*пустой блок* ()), если не равен — вызывает ошибку с сообщением «GRUPCK chunk not found». (setf (aref hfrom pncount) (make-array (aref ngroup pncount))) — создаёт массив размером → (aref ngroup pncount) — значение, взятое из другого массива ngroup по индексу pncount, далее этот массив присваивается элементу (aref hfrom pncount). Аналогично для следующей строки: (setf (aref hto pncount) (make-array (aref ngroup pncount))) — создаётся массив для хранения «конечных» значений (по имени hto), также размером (aref ngroup pncount), обе структуры — hfrom и hto — массивы «массивов», создаваемые для хранения данных по *группам*, «;(display «reading grupck» (aref ngroup pncount) (aref nhar pncount) pncount)» — это строка *комментарий*, используется в качестве одного из элементов *отладочной конструкции* с целью выведения текущих параметров. (dotimes (count (aref ngroup pncount)) ...) — это цикл от 0 до (aref ngroup pncount)-1, внутрициклическая конструкция — (setf (aref (aref hfrom pncount) count) → (read-float fp)), читает число с плавающей запятой (read-float) из файла fp, сохраняет его в массиве hfrom по текущему индексу count, так как hfrom — массив *массивов*, (aref hfrom pncount) — массив, в который записывается значение. Аналогичный цикл для hto: (setf (aref (aref hto pncount) count) (read-float fp)) — читает еще один float и сохраняет его в массив hto. Общий смысл действий:

1) Чтение блока данных, начинающегося с *магического* числа 1196578128.
2) Выделение памяти для двух массивов hfrom и hto, каждый из которых является массивом чисел, размер которых определяется ngroup и pncount.
3) Последовательно чтение float-значений из файла и их запись в эти массивы.

⇨read-int и read-float — функции для чтения данных из файла, fp — файловый поток, ngroup — массив или структура, хранящая размер групп для pncount, pncount — индекс текущей группы или блока, hfrom, hto — глобальные или внешние массивы, хранящие данные по группам. Следующий блок кода осуществляет чтение архива магнитуд:

```
1.| ;; Read GMAGCK in cwxx.cwd
2.| (setq GMAGCK-ckID (read-int fp))
3.| (if (= GMAGCK-ckID 1196245319)
4.| ()
5.| (error «GMAGCK chunk not found.»))
6.| (setq gmaghead (read-int fp))
7.| (close fp)
8.| (setf (aref gmag pncount) (make-array (aref ngroup
    pncount)))
9.| (setq gmagrate (/ 1 (aref dt pncount)))
10.| (setq gmagdur (/ (nth pncount hkframe) gmagrate))
```

Код обращается к данным из файла (fp) и обрабатывает определённые параметры, связанные с «GMAG» (*магнитудный анализ*). В коде используются функции чтения (read-int), управление памятью (make-array), а также операции с массивами и переменными. В начале кода присутствует комментарий, указывающий, что далее идёт чтение переменной GMAGCK из файла cwxx.cwd. (setq GMAGCK-ckID (read-int fp)) — значению переменной GMAGCK-ckID присваивается результат вызо-

ва read-int из файла fp. read-int — функция для чтения целого числа из файла, fp — *переменная*, указывающая на открытый файл. (if (= GMAGCK-ckID 1196245319) → () (error «GMAGCK chunk not found.»)) — проверка, равен ли считанный идентификатор GMAGCK-ckID конкретному значению 1196245319, если равен, то ничего не делается (() — пустой блок), если не равен, вызывается ошибка с сообщением «GMAGCK chunk not found». (setq gmaghead (read-int fp)) — значение gmaghead присваивается из следующего целого числа, прочитанного из файла fp. (close fp) — закрытие файла fp. После этого чтение из этого файла далее не будет возможным. (setf (aref gmag pncount) (make-array (aref ngroup pncount))) — здесь происходит присвоение элементу массива gmag по индексу pncount нового массива:

1) aref gmag pncount — обращение к элементу массива gmag по индексу pncount.
2) (make-array (aref ngroup pncount)) — создание массива размером, равным значению, взятому из массива ngroup по индексу pncount.

(setq gmagrate (/ 1 (aref dt pncount))) — объявление переменной gmagrate равной обратной величине элемента массива dt по индексу pncount. Деление 1 на значение из dt по индексу pncount. (setq gmagdur (/ (nth pncount hkframe) gmagrate)) — gmagdur присваивается результат деления значения, взятого из списка/массива hkframe по индексу pncount, на gmagrate, используется nth вместо aref, что говорит о том, что hkframe — скорее список, а не массив. Итоговая *переменная*, указывает на длительность или продолжительность, связанную с магнитудой. Подытожим фрагмент кода функциональными пояснениями: сначала код читает и проверяет блок данных, удостоверяясь в его идентификаторе, после успешной проверки происходит чтение ещё одного параметра (gmaghead), затем закрытие файла, потом создаётся динамический массив внутри другого массива, что указывает на работу с иерархическими структурами данных, где происходят расчёты gmagrate и gmagdur, свидетельствующие о подготовке параметров для дальнейших вычислений, связанных с временными интервалами или скоростями. Представим собственные комментарии к данному блоку кода:

Схемотехника кода

Проверка корректности данных:

— Чтение значения GMAGCK-ckID из файла и проверка, что оно совпадает с ожидаемым числом 1196245319. Если нет — выбрасывается ошибка и выполнение прерывается. Это гарантирует, что далее обрабатываются правильные данные.

Получение и сохранение параметра gmaghead:

— Значение gmaghead — целое число, прочитанное из файла, указывает на заголовок, метку или параметр блока данных.

Закрытие файла fp:

— После этого файл закрыт, что предотвращает дальнейшее случайное чтение из него.

Инициализация массива внутри структуры gmag:

— Создаётся массив, размер которого определяется значением из массива ngroup по индексу pncount. Этот массив присваивается gmag по индексу pncount, что позволяет далее работать с данными, связанными с этим «пакетом» или «группой».

Расчёт временного коэффициента gmagrate:

— Вычисляется как обратное значение элемента массива dt по индексу pncount.

Расчёт длительности или интервала gmagdur:

— Значение, взятое из списка hkframe по индексу pncount, делится на gmagrate. Результат указывает на длину временного интервала, длительность события или аналогичный параметр.

Ожидаемые результаты

1) Объект gmag будет дополнен массивом, созданным динамически, готовым к дальнейшей обработке.
2) Переменные gmagrate и gmagdur будут содержать числовые значения, которые используются в дальнейшем для временных расчётов или моделирования.
3) Обеспечена проверка целостности данных через идентификатор блока (GMAGCK-ckID), что снижает риск ошибок при обработке некорректных данных.

Перейдём к следующему фрагменту кода анализируемой нами библиотеки. Этот фрагмент выполняет последовательность операций для обработки и чтения звуковых данных, связанных с параметром gmag.

```
1.| ; (display «gmagmini» pncount (aref ngroup pncount))
2.| (setf (aref gmagmini pncount) (make-array (aref ngroup pncount)))
3.| (setq gmagratemini (/ 1 (aref dtmini pncount)))
4.| (setq gmagdurmini (/ (aref nptsmini pncount) gmagratemini))
5.| (dotimes (i (aref ngroup pncount))
6.| (let (gmaghead1 samps gmaghead1mini)
7.| (setf gmaghead1 (/ (float gmaghead) (* gmagrate (/ bits 8))))
8.| ;(display «gmag read» i gmaghead1 gmagrate filename)
9.| (setf samps (s-read filename :time-offset gmaghead1
:srate gmagrate
10.| :dur gmagdur :mode snd-mode-float
11.| :format snd-head-raw :bits bits :endian :big))
12.| (if samps (snd-length samps ny:all)) ; force read into memory
```

```
13.| (setf (aref (aref gmag pncount) i) samps)
14.| (setq gmaghead (+ gmaghead (* 4 (nth pncount
    hkframe))))
15.| (setq gmaghead1mini (/ (float gmaghead) (*
    gmagratemini (/ bits 8))))
16.| ;(display «gmag read mini» i gmaghead1mini
    gmagratemini filename)
17.| (setf samps (s-read filename :time-offset
    gmaghead1mini :srate gmagratemini
18.| :dur gmagdurmini :mode snd-mode-float :format
    snd-head-raw
19.| :bits bits :endian :big))
20.| (if samps (snd-length samps ny:all)) ; force read into
    memory
21.| ;(display «read gmagmini» filename pncount i
22.| ; (if samps (snd-length samps ny:all)))
23.| (setf (aref (aref gmagmini pncount) i) samps)
24.| (setq gmaghead (+ gmaghead (* 4 (aref nptsmini
    pncount))))
25.| ))
26.| )
```

Фрагмент кода работает внутри цикла, связанного с *переменной* pncount, которая указывает на индекс текущей группы данных или сегмента. Обрабатываются два набора данных: основной gmag и его *мини*-версия gmag*mini*. Используется функция чтения звука s-read, предполагающая загрузку аудио данных из файла с определёнными параметрами. На первом этапе создаётся массив для *мини*-версии gmagmini — (setf (aref gmagmini pncount) → (make-array (aref ngroup pncount))). Создаётся новый массив размером, равным значению из ngroup по индексу pncount. Этот массив присваивается в gmagmini по индексу pncount и предназначен для хранения *мини*-версий звуковых данных. На втором этапе происходит расчёт скорости (gmagratemini) и длительности (gmagdurmini) — (setq gmagratemini (/ 1 (aref dtmini pncount))) → (setq gmagdurmini (/ (aref nptsmini pncount) gmagratemini)):

1) gmagratemini — это обратное значение dtmini, что свидетельствует о частоте или скорости сэмплирования *мини*-данных.
2) gmagdurmini — это длительность (время) *мини*-данных, вычисленная как число точек nptsmini по скорости gmagratemini.

Третий этап — это цикл по количеству групп (ngroup), (dotimes (i (aref ngroup pncount)) → (let (gmaghead1 samps gmaghead1mini) ...:

— Здесь происходит проход по каждому элементу внутри группы, количество которых равно ngroup[pncount]. Внутри цикла определяются переменные gmaghead1, samps, gmaghead1mini.

Четвёртый этап — это расчёт смещения времени для чтения (gmaghead1) → (setf gmaghead1 (/ (float gmaghead) (* gmagrate (/ bits 8)))). Здесь gmaghead — базовое смещение времени, которое делится на произведение gmagrate и bits/8, что связано с преобразованием байтов во временной сдвиг (учитывая *битовую* глубину). Пятый этап — чтение основного набора данных: (setf samps (s-read filename :time-offset gmaghead1 :srate gmagrate :dur gmagdur :mode snd-mode-float :format snd-head-raw :bits bits :endian :big)) → (if samps (snd-length samps ny:all)) → (setf (aref (aref gmag pncount) i) samps). Тут используется функция s-read для чтения звука из файла filename с указанными параметрами: time-offset gmaghead1 — смещение во времени, srate gmagrate — частота дискретизации, dur gmagdur — длительность, набор параметров — формат, битность, порядок байтов. Если samps успешно прочитаны, вызывается snd-length для загрузки данных в память. Полученные данные сохраняются в gmag[pncount][i]. Дальше происходит расчёт смещения для *мини*-версии gmagmini — (setq gmaghead (+ gmaghead (* 4 (nth pncount hkframe)))) → (setq gmaghead1mini (/ (float gmaghead) (* gmagrate gmagratemini))). gmaghead обновляется с добавлением смещения, связанного с hkframe. gmaghead1mini — аналогичный расчёт для *мини*-версии с использованием gmagratemini. Чтение *мини*-данных — аналогично основному чтению, только с меньшей скоростью и длительностью (gmagratemini, gmagdurmini). Сохраняется в gmagmini[pncount][i]. Обновление gmaghead для следующей итерации — (setf gmaghead (+ gmaghead (* 4 (aref nptsmini pncount)))) — смещение увеличивается на основе количества точек nptsmini, что подготовит правильное позиционирование для следующего чтения. Подытожим функциональные характеристики данного фрагмента:

Задача:

⇨ *загрузить два набора звуковых данных (основной и мини-версия) для каждого элемента внутри группы.*

Используемые переменные: gmag, gmagmini — массивы для хранения данных, pncount — индекс текущей группы или сегмента, ngroup — количество групп, gmaghead — смещение времени для чтения, bits — битность данных, filename — название файла для чтения, gmagrate — частота дискретизации, hkframe, nptsmini, dtmini, nptsmini — параметры, определяющие временные и хронометражные характеристики данных.

Следующий фрагмент кода библиотеки-*расширения* pianosyn.lsp подразумевает формирование волновых таблиц с гармоническими компонентами, сгруппированными по диапазонам частот и фаз. Фрагмент кода генерирует таблицы волн (wavetable synthesis), являющихся важным элементом при моделировании различных синтезаторов и звуковых систем. Он включает: определение максимальной частоты групп, определение границ групп (ngroup) для каждого сегмента, соз-

дание и заполнение таблиц волн для каждой группы, основанных на гармонических составляющих. Сначала происходит инициализация maxfreq → (setq maxfreq (aref fa (1— GROUPCON))), здесь fa — массив частотных границ групп, GROUPCON — число групп. Затем определяются границы групп (ngroup) — (dotimes (i GROUPCON) → (setq ngrouptemp -1) → (dotimes (j (aref ngroup i)) → (if (and (= ngrouptemp -1) → (> = (* (aref (aref hto i) j) (aref fa i)) → (/ *piano-srate* 2))) → (setq ngrouptemp j))) → (if (> = ngrouptemp 0) (setf (aref ngroup i) ngrouptemp)))). В этом подразделе фрагмента кода происходит поиск границы *внутри* каждой группы:

1) Внутренний цикл по j, который проходит по количеству элементов ngroup[i].
2) Условие ищет первый индекс j, для которого произведение aref (aref hto i) j и aref fa i превышает половину частоты *piano-srate*.
3) ngrouptemp — запоминает индекс этого элемента.
4) В конце, если такой индекс найден (> = 0), он сохраняется в ngroup[i].

Далее следует строка вывода сообщения: (princ «\ nGenerating wavetables...\n») — выводит на экран информацию о начале генерации таблиц волн. После сообщения код производит фазовые расчёты и перерасчёты — tempi → (setq tempi (/ (* 360 tabsize) (* TWOPI TWOPI))). tempi — коэффициент преобразования для фазовых расчётов, tabsize — размер таблицы, TWOPI — константа 2π, далее идёт обращение к генерации таблиц:

```
1.| (dotimes (h GROUPCON)
2.| (setf (aref wavetab h) (make-array (aref ngroup h)))
3.| (dotimes (i (aref ngroup h))
4.| ;(FORMAT T «WAVE ~A OF GROUP ~A~%» i h)
5.| (let ((low (aref (aref hfrom h) i))
6.| (high (aref (aref hto h) i))
7.| tempphase tempcw
8.| (len tabsize))
9.| ; table size must be more than twice greatest harmonic number
10.| ; use a factor of three so we have a wider margin of oversampling
11.| (setf len (max len (* 3 high)))
12.| (setf sumwave *zero-table*)
13.| (do ((k (truncate low) (incf k)))
14.| ((> k high))
15.| (cond ((< k (aref nhar h))
16.| (setq tempphase (aref (aref phase h) k))
17.| (setq tempcw (aref (aref cw h) k)))
18.| (t
19.| (setq tempphase 0)
20.| (setq tempcw 0)))
21.| (setf sumwave (sum sumwave (scale tempcw (build-harmonic-phase k
22.| (+ (* tempphase tempi) 90.0)
23.| len))))))))
24.| ;(PRINT «FORCE SUMMATION OF WAVE»)
25.| (snd-length sumwave ny:all) ; force summation
26.| ;( «END SUMMATION OF WAVE»)
27.| (setf (aref (aref wavetab h) i) (list sumwave (hz-to-step 1) T))))
```

Здесь для каждой группы h создаётся массив wavetab[h] из ngroup[h] элементов, внутренний цикл по i — для каждого сегмента внутри группы, low и high задают диапазон гармоник или частотных компонентов для этого сегмента, размер таблицы len увеличивается для обеспечения достаточного oversampling (в 3 раза больше максимальной гармоники), sumwave — аккумулятор для суммы гармонических компонентов. Рассмотрим основной цикл верификации значений:

1) Перебор k от low до high.
2) Для каждого k, если он внутри диапазона гармоник (<(aref nhar h)), извлекается phase и cw (коэффициенты), иначе параметр устанавливаются в ноль.
3) build-harmonic-phase — функция, которая возвращает гармоническую волну для данной гармоники с учётом фазы и амплитуды.
4) scale — масштабирует гармоническую волну по tempcw.
5) sum — добавляет гармоническую волну к аккумулятору sumwave.

После завершения цикла по k происходит подсчёт сил (звуковая интенсивность, определение плотности звука) — (snd-length sumwave ny:all). Это функция для финальной обработки суммы волн, чтобы вычислить окончательную таблицу. Затем — (setf (aref (aref wavetab h) i) (list sumwave (hz-to-step 1) T)) — сохраняет полученную волну, преобразованную в шаги (hz-to-step) и с флагом T (истина). Итак, подытожим функционально-*неявные* опции данного фрагмента кода:

— *Задача фрагмента:*

1) Создание таблиц волн с гармоническими компонентами, сгруппированными по диапазонам частот и фаз.

— *Структура:*

2) Определение границ групп.
3) Генерация волн для каждой группы и сегмента.
4) Использование гармонических функций, фаз и амплитуд.

— *Особенности:*

5) Использование oversampling (умножение len на 3).
6) Внимание к диапазонам гармоник и флагам активности.
7) Преобразование частот в шаги для дальнейшего использования.

Теперь предлагаем обратить внимание на функции build-harmonic-phase, scale и hz-to-step на основе их на-

званий и контекста использования в нашем коде. build-harmonic-phase — эта функция, которая возвращает графическую или числовую репрезентацию гармонической волны для заданной гармоники k с учётом фазы и амплитуды. Её использование внутри кода — (build-harmonic-phase k (+ (* tempphase tempi) 90.0) len):

1) k — индекс гармоники.
2) (+ (* tempphase tempi) 90.0) — фазовая компонента в градусах или радианах.
3) len — размер таблицы, которая должна содержать дискретизированную гармоническую волну.

Создаёт массив длиной len, в котором содержится синусоидальная или косинусоидальная волна (либо другая форма) для гармоники k. Может учитывать фазу и амплитуду (через tempphase и другие параметры). Для работы функции представим следующий псевдокод:

```
1.| (defun build-harmonic-phase (k phase len)
2.| (let ((wave (make-array len :initial-element 0.0))
3.| (amplitude 1.0)) ; или другое значение, если есть
4.| (dotimes (i len)
5.| (let ((angle (* 2 π k (/ i len))))
6.| ;; Используем синус или косинус с учетом фазы
7.| (setf (aref wave i) (* amplitude (sin (+ angle (* phase (/ π 180.0))))))))
8.| wave))
```

⇨ scale — масштабирует (умножает) массив данных (здесь — гармоническую волну) на коэффициент tempCW. Контекст использования:

⇨ (scale tempcw (build-harmonic-phase ...))

tempCW — коэффициент амплитуды (может быть, уровень громкости или амплитуды гармоники), build-harmonic-phase возвращает массив значений волны. Далее происходит умножение каждого элемента на tempCW. В качестве функционального примера представим следующую программно-кодовую конструкцию:

```
1.| (defun scale (coefficient wave)
2.| (let ((result (make-array (length wave))))
3.| (dotimes (i (length wave))
4.| (setf (aref result i) (* coefficient (aref wave i))))
5.| result))
```

Теперь рассмотрим hz-to-step, которая преобразует частоту в «шаги» или дискретные значения по таблице — обычно для обращения частоты в индекс массива или шаг по таблице волн. Контекст использования (hz-to-step 1) — в данном случае преобразует частоту 1 Гц или 1 условную единицу в соответствующий индекс таблицы или шаг. Зависит от частоты дискретизации и размера таблицы. Обычно, если есть частота hz, то индекс по таблице определяется как — (index) = (hz / sample_rate) * table_size. Пример использования в коде (*псевдокод*): (defun hz-to-step (hz) → (* hz (/ tabsize *piano-srate*))), где tabsize — размер таблицы, *piano-srate* — частота дискретизации. В нашем вызове используется hz-to-step 1, что означает перевод 1 Гц в соответствующий индекс таблицы.

Таблица 1.

Генеративные функции для организации синтеза звуковых форм с учётом фаз и гармоник

Функция	Назначение	Основной механизм
build-harmonic-phase	Создаёт таблицу гармонической волны для гармоники k, учитывая фазу	Генерация синусоиды или косинусоиды длиной len с учётом заданной фазы и гармоники
scale	Масштабирует массив данных (волны) на коэффициент	Умножение каждого элемента массива на коэффициент
hz-to-step	Преобразует частоту (Гц) в индекс таблицы или дискретное значение	Вычисление индекса по формуле, основанной на таблице размера и частоте дискретизации

Далее идёт финальный фрагмент кода, который связан с чтением звука атаки (attack sound) и инициализацией некоторых параметров для синтезатора.

```
1.| ;; Read in attack sound
2.| (princ «\nRead in attack sound...\n»)
3.| (setq attndur 0.5)
4.| (setq attnth -1)
5.| (dotimes (count (length attsratelist))
6.| (if (and (= attnth -1) (<= *piano-srate* (nth count attsratelist))) (setq attnth count)))
7.| (if (or (= attnth -1) (/= (nth attnth attsratelist) *piano-srate*))
8.| (princ «No attack sound rate corresponds to current sound rate, use the nearest one\n»))
9.| (if (> attnth 0)
10.| (if (<= (— (nth attnth attsratelist) *piano-srate*) (— *piano-srate* (nth (1— attnth) attsratelist)))
11.| (setq attsrate (nth attnth attsratelist)) (setq attsrate (nth (1— attnth) attsratelist)))
12.| (case attnth
13.| (-1 (setq attsrate (last attsratelist)))
14.| (0 (setq attsrate (nth 0 attsratelist)))))
15.| (setq filename (format nil «att~A.pcm» (truncate attsrate)))
16.| (setf filename (strcat *pianosyn-path* filename))
17.| (setf attsound
18.| (s-read filename :srate attsrate :dur attndur :format snd-head-raw
19.| :mode snd-mode-pcm :bits 16 :endian :big))
20.| (p|rinc «==========\n»)
21.| (princ «End instrument-wise initialization\n»)
22.| (princ«\n\n==========\n»)
23.| (princ «Piano Synthesizer function definition:\n»)
```

```
24.| (princ «(piano-note-2 step dynamic)\n»)
25.| (princ «(piano-note duration step dynamic)\n»)
26.| (princ «(piano-midi midi-file-name)\n»)
27.| (princ «(piano-midi2file midi-file-name sound-file-
    name)\n\n»)
28.| (princ «============================\n»)
29.| (setf *gc-flag* *pianosyn-save-gc-flag*) ;; restore
    original value
```

Код выполняет *следующие задачи*:

1) Определяет частоту сэмплирования для звука атаки, подбирая наиболее подходящую из предварительно заданных.
2) Загружает соответствующий звуковой файл.
3) Выводит информацию о завершении инициализации.
4) Выводит определения функций для работы с фразами и MIDI.
5) Восстанавливает флаг сборки мусора.

Вывод сообщения и установка длительности атаки — (princ «\nRead in attack sound...\n») → (setq attndur 0.5). Выводит сообщение о начале чтения звука атаки. attndur — длительность атаки, равная 0.5 секунды. Далее идёт поиск ближайшей подходящей частоты сэмплирования для звука атаки — (setq attnth -1) → (dotimes (count (length attsratelist)) → (if (and (= attnth -1) (<= *piano-srate* (nth count attsratelist))) → (setq attnth count))). Здесь, attsratelist — список частот сэмплирования, допустимых для звуков атаки. *Переменная* attnth инициализируется как –1, означает, что подходящая частота еще не найдена. Перебирается attsratelist, ищется первое значение, которое больше или равно текущему *piano-srate*. После завершения цикла attnth содержит индекс найденной частоты или –1, если ничего не найдено. Далее происходит проверка наличия подходящей частоты и выдача информационного сообщения (if (or (= attnth -1) (/= (nth attnth attsratelist) *piano-srate*)) → (princ «No attack sound rate corresponds to current sound rate, use the nearest one\n»)). Если attnth равен -1 или частота не совпадает точно с текущим *piano-srate*, выводится предупреждение, что будет использована ближайшая. Выбор подходящей частоты — (if (> attnth 0) → (if (<= (— (nth attnth attsratelist) *piano-srate*) → (— *piano-srate* (nth (1— attnth) attsratelist))) → (setq attsrate (nth attnth attsratelist)) → (setq attsrate (nth (1— attnth) attsratelist))) → (case attnth → (-1 (setq attsrate (last attsratelist))) → (0 (setq attsrate (nth 0 attsratelist))))). Если подходящая частота найдена (attnth> 0), выбирается ближайшая из двух — либо *текущая*, либо *предыдущая*, в зависимости от того, какая ближе к *piano-srate*. Если attnth равно -1, то выбирается *последняя* частота из списка (last attsratelist). Если attnth равно 0, выбирается первая частота. Этот подраздел кода определяет наиболее подходящую частоту сэмплирования для звука атаки. Формирование имени файла и его загрузка — (setq filename (format nil «att~A.pcm» (truncate attsrate))) → (setf filename (strcat *pianosyn-path* filename)) → (setf attsound → (s-read filename :srate attsrate :dur attndur :format snd-head-raw :mode snd-mode-pcm :bits 16 :endian :big)). Здесь создается имя файла вида «att<частота>. pcm». Указывается полный путь к файлу, который добавляется из *pianosyn-path*. Звук загружается функцией s-read с указанной частотой attsrate, длительностью attndur, форматом, битностью и порядком байтов. В конце следует вывод сообщений о завершении и объявлении функций:

```
1.| (princ «============================\n»)
2.| (princ «End instrument-wise initialization\n»)
3.| (princ«\n\n=========================\n»)
4.| (princ «Piano Synthesizer function definition:\n»)
5.| (princ «(piano-note-2 step dynamic)\n»)
6.| (princ «(piano-note duration step dynamic)\n»)
7.| (princ «(piano-midi midi-file-name)\n»)
8.| (princ «(piano-midi2file midi-file-name sound-file-
    name)\n\n»)
9.| (princ «============================\n»)
```

Выводит разделительные линии и описание функций, которые реализуют основные операции синтезатора. Начинает процесс восстановления флага сборщика мусора (setf *gc-flag* *pianosyn-save-gc-flag*) ;; restore original value (восстановить исходное значение). Восстановление исходного значения флага сборки мусора (может управлять автоматической очисткой памяти). Подведём промежуточный итог анализа финального программного фрагмента библиотеки pianosyn.lsp:

1) Фрагмент библиотеки загружает звуковой файл для атаки сэмпла, подбирая наиболее подходящую частоту сэмплирования.
2) Логика выбора частоты — ищется ближайшая допустимая частота, затем выбирается наиболее подходящая из двух соседних.
3) Загрузка файла — формируется имя файла и вызывается s-read для загрузки звука.
4) Вывод — информативные сообщения о ходе выполнения, а также описание ключевых функций синтезатора.

Мы рассмотрели финальный блок программного кода библиотеки-*расширения* pianosyn.lsp. Подводя общий итог проделанной работы, представим список основных *функций* библиотеки и определим их назначение:

1) Вывод информации о программе — отображается название, версия, авторы и описание происхождения алгоритма.
2) Инициализация путей и переменных: устанавливается текущий путь к файлам звуковых данных.
3) Функция readdat — считывает параметры и данные из бинарных файлов, содержащих характеристики и звуковые образцы различных групп и гармоник инструмента.

4) build-harmonic-phase — создает звуковой сигнал на основе гармонической частоты и фазы.
5) decay-env — строит экспоненциальную амплитудную огибающую, моделирующую затухание звука.
6) piano-envelope — создает огибающую для групп гармоник, учитывая время атаки и затухания.
7) piano-group — генерирует волну для конкретной группы гармоник с заданной частотой.
8) piano-note — формирует отдельную ноту фортепиано с заданной длительностью, высотой и динамикой, используя разработанные огибающие и волну.
9) piano-note-abs — внутренний помощник, который создает звуковой сигнал для конкретной ноты, учитывая диапазон высот и динамических уровней.
10) piano-midi — преобразует MIDI-файл в последовательность нот и генерирует соответствующий звук.
11) piano-midi2file — создает звуковой файл на основе MIDI-файла.

В результате проведённого исследования был всесторонне проанализирован скрытый (неявный) потенциал библиотеки-расширения pianosyn.lsp, а также выявлены межкодовые функциональные взаимосвязи в соответствии с результатами статико-лексического анализа. Рассмотрены методы моделирования звука фортепиано с применением синтеза гармонических частот, огибающих и обработки MIDI-*записей* для автоматической генерации звуковых файлов. Также учтены технические и технологические аспекты реализации сложных схем инженерного редактирования различных аудиоматериалов. Настоящее исследование публикуется в двух частях. Первая часть (вводная) посвящена общему структурному разбору пролога программы, в ходе которого осуществляется расшифровка её основных функций. В ней представлены авторские комментарии и пояснения относительно применения отдельных фрагментов кода в области аудиоинженерии. Особое внимание уделяется функциональным возможностям библиотеки в контексте использования среды разработки NyquistIDE и специализированного интерфейса для языка программирования Nyquist, применяемого в аудиоредакторе Audacity®. Вторая часть конкретизирует изложенный материал и органично дополняет предшествующий фрагмент исследования, но сужает его в теоретической области, освещая практические процедуры компьютерного аудиосинтеза, моделирующего звучание фортепианных звуков с высокой точностью. В данном разделе основной упор делается на использование подготовленных звуковых образцов для формирования спектро-акустических параметров, обеспечивающих реалистичное воспроизведение инструмента в цифровом формате. Библиотека включает функции для считывания и обработки данных о гармониках, амплитудных огибающих и временных характеристиках звука, а также для генерации отдельных нот и последовательностей на базе MIDI-*файлов*. Ключевыми компонентами реализуемых процедур являются моделирование звуковых волн с помощью синусоидальных компонентов с гармоническими частотами и фазами, построение огибающих для имитации атаки и затухания звука, а также управление динамическими уровнями. Весь процесс осуществляется посредством алгоритмов, объединяющих и модифицирующих указанные параметры для достижения реалистичного звучания. Основная цель данного исследования — создание универсального инструмента для синтеза фортепианных звуков, включающего различные модификации тональностей и возможность назначения клавишам сигналов, имитирующих звуки других музыкальных инструментов (MIDI-*аранжировка*). Такой инструмент предназначен для автоматической генерации музыкальных композиций, звукозаписи и создания стилизованных аккомпанементов. Благодаря использованию современных алгоритмов и предварительно записанных аудиоматериалов, эта библиотека (в роли расширения — синтезатор) способна воспроизводить сложные акустические свойства инструментов, обеспечивая высокое качество и реалистичность звучания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Компьютерная программа Nyquist IDE v.3.15 / Файл директории (C:\Users\Name\nyquist) // OS: MS Windows, GNU Linux /// Полная реализация — Jesse Clark, David Hovard, David Movatt, David Deangelis, Roger B. Dannenberg. — 2002–2018. [электронный источник, автономная компьютерная программа].
2. Компьютерная программа Audacity® v.2.1.3 / Файл директории (C:\Program Files (x86) \Audacity) // OS: MS Windows, GNU Linux /// Полная реализация — Gale Andrews, Arturo «Buanzo», James Crook, Roger B. Dannenberg, Steve Daulton, Vaughan Johnson, Greg Kozikowski, Paul Licameli, Peter Sampson, Martyn Shaw, Bill Wharrie. — 1999–2017. [электронный источник, автономная компьютерная программа].
3. Официальный сайт редактора Audacity® — [электронный WEB-ресурс, дата обращения к ресурсу: 07.07.2026].
4. Лавров С.С. Автоматическая обработка данных. Язык Лисп и его реализация / С.С. Лавров, Г.С. Силагадзе. — Москва: Наука, 1978. — 175 с.
5. Таран В.В. Эксперимент Данненберга-Льюис: клеточные автоматы и алгоритмическо-комбинаторная структура аудиоданных (научный анализ, аудиопрограммирование, воспроизведение эксперимента и факторы его уточнения) // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». — 2026. — №2–2. — С.101–124, (DOI: 10.37882/2223–2966.2026.02–2.22).
6. Таран В.В. Технико-функциональный анализ генеративных взаимосвязей библиотек-расширений «cell-aut.lsp» и «pianosyn.lsp — piano-note» языка программирования Nyquist в системе имитационного моделирования алгоритмически-комбинаторных аудиосигналов с применением принципа клеточных автоматов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». — 2026. — №3. — С.184–202. (DOI: 10.37882/2223–2966.2026.03.40).

7. Хювенен Э. Мир Лиспа. (В 2 томах). Том 1. Введение в язык Лисп и функциональное программирование / Э. Хювенен, И. Сеппянен; перевод с финского. — Москва: Мир, 1990. — 447 с.
8. Dannenberg R.B. Nyquist Reference Manual Version 3.24 // Carnegie Mellon University — School of Computer Science / Pittsburgh, PA 15213, U.S.A. 05.03. 2025, 289 p.
9. Norvig P. Paradigms of Artificial Intelligence Programming: Case Studies in Common Lisp / P. Norvig. — San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers, 1992. — 946 p.
10. Weitz E. Common Lisp Recipes: A Problem-Solution Approach / E. Weitz. — Berkeley C.A.: Apress, 2016. — 744 p.
11. Domkin V. Programming Algorithms in Lisp: Writing Efficient Programs with Examples in ANSI Common Lisp / V. Domkin. — Berkeley, C.A.: Apress, 2021. — 382 p.
12. Gabriel R.P. Performance and Evaluation of Lisp Systems / R.P. Gabriel. — Cambridge M.A.: MIT Press, 1985. — 305 p.
13. Dybvig R.K. The Scheme Programming Language / R.K. Dybvig. — 4th ed. — Cambridge M.A.: MIT Press, 2009. — 504 p.
14. Felleisen M. How to Design Programs: An Introduction to Programming and Computing / M. Felleisen, R.B. Findler, M. Flatt [et al.]. — 2nd ed. — Cambridge, MA: MIT Press, 2018. — 736 p.
15. Xenakis I. Formalized Music: Thought and Mathematics in Composition / I. Xenakis. — Hillsdale N.Y: Pendragon Press, 1992. — 387 p.

© Таран Василий Васильевич (allscience@lenta.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.36

ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГОРИТМА АДАПТАЦИИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РАДИОЛИНИИ КИС ПО СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДОВ С АВТОКОРРЕКЦИЕЙ

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE ALGORITHM FOR ADAPTING THE SIMULATION MODEL OF THE CIS RADIO LINK IN TERMS OF TRANSMISSION RATE UNDER INTERFERENCE CONDITIONS USING AUTO-CORRECTION CODES

A. Tarasov
A. Kovalchuk

Summary. In recent years, research has been actively conducted to improve the accuracy of information transmission and to suppress interference in satellite communication systems. They are based on the principle of building command and measurement systems.

As part of this work, a new algorithm has been developed for estimating the signal parameters in the radio link of the command and measurement system. The algorithm provides the selection of a radio link channel based on a preliminary analysis of the interference situation, both at different transmission rates and using different encoding methods for incoming and outgoing data.

In the course of the study, the modes of operation of the receiver were formalized, which supports the parallel operation of several channels with different signal-code structures, which provides a wide range of data transmission rates. An autocorrelation function is built for each mode at each speed.

This article shows that using a new approach to information exchange between ground and on-board equipment provides not only a significant gain in time, a significant increase in the reliability of transmitted and received data, but also a significant gain in efficiency with an increased probability of bit error compared to the traditional method, in which switching speeds in a complex interference environment is carried out by commands the operator.

Keywords: on-board equipment, ground equipment, receiver, transmitter, signal-code structures, radio link, command, and measurement systems.

Тарасов Алексей Геннадьевич
кандидат технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»
A.Tarasov@stankin.ru
Ковальчук Антон Сергеевич
аспирант, ФГАОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»
tolstakoala@yandex.ru

Аннотация. В последние годы активно ведутся исследования, направленные на повышение точности передачи информации и подавление помех в системах спутниковой связи. Их основу составляет принцип построения командно-измерительных систем.

В рамках предыдущих работ создан новый алгоритм оценки параметров сигнала в радиолинии командно-измерительной системы. Алгоритм обеспечивает выбор канала радиолинии на основе предварительного анализа помеховой обстановки — как при различных скоростях передачи, так и с применением разных методов кодирования входящих и исходящих данных.

В ходе исследования формализованы режимы работы приёмника, поддерживающего параллельное функционирование нескольких каналов с различными сигнально-кодовыми конструкциями, что обеспечивает широкий диапазон скоростей передачи данных. Для каждого режима на каждой скорости построена автокорреляционная функция.

В данной статье показано, что использование нового подхода к информационному обмену между наземной и бортовой аппаратурой обеспечивает не только существенный выигрыш во времени, значительное повышение достоверности передаваемых и принимаемых данных, но и существенный выигрыш в эффективности при росте вероятности битовой ошибки по сравнению с традиционным методом, при котором переключение скоростей в сложной помеховой обстановке осуществляется командами оператора.

Ключевые слова: бортовая аппаратура, наземная аппаратура, приёмник, передатчик, сигнально-кодовые конструкции, радиолиния, командно-измерительные системы.

Введение

Надёжная передача данных между наземной аппаратурой и космическими аппаратами остаётся одной из ключевых задач спутниковой связи. Радиолиния командно-измерительной системы (КИС) функционирует в условиях постоянного воздействия помех — как предсказуемых, так и случайных. Погодные аномалии, неконтролируемые источники радиочастотного излучения, неисправное оборудование соседних систем и ошибки операторов способны в любой момент деградировать канал связи, снизить скорость передачи и исказить данные.

В настоящее время известны следующие методы борьбы с помехами, помогающие справляться с заранее известными угрозами: схемы коррекции ошибок LDPC, регулирование мощности, а также резервные каналы. В случае возникновения внезапных и непредвиденных воздействий возможности таких методов ограничены: оператор вынужден вручную искать источник проблемы и переключать режимы передачи, что ведёт к потере времени и снижению достоверности данных.

Наиболее перспективным решением данной проблемы являются адаптивные алгоритмы, способные автоматически оценивать помеховую обстановку, а также выбирать оптимальный канал без участия человека. В основе таких систем лежат псевдошумовые сигналы, применяемые в таких навигационных системах, как GPS, Galileo и BeiDou. Детерминированность в сочетании со статистическими свойствами белого шума таких сигналов обеспечивает эффективное подавление сосредоточенных помех и устойчивую связь в непростых условиях.

В предыдущей статье был разработан и подробно описан алгоритм адаптации имитационной модели радиолинии КИС, анализирующий отношение сигнал/шум и автоматически выбирающий канал передачи по и методу кодирования.

В данной статье оценивается целесообразность использования алгоритма на основе сравнения трёх режимов работы: без кодирования, с кодами Хэмминга и с кодами Рида-Соломона. Показано, что применение адаптивного подхода обеспечивает более высокую эффективность в процессе передачи информации от наземной аппаратуры на бортовую и наоборот по сравнению с классическим методом ручного переключения скоростей во всём диапазоне уровней ошибок канала.

Основные принципы работы адаптивного приёмо-передатчика с разной скоростью передачи информации, а также с использованием разных сигнально-кодовых конструкций

Отношение сигнал/шум на входе приёмника — как бортового, так и наземного — может опускаться до критически низких значений под воздействием естественных помех и собственных шумов аппаратуры. Это ставит задачу построения систем, способных обеспечивать передачу информации с заданной вероятностью успеха даже в неблагоприятных условиях [7].

Для решения этой задачи разработан адаптивный передатчик, который реагирует на ухудшение канала двумя способами: при неудачной передаче снижает скорость, а при исчерпании скоростного резерва переходит к другому режиму кодирования. По итогам исследования построена имитационная модель такого передатчика, поддерживающая несколько скоростей передачи и различные сигнально-кодовые конструкции.

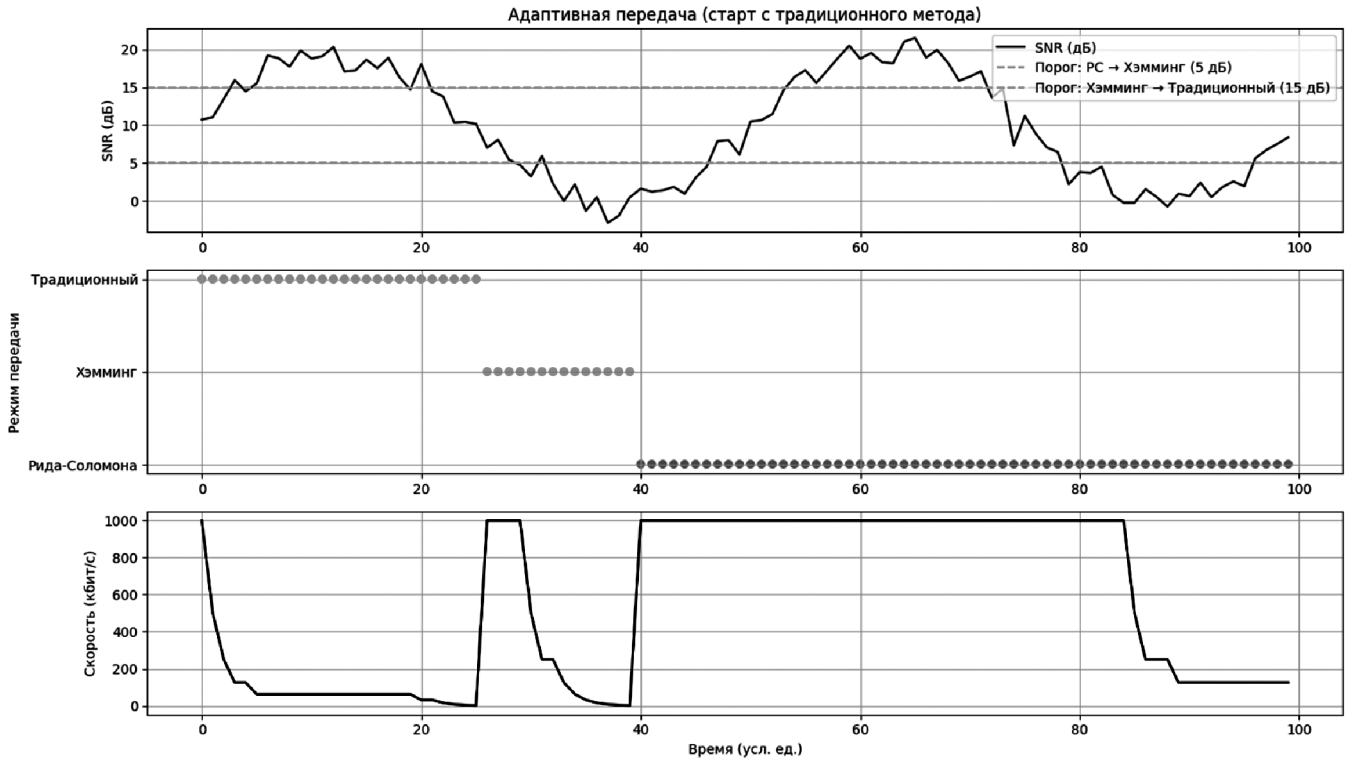


Рис. 1. Результаты моделирования адаптивного передатчика с разной скоростью передачи информации, а также с использованием разных сигнально-кодовых конструкций

Результаты моделирования представлены на рисунке 1. Передатчик работает в трёх режимах. Изначально наземная аппаратура (НА) начинает передачу на максимальной скорости без кодирования. После получения ответа от бортовой аппаратуры (БА) приёмник НА оценивает отношение сигнал/шум: если оно опускается ниже 15 дБ, скорость передачи автоматически снижается вдвое. При достижении минимальной скорости передатчик переходит во второй режим — кодирование Хэмминга — и возобновляет передачу на максимальной скорости 1 Мбит/с. Если в этом режиме отношение сигнал/шум падает ниже 5 дБ и помеховая обстановка не улучшается, передатчик переключается на кодирование Рида-Соломона.

На рисунке 1 показана последовательность переключений между режимами и соответствующее изменение скорости передачи в зависимости от текущего значения отношения сигнал/шум.

Применение такого подхода, как уже было выяснено в предыдущих статьях, существенно поможет сэкономить время при передаче информации без дополнительных команд.

Преимущества использования алгоритма адаптации имитационной модели радиолинии КИС по скорости передачи в условиях помех с использованием кодов с автокоррекцией

В ходе моделирования исследовалась зависимость эффективной пропускной способности канала от отношения сигнал/шум для традиционного и адаптивного алгоритмов.

График на рисунке 2 показывает, что при SNR ≥ 15 дБ оба алгоритма работают практически одинаково — пропускная способность близка к номинальной скорости передачи. При высоком отношении сигнал/шум вероятность ошибок мала, поэтому необходимость в корректирующем кодировании и повторных передачах не возникает.

При ухудшении помеховой обстановки традиционный режим начинает терять эффективность: растёт число ошибок, контрольная сумма всё чаще фиксирует повреждённые пакеты, и значительная часть ресурсов канала уходит на повторную передачу уже отправленных данных.

Адаптивный алгоритм ведёт себя иначе. При падении SNR ниже 15 дБ скорость передачи снижается, что повышает энергетическую устойчивость сигнала. При дальнейшем ухудшении условий алгоритм последовательно подключает кодирование Хэмминга, затем Рида-Соломона. Введённая избыточность сокращает число повторных передач и, несмотря на накладные расходы, обеспечивает более высокую реальную скорость доставки данных.

В области низких значений SNR адаптивный алгоритм стабильно превосходит традиционную схему по эффективной пропускной способности канала.

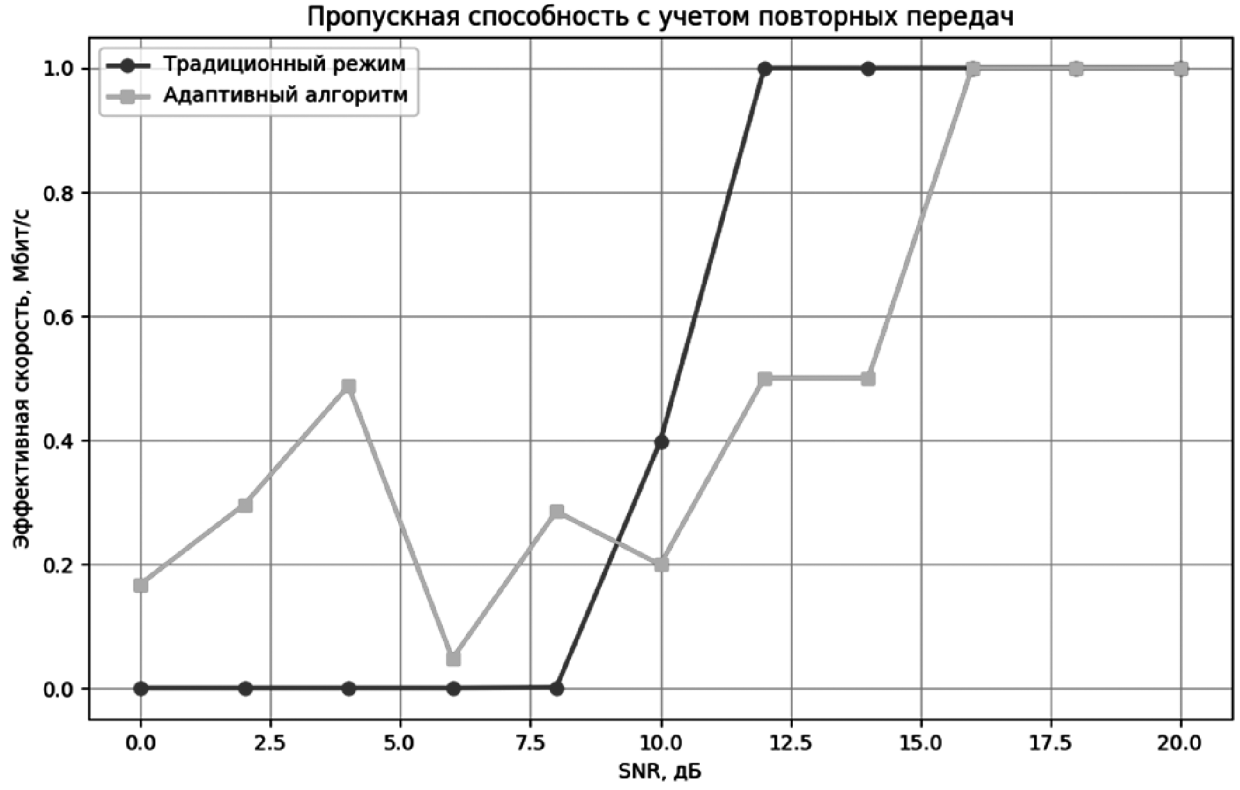


Рис. 2. Пропускная способность с учётом повторных передач

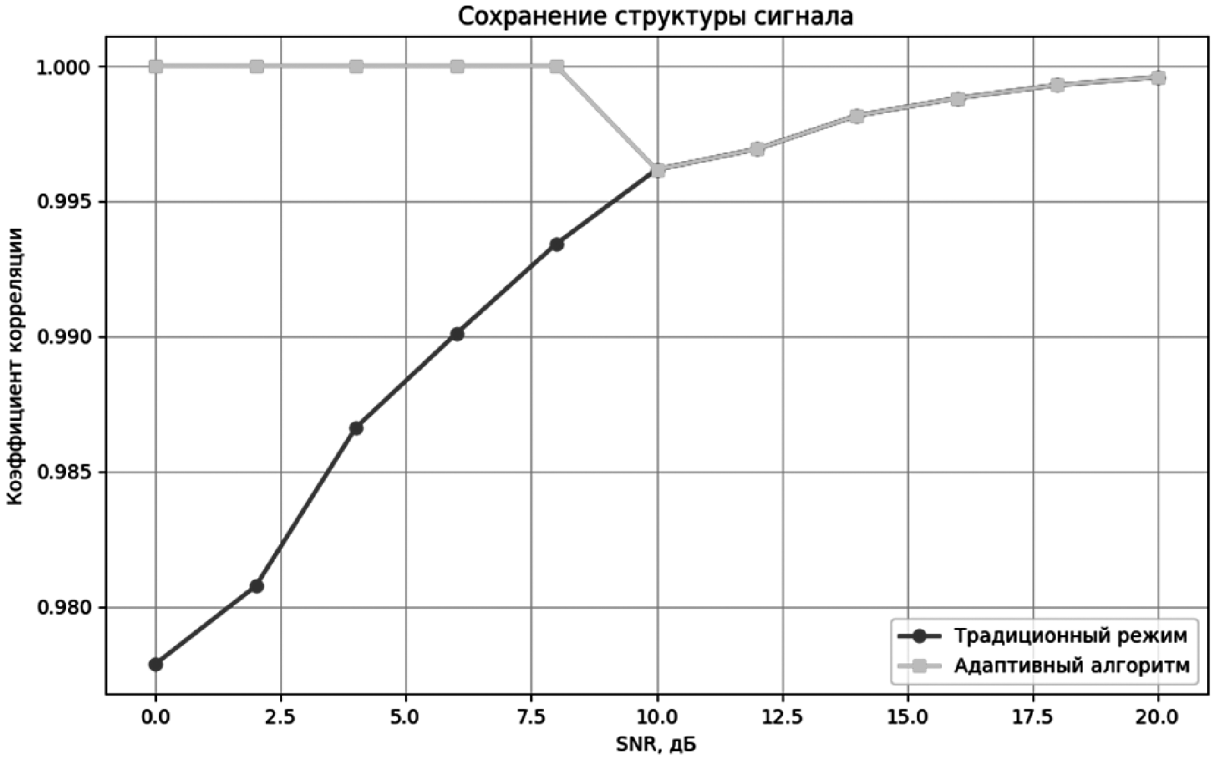


Рис. 3. Сохранение структуры сигнала

Для оценки сохранности структуры сигнала были вычислены коэффициенты корреляции между автокорреляционными функциями переданного и принятого сигналов.

График на рисунке 3 показывает, что при хорошей помеховой обстановке оба алгоритма дают коэффициенты корреляции, близкие к единице — переданный и принятый сигналы практически совпадают. По мере снижения отношения сигнал/шум картина меняется: в традиционном режиме коэффициент корреляции постепенно падает. Причина — рост числа ошибок при передаче: шум искажает временную структуру сигнала, и автокорреляционная функция принятого сигнала всё заметнее расходится с исходной.

Адаптивный алгоритм удерживает коэффициент корреляции на более высоком уровне во всём диапазоне низких значений SNR. Коды Хэмминга и Рида-Соломона компенсируют ошибки, накапливающиеся при обмене данными между наземной и бортовой аппаратурой, и удерживают статистические характеристики сигнала в допустимых пределах там, где традиционный режим перестаёт справляться.

Адаптивный алгоритм точнее восстанавливает исходные данные и лучше сохраняет структуру сигнала при интенсивных помехах.

Результаты моделирования показывают, что адаптивное переключение режимов передачи повышает эффективность радиолинии в условиях нестабильной помеховой обстановки. Алгоритм сокращает число повторных передач, увеличивает реальную пропускную способность канала и поддерживает высокую корреляцию между переданным и принятым сигналами даже при низком отношении сигнал/шум.

Переход между режимами — без кодирования, с кодированием Хэмминга и с кодированием Рида-Соломона — происходит автоматически и обеспечивает более устойчивый обмен данными между наземной и бортовой аппаратурой в широком диапазоне условий распространения сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Невдяев Л. CDMA: Борьба с помехами //Сети/Network world: электронный журнал. 2000. №10. https://www.osp.ru/nets/2000/10/141420 (дата обращения 15.05.2025)
2. Формирование обобщённых данных. Экспериментальная спецификация CCSDS 551.1 — 0-1 //Научные разработки и исследования в области стандартов космических систем связи. Оранжевая книга.2015, вып. 1. 48 с. https://public.ccsds.org/Pubs/551x1o1e1(R).pdf (дата обращения 17.05.2025)
3. Тарасов А.Г., Алгоритм выбора оптимальной длины слова помехоустойчивого кода при передаче данных по линии связи с постоянным уровнем шума/ X-ая научная конференция МГТУ «СТАНКИН» Учебно-научного центра Математического моделирования МГТУ «СТАНКИН» — ИММ РАН. Программа, Сборник докладов. М.: Янус-К ИЦ ГОУ МГТУ «СТАНКИН», 2007 г., стр.68–70 (дата обращения 18.05.2025)

4. Мальцев Г.Н., Травкин В.С. Оптимальный приём сложных фазоманипулированных сигналов в спутниковых радиоканалах в условиях внутрисистемных структурных помех// Информационно управляющие системы, 2006, №5(24). С.36–42. (дата обращения 19.05.2025)
5. Telecommand Part 1 Channel service. Recommendation for Space Data System Standarts CCSDS 201.0-B3. Текст: электронный //Blue Book. Washington, DC: CCSDS. 2000. 42 p. https://public.ccsds.org/Pubs/201x0b3s.pdf (дата обращения 21.05.2025)
6. Бортовая аппаратура командно-измерительной системы для космических аппаратов ГЛОНАСС: результаты эксплуатации и перспективы развития/ Н.Н. Булгаков, В.Г. Глыбин, А.А. Кривошеин, А.С. Семочкин, журнал «Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы», 2014, том 1, выпуск 2, с.65–73. (дата обращения 27.05.2025)
7. Ларьков И.В. Исследование параметров корреляционного приёмника псевдослучайных сигналов // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления. Материалы XV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Гомель, 23–24 апреля 2015 г./ Под общ. редакцией А.А. Бойко. Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2015. Стр. 273–276.

© Тарасов Алексей Геннадьевич (A.Tarasov@stankin.ru); Ковальчук Антон Сергеевич (tolstakoala@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.37

УПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЕМ КОМПЕТЕНЦИЙ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ПРОФИЛЕЙ ПОДГОТОВКИ

MANAGING THE DEVELOPMENT OF SPECIALISTS' COMPETENCIES IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS BASED ON AUTOMATED CLASSIFICATION OF TRAINING PROFILES

V. Tarasov

Summary. The paper addresses the automated classification of specialists' competencies in continuing-education systems from multidimensional testing data. The classical kernel density estimation of the score distribution with a single Silverman-rule bandwidth is shown to be inherently sensitive to scale-estimation error, which causes spurious merging or splitting of substantively different learner groups. The free-Gaussian method is proposed, in which the scale parameter is treated not as a constant to be optimized but as an independent coordinate, and the density estimate as a two-dimensional scalar field over the "score–scale" plane. The distribution structure is recovered from the topology of this field by means of Morse theory and persistent homology: the maxima skeleton, the persistence diagram and the cluster-count function with stable scale intervals are constructed. The sample mean and the classical peak-merging criterion of a two-component mixture are shown to arise as natural limiting cases, ensuring continuity with classical statistics. On a synthetic sample of twelve thousand observations and across nine hundred computational experiments using the paired Wilcoxon test, the classification quality is statistically indistinguishable from the best modern algorithms at substantially lower variance and one-to-three orders of magnitude lower computational cost.

Keywords: density estimation, scale space, free-Gaussian method, Morse theory, persistence diagram, multiscale analysis, clustering, competency classification, continuing education, decision support, management in organizational systems.

Тарасов Вячеслав Сергеевич
Аспирант,
МИРЭА — Российский технологический университет
slavatarasov207@gmail.com

Аннотация. Рассматривается задача автоматизированной классификации компетенций специалистов системы непрерывного образования по результатам многомерного тестирования. Показано, что классическая оценка плотности распределения баллов с выбором единственной ширины полосы сглаживания по правилу Сильвермана обладает принципиальной чувствительностью к погрешности оценки масштаба распределения, что приводит к ложному слиянию или дроблению содержательно различных групп слушателей. Предложен метод свободной гауссианы, в котором масштабный параметр трактуется не как подлежащая оптимизации константа, а как самостоятельная независимая координата, а оценка плотности — как двумерное скалярное поле над плоскостью «балл — масштаб». Структура распределения восстанавливается из топологии этого поля средствами теории Морса и теории персистентных гомологий: строятся скелет локальных максимумов, диаграмма персистентности и функция числа кластеров с выделением устойчивых интервалов масштаба. Установлено, что выборочное среднее и классический критерий слияния пиков двухкомпонентной смеси возникают в методе как естественные предельные случаи, что обеспечивает преемственность с классической статистикой. На синтетической выборке объёмом двенадцать тысяч наблюдений и в серии из девятисот вычислительных экспериментов с применением парного критерия Вилкоксона показано, что качество классификации статистически неотличимо от лучших современных алгоритмов при существенно меньшей дисперсии результата и на один — три порядка меньшей вычислительной стоимости.

Ключевые слова: оценка плотности распределения, пространство масштабов, метод свободной гауссианы, теория Морса, диаграмма персистентности, многошкальный анализ, кластеризация, классификация компетенций, непрерывное образование, поддержка принятия решений, управление в организационных системах.

Введение

Рост производительности труда в современных организационных системах достигается за счёт качественного повышения уровня квалификации сотрудников, что выдвигает на первый план прикладную задачу автоматизированной оценки и классификации компетенций специалистов. На каждом цикле профессиональной переподготовки методист работает с группой слушателей, существенно различающихся по исходной подготовке. Эта неоднородность не является случайным шумом: она отражает закономерное явление профессиональной специализации, при котором компетенции формируются под воздействием частоты встречаемости задач в практике специалиста. Поэтому корректная диагностика требует анализа профиля по нескольким тематическим осям, а не интегральной скалярной оценки: два специалиста с противоположными профилями могут получить одинаковый итоговый балл и быть ошибочно отнесены к одной группе. Современные платформы

управления обучением технически допускают индивидуализацию траектории, но лишены формализованного аппарата автоматической классификации слушателей; применяемые методы группировки опираются на эвристические правила и не обеспечивают ни статистической обоснованности, ни воспроизводимости [1].

В теории педагогических измерений уровень подготовки описывается несколькими моделями: классической теорией тестов с аддитивным разложением наблюдаемого балла на истинную и ошибочную составляющие, теорией отклика на задание с латентной логит-шкалой и иерархической моделью компетентности, разделяющей знание, понимание, умение и действие. Все они оценивают индивидуальный уровень подготовки, тогда как задача управления требует иного — выделения групп однородно подготовленных слушателей при заранее неизвестном числе таких групп. Скалярная итоговая оценка, агрегирующая результаты по всем тематическим блокам, теряет значительную часть диагностической информации: распределение агрегированного балла может оставаться внешне унимодальным даже при наличии нескольких содержательно различных профилей подготовки, тогда как анализ плотности этого распределения во всём диапазоне масштабов сглаживания позволяет восстановить скрытую групповую структуру и количественно оценить её устойчивость.

Математической основой выделения групп служит непараметрическая оценка плотности распределения баллов, восходящая к работам [2], [3] и обобщённая в [4]. Качество такой оценки критически зависит от единственного параметра — ширины полосы сглаживания; задача её выбора остаётся активной областью исследований [5, 6]. Классические параметрические методы кластеризации — метод k-средних [7] и модель гауссовых смесей с EM-алгоритмом [8] — требуют априорного задания числа кластеров, что для систем непрерывного образования методически некорректно. Методы поиска мод плотности — алгоритм сдвига среднего [9] и иерархическая плотностная кластеризация [10] — определяют число групп автоматически, однако чувствительны к выбору масштаба сглаживания. Граница различимости двух соседних групп описывается классическим критерием бимодальности двухкомпонентной смеси [11].

Перспективным направлением является анализ структуры распределения сразу во всём диапазоне масштабов. Топологическая структура пространства масштабов исследована в [12]; аппарат классификации критических точек гладких функций даёт теория Морса [13], а устойчивость выделяемых структур к возмущениям данных обосновывается теорией персистентных гомологий [14, 15], активно развиваемой в последние годы [16, 17, 18, 19, 20, 21]. Идея введения явного масштабного параметра распределения как самостоятельного инструмента анализа предложена в [22]. Вместе с тем в литературе не обнаружено систематического объединения непараметрической оценки плотности, критерия слияния пиков и иерархического дерева разбиений в единый алгоритмический конвейер для задачи классификации компетенций; восполнение этого пробела составляет содержание работы.

Актуальность исследования определяется потребностью федеральных систем непрерывного образования в прозрачном, статистически обоснованном и вычислительно эффективном инструменте поддержки принятия управленческих решений. Предлагаемые метод и система образуют замкнутый контур управления уровнем квалификации (диагностика — решение — обучение — повторная диагностика), что соответствует предмету научной специальности 2.3.4 «Управление в организационных системах».

Методология

Цель статьи — разработка и обоснование метода свободной гауссианы для автоматизированной классификации компетенций специалистов на основе многошкального анализа плотности тестовых баллов, в котором масштабный параметр трактуется как независимая координата, а оценка плотности — как двумерное скалярное поле.

Результаты тестирования n специалистов по T тематическим блокам описываются матрицей баллов; темы взвешиваются вектором положительных весов с условием нормировки (1), а агрегированный балл задаётся взвешенной свёрткой (2):

$$w_1 + \ldots + w_T = 1,\ w_t > 0 \qquad (1)$$

$$x_i = \Sigma\, w_t x_{it},\ t = 1, \ldots, T \qquad (2)$$

Несмещённая оценка стандартного отклонения с поправкой Бесселя и робастный эффективный масштаб (3), объединяющий её с межквартильным размахом IQR, задают рабочий диапазон сглаживания:

$$\sigma_e = \min\left(\hat{\sigma}, \mathrm{IQR} / 1{,}34\right) \qquad (3)$$

Делитель (n−1) в оценке стандартного отклонения восстанавливает несмещённость: математическое ожидание суммы квадратов отклонений наблюдений от выборочного среднего равно (n−1)-кратному истинной дисперсии, поэтому деление на n систематически занижало бы оценку. Робастная составляющая эффективного масштаба — межквартильный размах, делённый на 1,34, — устойчива к выбросам: при появлении далёких наблюдений выборочное стандартное отклонение растёт за счёт квадратичного вклада, тогда как межк-

вартильный размах остаётся практически неизменным. Выбор минимума из двух оценок гарантирует, что рабочий масштаб не будет завышен ни тяжёлыми хвостами распределения, ни редкими аномалиями, что особенно важно при анализе реальных образовательных данных с неполным заполнением тестовых блоков и единичными нетипичными результатами.

Принципиальная идея метода состоит в отказе от выбора единственной ширины полосы. Вводится плоскость координат «балл — масштаб», и для каждой пары определяется скалярное поле плотности с гауссовым ядром (4):

$$\hat{f}(x;\sigma) = 1 / (n\,\sigma\sqrt{2\pi}) \cdot \Sigma \exp\left(-(x - x_i)^2 / 2\sigma^2\right) \quad (4)$$

Поле бесконечно дифференцируемо; выбор гауссова ядра обоснован тем, что только для него число локальных максимумов оценки монотонно не возрастает с ростом масштаба (принцип causality), а эволюция поля описывается уравнением теплопроводности. При фиксированном масштабе критические точки классифицируются по знаку второй производной средствами теории Морса [13]: локальный максимум отвечает центру кластера, локальный минимум — границе между кластерами. Непрерывная траектория локального максимума по координате масштаба называется хребтом; объединение хребтов образует скелет максимумов. Устойчивость хребта измеряется его персистентностью (5):

$$\ell(\gamma) = \log\left(\sigma_{death} / \sigma_{birth}\right) \quad (5)$$

Согласно теореме устойчивости [15], диаграмма персистентности непрерывно зависит от выборки, что обеспечивает устойчивость анализа к выбросам и шумам. Число локальных максимумов как функция масштаба кусочно-постоянно и невозрастающе; устойчивой («жирной») зоной называется интервал постоянства этого числа, удовлетворяющий условию (6):

$$\log\left(\sigma_\beta / \sigma_\alpha\right) > 1 / 2 \quad (6)$$

Рабочий диапазон построения сетки масштабов задаётся через эффективный масштаб: нижняя граница порядка 0,04 от него обеспечивает необходимую детализацию, верхняя граница порядка 2,5 от него гарантирует выход в асимптотический одномодальный режим. Внутри этого диапазона методист выбирает рабочий масштаб из подходящей жирной зоны: широкая зона на больших масштабах отвечает укрупнённому делению на несколько крупных групп, более узкие зоны на меньших масштабах — тонкому различению близких профилей. Короткоживущие интервалы постоянства, для которых логарифм отношения границ меньше 0,3, соответствуют переходным режимам слияния хребтов и как рабочие не выбираются. Тем самым метод предоставляет не единственное навязанное число групп, а полную количественную картину устойчивости всех возможных конфигураций разбиения, что и составляет его управленческую ценность.

Конфигурация из жирной зоны инвариантна к погрешности оценки масштаба в пределах ±50 % и более. Для равновесной двухкомпонентной смеси с центрами и общим разбросом граница бимодальности достигается при критическом значении (7), что совпадает с классическим критерием [11] и в многошкальной интерпретации задаёт координату слияния соседних хребтов:

$$\sigma^* = (\mu_2 - \mu_1) / 2 \quad (7)$$

Иерархическое дерево разбиений строится как алгоритмическое следствие применения метода на каждом узле; критерий остановки ветвления — достижение единственной жирной зоны на выборке узла, что устраняет внешние эвристические пороги. Для каждого листа вводится тематический профиль (8) — отклонение средней оценки группы по теме от глобальной средней по теме, служащее входом для формирования индивидуальной образовательной траектории:

$$\delta_{v,t} = \bar{x}_{v,t} - \bar{x}_t \quad (8)$$

Выборочное среднее возникает в методе как предел положения единственного максимума при неограниченном росте масштаба (9), что обеспечивает преемственность с классической статистикой в духе принципа соответствия [23]:

$$\arg\max_x \hat{f}(x;\sigma) \to \bar{x},\ \sigma \to \infty \quad (9)$$

Экспериментальная проверка выполнена на синтетической выборке объёмом n = 12 000 наблюдений, порождённой моделью пяти архетипов компетенций со средними 35, 58, 65, 68 и 85 баллов. Проведена серия из 900 вычислительных экспериментов (5 наборов данных × 30 запусков × 6 алгоритмов); качество классификации измерялось скорректированным индексом Рэнда (ARI), статистическая значимость различий — парным критерием Вилкоксона [24] с поправкой Холма на множественные сравнения [25]. Вычислительное ядро реализовано как тензорная операция на массово-параллельной архитектуре (PyTorch/CUDA) с эталонной CPU-реализацией.

Результаты

Построение пространства масштабов на тестовой выборке выявило при малых масштабах четыре устойчивых хребта; близкие архетипы со средними 65 и 68 баллов сливаются на одномерной шкале агрегированного балла в единый хребет, а их различие восстанавливается через тематический профиль (8). При росте масштаба

хребты последовательно сливаются, и в пределе остаётся единственный хребет, сходящийся к выборочному среднему $\bar{x} \approx 61{,}8$, что подтверждает предельный переход (9). Характеристики устойчивых зон числа кластеров приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Характеристики устойчивых зон числа кластеров

K	Диапазон σ	log(σβ/σα)	Статус зоны
4	[0,50; 3,77]	0,88	жирная (основная)
3	[3,97; 6,67]	0,23	укрупнённая
2	[7,03; 7,80]	0,05	короткоживущая
1	≥ 8,21	–	асимптотическая ($\to \bar{x}$)

Все четыре хребта обладают значительной персистентностью ($\ell \geq 3{,}47$) и классифицируются как устойчивые; точки, близкие к диагонали диаграммы персистентности, отсутствуют, что свидетельствует об отсутствии шумовых артефактных хребтов. Результаты сравнения качества классификации с современными алгоритмами приведены в таблице 2.

Количественный анализ диаграммы персистентности подтверждает устойчивость найденной структуры: центральный хребет объединённой группы сохраняется вплоть до асимптотического режима; хребет нижнего архетипа сливается с центральным при масштабе около 8,2, хребет верхнего архетипа — около 7,0, хребет пары близких архетипов — около 4,0. Соответствующие устойчивые зоны числа кластеров образуют убывающую последовательность обоснованных конфигураций — четыре, три, две и одна группа, — каждая из которых доступна методисту как осмысленный вариант разбиения. Наибольшую протяжённость по логарифмической оси масштаба имеет основная зона из четырёх групп, что указывает на неё как на наиболее естественное разбиение тестовой выборки и согласуется с числом архетипов, заложенных в порождающую модель данных.

Таблица 2.

Качество кластеризации (ARI, среднее ± стандартное отклонение, 900 запусков)

Метод	ARI	Примечание
Свободная гауссиана (K = 4)	0,878 ± 0,005	малая дисперсия
GMM (BIC)	0,882 ± 0,011	лучшее среднее
MeanShift	0,879 ± 0,005	сопоставимо
GMM (K = 5)	0,876 ± 0,068	высокая дисперсия
HDBSCAN	0,863 ± 0,003	–
KMeans (K = 5)	0,800 ± 0,115	наименее устойчив

Время полного построения поля на эталонной CPU-реализации составило 1,54 ± 0,01 с при n = 12 000 (пять независимых прогонов) с линейной зависимостью от объёма выборки; массово-параллельная реализация сокращает это время на один — три порядка.

Обсуждение

Парный критерий Вилкоксона с поправкой Холма показал, что качество классификации метода свободной гауссианы статистически неотличимо от лучших современных методов (GMM с выбором числа компонент по байесовскому критерию и алгоритма сдвига среднего [9]) при существенно меньшей дисперсии результата по независимым запускам. По сравнению с параметрическими методами [7, 8] предлагаемый подход не требует априорного задания числа кластеров; по сравнению с плотностными методами [10] он оперирует единственным интерпретируемым параметром масштаба и возвращает не единственное число групп, а полную картину их устойчивости. В отличие от современных методов оценки качества кластеризации на основе плотности [6], устойчивость найденной конфигурации строго обоснована теоремой о персистентности [15].

Методологические преимущества подхода сводятся к пяти положениям. Во-первых, вместо единственного значения числа кластеров возвращается полная функция этого числа по всем масштабам, оставляя выбор рабочего уровня за методистом. Во-вторых, в отличие от параметрических методов не требуется априорное задание числа групп. В-третьих, в отличие от плотностных методов подход оперирует единственным интуитивно ясным параметром — масштабом сглаживания. В-четвёртых, теорема устойчивости диаграммы персистентности даёт строгое обоснование устойчивости найденной конфигурации к возмущениям выборки, которого классические методы лишены. В-пятых, выборочное среднее и критерий слияния пиков возникают как предельные случаи, что обеспечивает преемственность с классической статистикой и облегчает интерпретацию результатов специалистом-предметником. Совокупность этих свойств помещает метод на Парето-фронт «качество — вычислительная стоимость» в одномерной задаче кластеризации балльных данных.

Полученные результаты согласуются с общей тенденцией применения топологического анализа данных к задачам классификации и кластеризации [16, 17, 18, 20, 21] и развивают её в направлении одномерного многошкального анализа балльных данных с прозрачной управленческой интерпретацией. Ограничением метода является эффект проклятия размерности при прямом переносе изотропного ядра в полное тематическое пространство: плотность данных в окрестности падает экспоненциально с ростом размерности, и локальные

максимумы исчезают в шуме. Методологически обоснованный путь — сохранение одномерного характера этапа обнаружения групп с переносом многомерного анализа на этап тематического профилирования внутри уже выделенной группы. Достоверность результатов подтверждается воспроизводимостью (детерминированность построения дерева разбиений), согласием предельных режимов с классической статистикой и статистической проверкой значимости различий на представительной серии экспериментов.

Выводы

Разработан метод свободной гауссианы, представляющий ядерную оценку плотности как двумерное скалярное поле над плоскостью «балл — масштаб» и восстанавливающий структуру выборки из его топологии средствами теории Морса и теории персистентных гомологий. Введены понятия скелета максимумов, персистентности хребта и устойчивой зоны числа кластеров, предоставляющие методисту прозрачный инструмент выбора числа групп. Показано, что выборочное среднее и классический критерий слияния пиков двухкомпонентной смеси возникают как предельные случаи метода. На серии из 900 экспериментов с применением критерия Вилкоксона установлено, что качество классификации статистически неотличимо от лучших современных методов при меньшей дисперсии и на один — три порядка меньшей вычислительной стоимости. Метод инвариантен к предметной области и применим к любым числовым оценкам компетенций специалистов в организационных системах.

Перспективы дальнейших исследований связаны с анизотропным обобщением ядра для совместного многомерного анализа тематических осей, с интеграцией метода в промышленные платформы управления обучением и с расширением аппарата на потоковую обработку данных мониторинга в режиме, близком к реальному времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ezugwu A.E., Ikotun A.M., Oyelade O.O. [et al.]. A comprehensive survey of clustering algorithms: state-of-the-art machine learning applications, taxonomy, challenges, and future research prospects // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2022. Vol. 110. Article 104743.
2. Rosenblatt M. Remarks on some nonparametric estimates of a density function // The Annals of Mathematical Statistics. 1956. Vol. 27, № 3. P. 832–837.
3. Parzen E. On estimation of a probability density function and mode // The Annals of Mathematical Statistics. 1962. Vol. 33, № 3. P. 1065–1076.
4. Silverman B.W. Density estimation for statistics and data analysis. London: Chapman and Hall, 1986. 175 p.
5. Guidoum A.C., Henider A. Data-driven bandwidth selection in kernel density estimation via unsupervised learning // Lecture Notes in Networks and Systems. Cham: Springer, 2025. Vol. 1267. DOI: 10.1007/978-3-031-82112-7_12.
6. Modak S. A new measure for assessment of clustering based on kernel density estimation // arXiv preprint arXiv:2201.02030. 2022. 12 p.
7. MacQueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations // Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. Berkeley: University of California Press, 1967. P. 281–297.
8. Dempster A.P., Laird N.M., Rubin D.B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm // Journal of the Royal Statistical Society. Series B. 1977. Vol. 39, № 1. P. 1–38.
9. Comaniciu D., Meer P. Mean shift: a robust approach toward feature space analysis // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2002. Vol. 24, № 5. P. 603–619.
10. McInnes L., Healy J. Accelerated hierarchical density-based clustering // 2017 IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW). New Orleans: IEEE, 2017. P. 33–42.
11. Eisenberger I. Genesis of bimodal distributions // Technometrics. 1964. Vol. 6, № 4. P. 357–363.
12. Florack L., Kuijper A. The topological structure of scale-space images // Journal of Mathematical Imaging and Vision. 2000. Vol. 12, № 1. P. 65–79.
13. Milnor J. Morse theory. Princeton: Princeton University Press, 1963. 153 p.
14. Edelsbrunner H., Harer J. Computational topology: an introduction. Providence: American Mathematical Society, 2010. 241 p.
15. Cohen-Steiner D., Edelsbrunner H., Harer J. Stability of persistence diagrams // Discrete & Computational Geometry. 2007. Vol. 37, № 1. P. 103–120.
16. Chazal F., Michel B. An introduction to topological data analysis: fundamental and practical aspects for data scientists // Frontiers in Artificial Intelligence. 2021. Vol. 4. Article 667963.
17. Hensel F., Moor M., Rieck B. A survey of topological machine learning methods // Frontiers in Artificial Intelligence. 2021. Vol. 4. Article 681108.
18. Barnes D., Polanco L., Perea J.A. A comparative study of machine learning methods for persistence diagrams // Frontiers in Artificial Intelligence. 2021. Vol. 4. Article 681174.
19. Dey T.K., Wang Y. Computational topology for data analysis. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 452 p.
20. Corcoran P., Jones C.B. Topological data analysis for geographical information science using persistent homology // International Journal of Geographical Information Science. 2023. Vol. 37, № 3. P. 712–745.
21. Chung Y.M., Hu C.S., Sun E., Tseng H.C. Morphological multiparameter filtration and persistent homology in mitochondrial image analysis // PLoS ONE. 2024. Vol. 19, № 9. Article e0310157.
22. Тарасов И.Е. Математический метод определения параметров функциональных зависимостей с использованием многошкальных функций распределения вероятностей // Mathematics. 2021. Vol. 9, № 10. Article 1085.
23. Орлов А.И. Прикладная статистика: учебник. М.: Экзамен, 2006. 671 с.
24. Wilcoxon F. Individual comparisons by ranking methods // Biometrics Bulletin. 1945. Vol. 1, № 6. P. 80–83.
25. Holm S. A simple sequentially rejective multiple test procedure // Scandinavian Journal of Statistics. 1979. Vol. 6, № 2. P. 65–70.

© Тарасов Вячеслав Сергеевич (slavatarasov207@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.38

ПОДХОДЫ К ЗАЩИТЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАТАСЕТОВ В СИСТЕМАХ АНАЛИЗА ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ПРОВЕРКИ СХЕМ ДАННЫХ, ОЦЕНКИ СООТВЕТСТВИЯ И ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

APPROACHES TO THE PROTECTION OF SPATIAL DATASETS IN DATA ANALYSIS SYSTEMS BASED ON THE VERIFICATION OF DATA SCHEMAS, CONFORMITY ASSESSMENT AND DETECTION OF ABNORMAL BEHAVIOR OF OBJECTS

M. Timofeev

Summary. At present, the protection of spatial datasets in data analysis systems is associated with controlling the integrity of coordinates, attributes, spatial relationships, and data provenance before their use in analytics. The article examines approaches to the protection of spatial datasets in data analysis systems based on data schema verification, conformity assessment, and detection of anomalous object behavior. To distinguish quality errors from signs of distortion in spatial datasets, the study identifies signs related to violations of record structure, permissible values, coordinate position, object relationships, data provenance, and processing rules. The results show that the proposed protection model makes it possible to detect signs of distortion before a dataset is transferred to an analytical system, assess the risk of distortion in the analysis result, and select a protective decision in the form of admission to analysis, restricted use, repeated verification, or dataset isolation.

Keywords: protection of spatial datasets, information security, data schema, conformity assessment, signs of distortion, anomalous object behavior, data integrity, risk of result distortion.

Тимофеев Михаил Алексеевич
Независимый исследователь
timofeev.mikhail.a@gmail.com

Аннотация. В настоящее время защита пространственных датасетов в системах анализа данных связана с контролем целостности координат, атрибутов, пространственных связей и сведений о происхождении данных до их использования в аналитике. В статье раскрываются подходы к защите пространственных датасетов в системах анализа данных на основе проверки схем данных, оценки соответствия и выявления аномального поведения объектов. В целях разграничения ошибок качества и признаков искажения пространственных датасетов выделены признаки нарушения структуры записи, допустимых значений, координатного положения, связей объектов, происхождения данных и правил обработки. Результаты исследования показывают, что предложенная модель защиты позволяет выявлять признаки искажения до передачи датасета в аналитическую систему, оценивать риск искажения результата анализа и выбирать защитное решение в виде допуска к анализу, ограничения использования, повторной проверки или изоляции датасета.

Ключевые слова: защита пространственных датасетов, информационная безопасность, схема данных, оценка соответствия, признаки искажения, аномальное поведение объектов, целостность данных, риск искажения результата.

Введение

В настоящее время наблюдается устойчивый рост объёма цифровой информации, используемой в информационных системах, сервисах управления территориями, транспортной аналитике, кадастровых задачах, мониторинге инфраструктуры и оценке пространственных процессов. Так, по данным Grand View Research, мировой рынок геопространственной аналитики в 2025 г. оценивался в 102,7 млрд долл. США, прогнозная оценка на 2026 г. составляет 117,2 млрд долл. США, к 2033 г. ожидается рост до 234,0 млрд долл. США [1]. Рост рынка отражает расширение использования пространственных датасетов в информационных системах, сервисах управления территориями, транспортной аналитике, кадастровых задачах и мониторинге инфраструктуры. В данной сфере важнейшим объектом защиты выступает *пространственный датасет*. Координаты, геометрия, атрибуты, связи между объектами, сведения об обновлении и происхождении данных влияют на достоверность аналитического результата — искажение хотя бы одного элемента способно изменить пространственный запрос, карту риска, оценку доступности объекта, результат классификации территории или решение на основе данных. В частности, в корпоративных ГИС-средах защита пространственных файлов связывается с контролем хранения, доступа и шифрования [12]. В работе с координатными данными также возрастает значение проверки целостности и прослеживаемости изменений, особенно в задачах, связанных с позициони-

рованием и пространственной привязкой объектов [8]. Проблема защиты пространственных датасетов в системах анализа данных состоит в разграничении обычной ошибки качества и признака искажения данных. Ошибка качества обычно связана с пропуском, неточностью, неполной атрибуцией или расхождением источников, при этом признак искажения указывает на нарушение допустимого состояния датасета перед аналитической обработкой данных. В этом отношении проверка схем данных позволяет установить допустимый состав записи, типы значений, обязательные поля и правила пространственных связей [15]. Оценка соответствия отражает степень отклонения фактического состояния данных от заданных правил, тогда как выявление аномального поведения объектов помогает обнаружить изменения, способные повлиять на достоверность аналитического результата [3]. В связи с этим актуальность исследования определяется потребностью в подходах к защите пространственных датасетов, выявляющих признаки искажения до использования данных в аналитической системе.

Материалы и методы

Материалами исследования послужили научные работы по информационной безопасности, обнаружению аномалий, защите пространственных данных, проверке схем данных и оценке качества геопространственной информации. Исследование носит теоретико-методический характер, использованы общетеоретические методы анализа, синтеза, классификации и обобщения научной литературы, а также сопоставление признаков искажения пространственных датасетов с рисками нарушения целостности, достоверности и безопасности результата аналитики.

Результаты и их обсуждение

Целостность пространственного датасета связана с сохранением допустимого состава записей, координат, атрибутов, связей объектов, истории обновления и сведений о происхождении данных. Достоверность аналитического результата зависит от соответствия фактического состояния данных правилам обработки до запуска пространственных запросов, классификации, прогнозирования или визуализации. В задачах информационной безопасности пространственный датасет рассматривается как защищаемый информационный ресурс, состояние которого должно быть проверяемым, прослеживаемым и пригодным для контроля [11]. Кроме того, неверный тип значения, лишний атрибут, смещённая координата, нарушение связи между объектами или изменение истории обновления формируют риск ошибочной интерпретации пространственной ситуации. В задачах позиционирования и дистанционного зондирования проверка целостности связана с возможностью проследить происхождение координат, снимков, записей и операций обработки [8], [9].

Проверка схем данных и выявление аномального поведения объектов позволяют обнаружить признаки искажения датасета до аналитической обработки данных. Схема данных задаёт допустимый состав записи, типы значений, обязательные поля, домены и правила пространственных связей [15]. Аномальное поведение отражается в нетипичном изменении координат, атрибутов, частоты обновления или связей с соседними объектами [3]. В авторском понимании защита пространственных датасетов связывается с ранним выделением признаков искажения, оценкой соответствия правилам обработки и передачей в аналитическую систему проверенных данных.

Далее целесообразно разграничить дефекты качества и признаки искажения пространственного датасета. Так, ошибка качества связана с дефицитом сведений, технической неточностью или дефектом записи; признак искажения указывает на нарушение допустимого состояния данных перед аналитической обработкой. В системе защиты важны источник отклонения, изменение смысла объекта, риск для достоверности результата и возможность контроля происхождения записи [4], [11]. Классификация признаков искажения пространственных датасетов представлена в табл. 1.

Разграничение ошибок качества и признаков искажения пространственных датасетов начинается с оценки допустимого состояния записи. Ошибка качества связана с неполнотой, неточностью, расхождением тематического класса или слабой согласованностью источников — в этом случае снижается пригодность данных к анализу [14]. Признак искажения указывает на изменение структуры записи, конфликт версий, нарушение происхождения или расхождение пространственных связей, что затрагивает доверие к данным как защищаемому информационному ресурсу [11]. Поэтому простого подсчёта дефектов мало, ведь следует установить, способен ли выявленный признак изменить аналитический результат или решение на основе данных [10].

Граница между ошибкой качества и признаком искажения также проходит по влиянию отклонения на целостность датасета. Шум и выбросы в исходных данных искажают построение прогнозной модели и качество решений [5]. В системах поведенческой аналитики аномалия оценивается как отклонение текущего профиля от базового, что применимо к пространственным объектам с историей обновлений [6]. Данные разных источников формируют риск смещения координат, ошибок пропуска, добавления и разной категориальной точности [7]. В задачах дистанционного зондирования методическая проблема разграничения ошибок качества и признаков искажения пространственных датасетов усили-

Таблица 1.

Классификация признаков искажения пространственных датасетов

Признак искажения	Проявление в датасете	Риск искажения результата	Процедура проверки
Нарушение структуры записи	Лишнее поле, пропуск поля, неверный тип значения	Потеря однозначности объекта	Проверка схемы данных
Расхождение с допустимыми значениями	Значение вне домена, ошибочный код класса, спорный статус	Ошибка классификации объекта	Проверка доменов значений
Искажение координатного положения	Смещение координаты, неверная привязка, выход за допустимую область	Ошибка пространственного запроса	Проверка координат и геометрии
Отсутствие согласованных связей объектов	Нарушение соседства, пересечения, вложенности или маршрута	Искажение пространственной ситуации	Проверка пространственных связей
Аномальное поведение объекта	Резкое изменение атрибута, частоты обновления или положения	Ложный аналитический сигнал	Обнаружение аномалий
Нарушение происхождения данных	Неясный источник, конфликт версии, разрыв истории обработки	Снижение доверия к датасету	Проверка происхождения данных
Несоответствие правилам обработки	Ошибка загрузки, неверная операция, нарушение порядка проверки	Искажение итогового вывода	Оценка соответствия правилам

Источник: авторская разработка.

вается значением проверки подлинности и целостности до включения снимков в земельные и инфраструктурные решения [9]. Различия показаны ниже (табл. 2).

Авторское решение заключается в оценке схемы данных, соответствия правилам обработки и поведения объектов в единой процедуре защиты. Вначале задаётся допустимое состояние записи по схеме, доменам, источнику и истории обработки; затем выявляется отклонение, способное стать признаком искажения. Мониторинг событий информационной безопасности отражает практическую ценность машинной обработки признаков нарушения состояния данных [2]. Методология реагирования в распределённых системах подтверждает значение данных мониторинга, проверки действий и ориентированного на данные порядка анализа инцидентов [4]. В пространственных датасетах данная идея развивается

Таблица 2.

Разграничение ошибок качества и признаков искажения пространственных датасетов

Критерий	Ошибка качества	Признак искажения	Риск искажения результата
Состояние данных	Неполнота или неточность записи	Нарушение допустимого состояния датасета	Искажение вывода системы анализа
Структура записи	Пропуск поля или ошибочный формат	Изменение схемы, типа значения или состава атрибутов	Ошибка обработки объекта
Значения атрибутов	Неточный код, слабая детализация	Значение вне домена или конфликт статуса	Ошибка классификации
Пространственное положение	Смещение координаты или низкая точность	Изменение положения вне допустимой области	Ошибка пространственного запроса
Связи объектов	Неполное описание связи	Нарушение соседства, маршрута или вложенности	Искажение пространственной ситуации
История данных	Устаревшая версия записи	Разрыв происхождения или конфликт версий	Снижение доверия к датасету
Действие системы	Дополнительная проверка качества	Защитная проверка до аналитической обработки	Снижение риска недостоверного решения

Источник: авторская разработка.

за счёт оценки законности, единообразия, авторитетности и прослеживаемости данных в цепочке обработки информации [13].

Ключевое место в защите пространственного датасета занимает проверка схем данных, потому что она описывает допустимое состояние пространственного объекта до анализа. В ней закрепляются состав записи, типы значений, обязательные поля, домены, правила связи между объектами и порядок обработки. Отклонение от схемы выступает первым признаком риска, связанным с целостностью данных, достоверностью результата и сохранением смысла объекта в системе анализа [15]. Схема данных позволяет отделить техническую неточность от нарушения допустимого состояния датасета. Пропуск второстепенного атрибута может снижать качество записи, но изменение типа поля, класса объекта, координатной привязки или связи с соседними объектами способно изменить результат пространственного запроса. В системах защиты информации подобное отклонение следует рассматривать как событие контроля, которое подлежит проверке до передачи данных в аналитическую обработку [2], [4]. Авторское решение состо-

ит в том, что проверка схемы данных используется как начальный фильтр защиты пространственного датасета. Далее оценка соответствия связывает обнаруженное отклонение с риском искажения, тогда как анализ поведения объекта показывает, выходит ли запись за пределы ожидаемой истории обновлений. В работе с пространственными данными значение имеют как структура и значения, так и происхождение, версия, трасса обработки и возможность проверки источника [9]. Потенциальные показатели оценки признаков искажения пространственных датасетов представлены ниже (табл. 3).

Таблица 3.

Потенциальные показатели оценки признаков искажения пространственных датасетов

Показатель оценки	Суть показателя	Зона риска
Индекс соответствия схеме	Совпадение состава записи с заданной схемой	Целостность записи
Доля значений вне домена	Число значений за пределами допустимого диапазона	Достоверность атрибута
Уровень стабильности объекта	Сохранение координат, класса и статуса во времени	Аномальное поведение
Индекс согласованности связей	Соответствие соседства, вложенности и маршрута	Искажение связей
Уровень прослеживаемости	Наличие источника, версии и истории обработки	Доверие к датасету
Степень риска для анализа	Влияние отклонения на запрос, модель или вывод	Безопасность результата

Источник: авторская разработка.

Эффект защиты пространственного датасета следует оценивать по тому, насколько рано выявляется признак искажения и насколько уменьшается вероятность ошибочного вывода в системе анализа. После проверки схемы данных и показателей искажения основное значение приобретает связь между обнаруженным отклонением, риском для целостности данных и действием до аналитической обработки. Происхождение данных, проверка версии, контроль правил обработки и сопоставление поведения объекта с прежним состоянием позволяют оценить защиту не как формальную проверку качества, а как снижение риска недостоверного результата [10]. В системах реагирования на инциденты информационной безопасности близкая задача решается через данные мониторинга, подтверждение события и проверку выполненных действий [4]. Общие способы оценки эффекта защиты пространственных датасетов представлены ниже (табл. 4).

Взаимосвязь ранее выделенных признаков искажения, критериев их оценки и способов оценки эффекта защиты раскрыта в авторской модели защиты пространственных датасетов (рис. 1). Предлагается модель, в которой ранее выделенные признаки искажения доведены до уровня решения о допуске данных к аналитической системе. Регламент допустимого состояния данных и паспорт происхождения данных задают проверяемые границы пространственного датасета, оценка соответствия устанавливает расхождение записи со схемой и правилами обработки, обнаружение аномалий поведения объектов связывает отклонения координат, атрибутов и исторических данных с риском результата анализа. В итоговой части модели риск пространственного запроса, классификации, визуализации данных и управленческого решения соотносится с вариантом защиты датасета — допуском к анализу, ограничением использования, повторной проверкой или изоляцией.

Таблица 4.

Общие способы оценки эффекта защиты пространственных датасетов

Способ оценки	Содержание оценки	Эффект защиты
Проверка до анализа	Выявление отклонения до запроса, модели или карты	Снижение риска ошибки результата
Оценка соответствия	Сравнение записи со схемой и правилами обработки	Контроль допустимого состояния
Проверка происхождения	Проверка источника, версии и истории обработки	Рост доверия к датасету
Анализ поведения объекта	Сравнение текущего изменения с прежним состоянием	Выявление признака искажения
Оценка влияния	Связь отклонения с запросом, моделью или решением	Приоритет защитного действия

Источник: авторская разработка.

При этом важно выделить методические критерии выбора процедур защиты, которые определяются типом пространственного объекта, значимостью атрибутов, границами допустимых значений и частотой обновления. Объект с высокой ролью координат соотносится с проверкой геометрии и пространственных связей; запись с ценными тематическими атрибутами — с контролем доменов и схемы данных [15].

Оценка качества пространственных данных в системах анализа ориентирована на полноту, позиционную точность, тематическую точность и согласованность, что позволяет соотнести вид объекта с процедурой защиты [14]. Выбор процедур проверки зависит от уровня угрозы целостности данных и от того, какой результат анализа способен исказить выявленный признак. Запись с редким изменением координат или атрибутов сначала сопоставляется с историческими данными и штатным поведением объекта [3]. В задачах поведенческой аналитики важны базовый и текущий профили, что делает

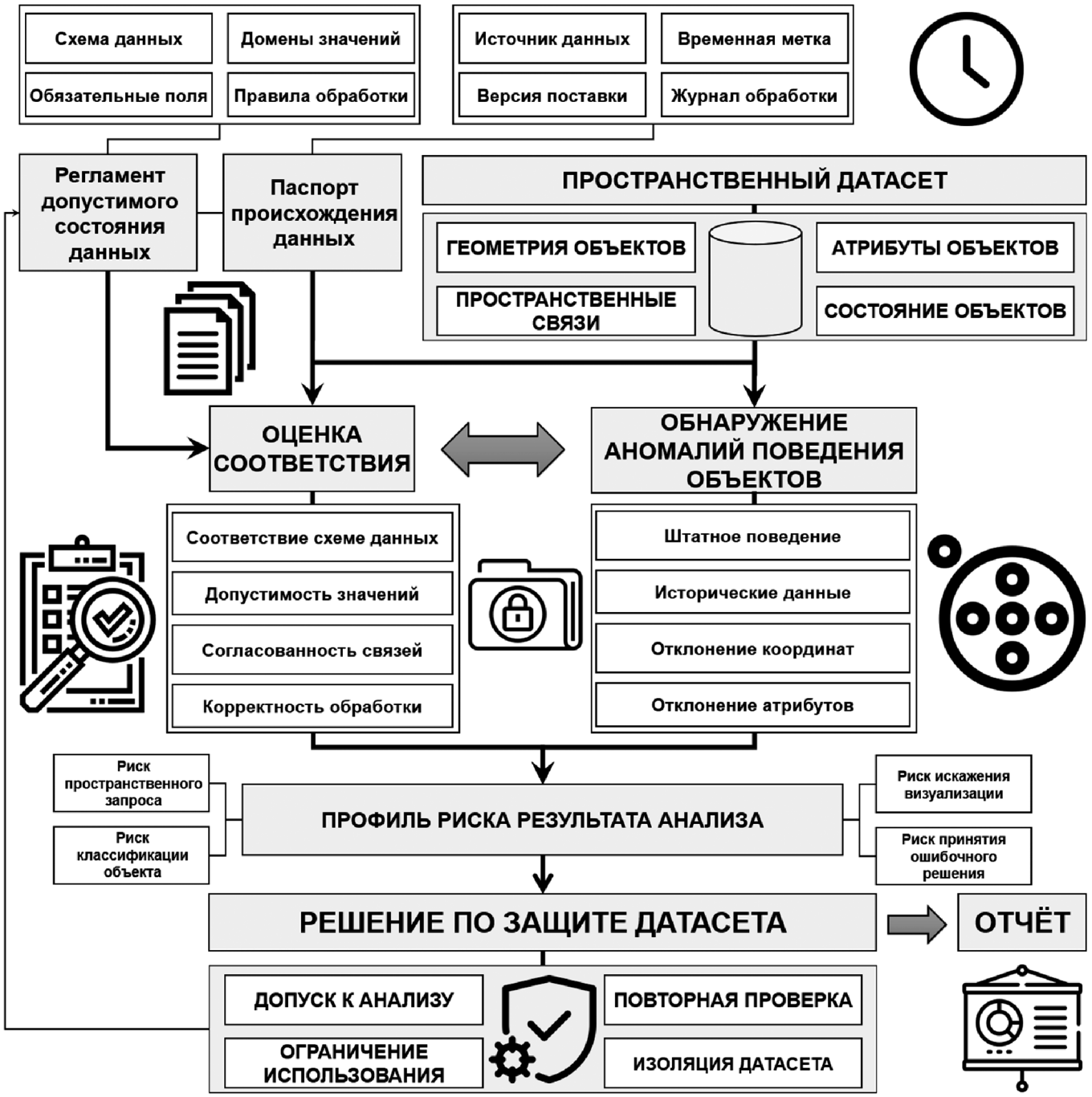


Рис. 1. Модель защиты пространственных датасетов в системах анализа данных

Источник: авторская разработка.

частоту обновления и динамику признаков самостоятельными критериями выбора защиты [6]. Угроза нарушения происхождения или порядка обработки данных обосновывает проверку версии, журнала обработки и отчёта о защитном решении [4], [13].

Связь между уровнем угрозы, процедурой защиты и решением по датасету представлена ниже (табл. 5).

Теоретическое значение подходов к защите пространственных датасетов состоит в том, что пространственные данные рассматриваются как объект информационной безопасности до начала анализа. Проверка схем данных, оценка соответствия и обнаружение аномального поведения помогают заранее выделить признаки искажения, которые способны изменить пространственный запрос, классификацию объекта, карту риска или вывод системы анализа. Проверка схемы данных задаёт границы допустимого состояния записи (состав полей, типы значений, домены, связи объектов и порядок обработки). Оценка соответствия показывает, насколько фактическое состо-

Таблица 5.
Выбор процедур защиты пространственных датасетов по уровню угрозы

Основание выбора	Уровень угрозы	Процедура защиты	Решение по датасету
Высокая роль координат	Искажение положения объекта	Проверка геометрии и связей	Допуск после подтверждения положения
Значимый класс объекта	Ошибка статуса или категории	Контроль доменов и схемы	Ограничение анализа спорных полей
Частое обновление записи	Нетипичная динамика объекта	Сравнение с историческими данными	Повторная проверка события
Спорное происхождение	Конфликт версии или источника	Проверка версии и журнала обработки	Изоляция спорной поставки
Высокая цена решения	Риск искажения вывода	Оценка влияния на результат	Приоритет защитного действия

Источник: авторская разработка.

яние датасета совпадает с указанными границами. Обнаружение аномального поведения расширяет проверку схемы за счёт оценки координат, атрибутов и частоты обновления относительно штатного состояния объекта. В рамках информационной безопасности ценность предложенных подходов связана с ранним снижением риска искажения пространственной аналитики. Система анализа должна работать с датасетом, по которому заранее понятны источник, допустимость значений, состояние связей и уровень риска для результата, что усиливает доверие к данным и помогает выбрать защитное решение до включения датасета в аналитическую обработку.

Заключение

Защита пространственных датасетов занимает важное место в информационной безопасности систем анализа данных. Целостность координат, атрибутов, связей объектов и сведений о происхождении определяет достоверность пространственной аналитики, результат пространственного запроса, оценку риска и выбор решения на основе данных. Ценность разработанного подхода связана с ранним выявлением признаков искажения, оценкой соответствия правилам обработки и разграничением дефектов качества и нарушений допустимого состояния датасета. В работе предложена модель защиты пространственных датасетов с проверкой схем данных, контролем происхождения, обнаружением аномального поведения объектов и оценкой риска искажения результата анализа. Предложенные критерии выбора процедур защиты могут использоваться до передачи датасета в аналитическую систему, что снижает вероятность ошибочных выводов и решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Geospatial Analytics Market & Share Report (2026-2033) // Grand View Research. — URL: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/geospatial-analytics-market (дата обращения: 24.06.2026).
2. Девицына С.Н., Пилькевич П.В. Обеспечение совместимости технических компонентов при создании системы мониторинга инцидентов информационной безопасности // Вопросы кибербезопасности. — 2024. — № 4 (62). — С. 38–44.
3. Замятин А.В., Мурзагулов Д.А. Обнаружение аномалий в технологических данных: алгоритмы, программы, системы. — Томск: Издательство Томского государственного университета, 2024. — 164 с.
4. Кузнецов А.В. Методология реагирования на инциденты информационной безопасности в распределенных автоматизированных информационных системах // Вопросы кибербезопасности. — 2025. — № 4 (68). — С. 65–72.
5. Кузовлев В.И., Орлов А.О. Выявление аномалий при прогнозном анализе данных // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. — 2016. — № 5 (110). — С. 75–85.
6. Нашивочников Н.В., Меженева И.О., Чатоян С.К. Выбор параметров вложения временных рядов для выявления аномалий данных в системах поведенческой аналитики // Вопросы кибербезопасности. — 2025. — № 2 (66). — С. 20–28.
7. Foody G., Long G., Schultz M., Olteanu-Raimond A.-M. Assuring the Quality of VGI on Land Use and Land Cover: Experiences and Learnings from the LandSense Project // Geo-spatial Information Science. — 2024. — Vol. 27. — No. 1. — P. 16–37.
8. Lee S., Seok H.W., Lee K.-r., In H.P. B-GPS: Blockchain-Based Global Positioning System for Improved Data Integrity and Reliability // ISPRS International Journal of Geo-Information. — 2022. — Vol. 11. — No. 3. — P. 1–18.
9. Liu Y., Chang Y. Blockchain-Based Method for Spatial Retrieval and Verification of Remote Sensing Images // Sensors. — 2024. — Vol. 24. — No. 7. — P. 1–15.
10. Podobnikar T. Bridging Perceived and Actual Data Quality: Automating the Framework for Governance Reliability // Geosciences. — 2025. — Vol. 15. — No. 4. — P. 1–24.
11. Sadiq M.A., Langat P.K., Neupane A. Enterprise Spatial Data Provenance Knowledge Infrastructure // ISPRS International Journal of Geo-Information. — 2026. — Vol. 15. — No. 5. — P. 1–28.
12. Sharma P., Govorov M., Martin M. A Usable Encryption Solution for File-Based Geospatial Data within a Database File System // Journal of Cybersecurity and Privacy. — 2024. — Vol. 4. — No. 2. — P. 298–323.
13. Tang M., Dai W., Yin C., Hu B., Chen J., Liu H. Spatial Planning Data Structure Based on Blockchain Technology // ISPRS International Journal of Geo-Information. — 2024. — Vol. 13. — No. 8. — P. 1–16.
14. Yeow L.W., Low R., Tan Y.X., Cheah L. Point-of-Interest (POI) Data Validation Methods: An Urban Case Study // ISPRS International Journal of Geo-Information. — 2021. — Vol. 10. — No. 11. — P. 1–27.
15. Yılmaz C., Cömert Ç., Yıldırım D. Ontology-Based Spatial Data Quality Assessment Framework // Applied Sciences. — 2024. — Vol. 14. — No. 21. — P. 1–28.

© Тимофеев Михаил Алексеевич (timofeev.mikhail.a@gmail.com)

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.40

ПОДХОДЫ К ЗАЩИТЕ ВЕБ-СЕРВИСОВ ОТ ОШИБОК АВТОРИЗАЦИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЗАПРОСОВ ВНЕШНИХ СИСТЕМ

APPROACHES TO PROTECTING WEB SERVICES FROM AUTHORIZATION ERRORS WHEN PROCESSING REQUESTS FROM EXTERNAL SYSTEMS

A. Fedoseev

Summary. The article substantiates approaches to protecting web services from authorization errors when processing requests from external systems from the perspective of information security in contemporary companies. The study draws on publications on application programming interface security, the results of an expert survey involving seven specialists, and examples from the author's professional practice; the methods employed include analysis, comparison, and generalisation. The findings indicate that the principal source of risk is the absence of a separate verification of access rights to a specific object. The proposed generalised model for protecting web services from authorization errors in the processing of requests from external systems integrates information about the request source, the permissions of the external system, object ownership, operation admissibility, and record status. Specialists compare these elements before processing a request to reduce the likelihood of unauthorised modification of protected data.

Keywords: web services, authorization errors, external systems, access control, data protection, expert survey, access rights.

Федосеев Андрей Дмитриевич
Серверный разработчик, ООО «Skillbox», г. Москва
skybleak333@gmail.com

Аннотация. В статье обоснованы подходы к защите веб-сервисов от ошибок авторизации при обработке запросов внешних систем с позиции информационной безопасности современных компаний. В качестве материалов использованы публикации по безопасности программных интерфейсов, результаты экспертного опроса семи специалистов и примеры практики автора; применены анализ, сопоставление и обобщение. По результатам установлено, что основная причина риска связана с отсутствием отдельной проверки права на конкретный объект. В предложенной обобщённой модели защиты веб-сервисов от ошибок авторизации при обработке запросов внешних систем объединены сведения об источнике запроса, полномочиях внешней системы, принадлежности объекта, допустимости операции и состоянии записи, которые специалисты сопоставляют перед обработкой для снижения вероятности ошибочного изменения защищаемых данных.

Ключевые слова: веб-сервисы, ошибки авторизации, внешние системы, контроль доступа, защита данных, экспертный опрос, права доступа.

Введение

Современные веб-сервисы обрабатывают запросы платёжных платформ, учётных систем, партнёрских приложений и отдельных микросервисов, поэтому число внешних участников и доступных операций постоянно возрастает. Каждый запрос содержит сведения об источнике, объекте обращения и требуемом действии, причём корректный формат сообщения подтверждает только соблюдение правил передачи данных [1]. Подмена идентификатора записи или обращение к чужому объекту сохраняют техническую корректность запроса и вместе с тем формируют угрозу раскрытия, изменения или удаления защищаемых сведений [9]. Подобного рода нарушения относятся к числу наиболее опасных уязвимостей программных интерфейсов передачи репрезентативного состояния (REST — representational state transfer), поскольку сервер способен принять запрос от прошедшего проверку участника при отсутствии отдельного контроля права на конкретный объект [8]. Нарушение авторизации на уровне объекта (broken object-level authorization) позволяет выполнять операции с записями, доступ к которым отсутствует у инициатора запроса [7].

При установлении подлинности веб-сервис подтверждает источник запроса, проверяет идентификационные данные, токен или цифровое удостоверение. Авторизация решает иную задачу — веб-сервис сопоставляет роль внешней системы с объектом обращения, видом операции и текущим состоянием записи. Успешная проверка токена подтверждает подлинность участника обмена. Возможность чтения, изменения, отмены или удаления конкретной записи веб-сервис определяет отдельно с учётом роли внешней системы и состояния объекта. В микросервисной архитектуре контроль проводится при каждом обращении между компонентами, так как доверие к внутреннему расположению сервиса

повышает риск использования избыточных полномочий [4]. Продолжающаяся проверка прав особенно значима при изменении роли участника, отзыве доступа или завершении допустимого периода использования данных [5].

Научная проблема состоит в расхождении между корректностью передачи внешнего запроса и допустимостью предусмотренного в нём действия. Соответствие запросов формату программного интерфейса, подлинность токена и успешное прохождение сетевой проверки оставляют открытым вопрос о праве внешней системы воздействовать на выбранную запись. Веб-сервис последовательно сопоставляет источник запроса, идентификатор объекта, роль участника, содержание операции и состояние данных. Формальная проверка правил доступа подтверждает, что разрешённая последовательность действий сохраняет установленные ограничения для каждого объекта и каждой функции [10]. Цель настоящего исследования, таким образом, состоит в обосновании подходов к защите веб-сервисов от ошибок авторизации при обработке запросов внешних систем.

Материалы и методы

Материалы исследования представлены научными публикациями по безопасности программных интерфейсов, контролю доступа и авторизации внешних запросов, ответами семи экспертов, участвующих в разработке, интеграции и сопровождении веб-сервисов, а также примерами из профессиональной авторской практики. Ответы респондентов распределялись по смысловым категориям, после чего рассчитывались частота выбора вариантов и их доля в общем числе ответов, что позволило соотнести выявленные причины с элементами обобщённой модели защиты веб-сервисов.

Результаты и их обсуждение

Обработка внешних запросов включает в себя два самостоятельных этапа: установление подлинности участника обмена и оценку его полномочий. Веб-сервис проверяет подпись токена, срок его действия, издателя и назначение для того, чтобы установить достоверность удостоверяющих сведений. Право на выполнение операции определяется по области действия токена, составу разрешений и правилам, закреплённым за участником информационного обмена [4].

Контроль доступа на уровне объекта (object-level authorization) применяется при обращении к отдельной записи внутри разрешённой функции. Веб-сервис сопоставляет идентификатор ресурса с владельцем, областью доступа и связью объекта с внешней системой. Отсутствие такого сопоставления формирует риск нарушения авторизации на уровне объекта (BOLA — broken object-level authorization), в рамках которой участник изменяет идентификатор в корректном запросе и обращается к принадлежащей другому субъекту записи [7].

Защита данных также зависит от актуальности полномочий в момент выполнения операции. Разработчики закрепляют в политике доступа допустимые сочетания роли, ресурса и действия, тогда как программные средства контроля проверяют соответствие фактического обращения установленным разрешениям. Формальная сверка политики с доступными маршрутами помогает обнаруживать скрытые переходы к защищаемым функциям и объектам [10]. В правилах обмена между системами каждой внешней системе назначается собственная область данных — заказы партнёра, счета клиента, заявки подразделения или записи, созданные через определённый канал. Идентификатор объекта обозначает запись; сведения о её принадлежности содержатся в правилах доступа. Следует отметить, что при проверке только значения идентификатора внешняя система способна подставить ссылку на иной объект [7]. Даже в пределах разрешённой группы записей состав операций зависит от роли внешней системы и предоставленных ей полномочий. Один участник вправе просматривать сведения, другой — изменять отдельные поля, третий — подтверждать или отменять действие. Ошибка возникает при автоматическом распространении доступа к объекту на все предусмотренные с ним операции [6]. Допустимость действия меняется вместе с состоянием записи. Внешняя система направляет запрос на отмену до завершения операции. Повторно поступившее сообщение веб-сервис сопоставляет с текущим статусом записи и итогом предшествующей обработки. В момент обработки веб-сервис учитывает текущую роль внешней системы, статус записи и итог предшествующей операции. При отзыве полномочий или, например, смене статуса ранее допустимый запрос утрачивает основание для выполнения [5]. Всё это обусловливает необходимость объединить проверку источника запроса, права на объект, допустимости операции и состояния записи в единую модель, представленную ниже (рис. 1).

На схеме показано, как веб-сервис сопоставляет сведения об отправителе с характеристиками записи и содержанием запрошенного действия. Решение принимается по совокупности условий, поэтому одного действительного токена недостаточно — учитываются полномочия внешней системы, принадлежность объекта, его текущее состояние и допустимый вид операции. Результат проверки определяет дальнейшую обработку запроса, в то время как в рамках уточнения правил доступа используются сведения об отказах.

В целях апробации разработанной модели защиты веб-сервисов от ошибок авторизации при обработке запросов внешних систем в рамках авторской профессиональной деятельности как эксперта в области про-

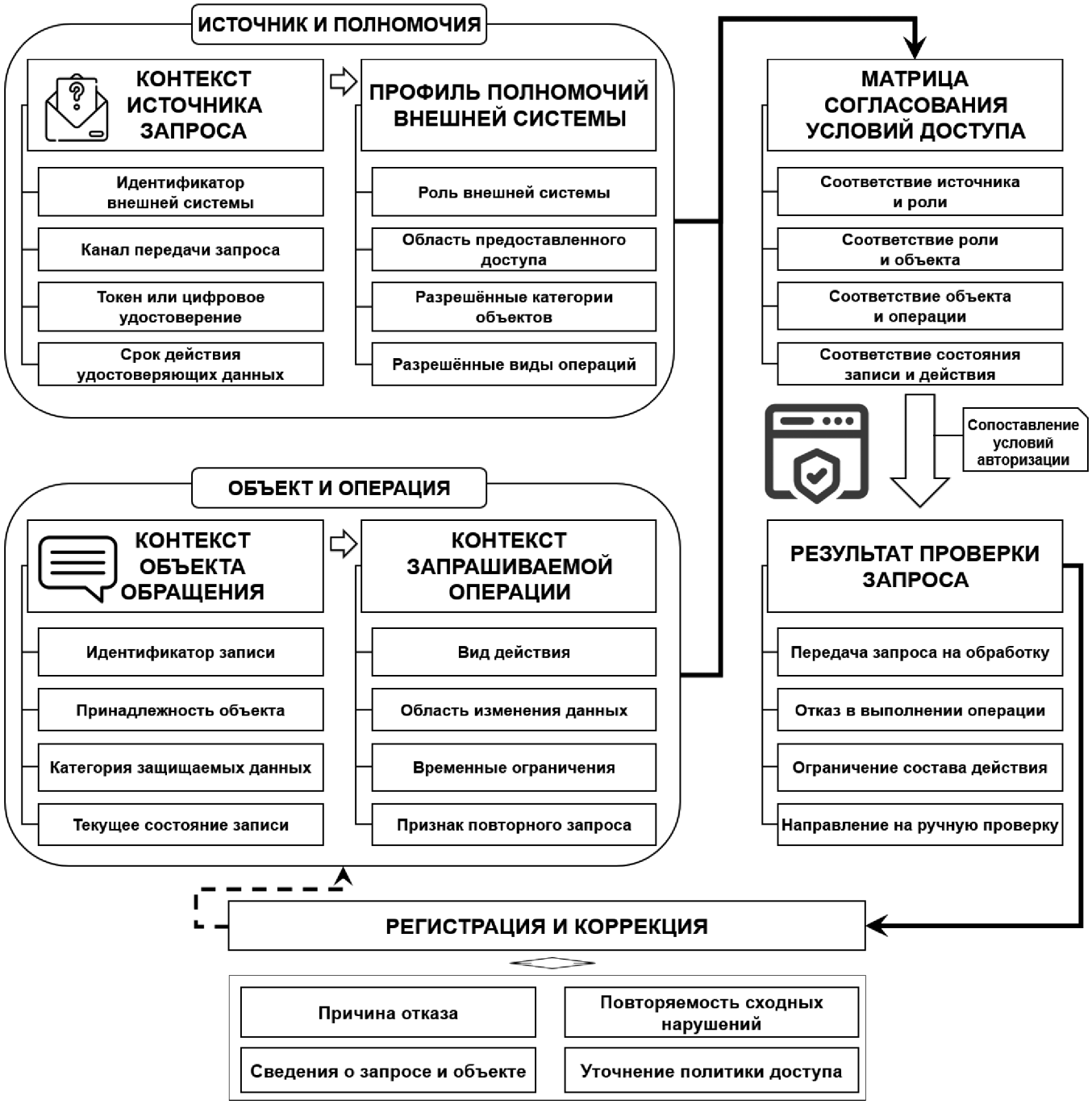


Рис. 1. Обобщённая модель защиты веб-сервисов от ошибок авторизации при обработке запросов внешних систем
Источник: авторская разработка

ектирования, разработки и развития веб-сервисов был проведён экспертный опрос специалистов, участвующих в разработке, проверке и сопровождении веб-сервисов. К участию в опросе привлекались респонденты с практическим опытом интеграции внешних систем, обработки запросов и контроля доступа к данным (табл. 1).

В выборку вошли семь специалистов, чья профессиональная деятельность охватывает разработку серверной части веб-сервисов, проектирование программных решений, интеграцию внешних систем, автоматизацию испытаний, сопровождение инфраструктуры и защиту информации. Такой состав позволил сопоставить оценки участников, работающих с запросами внешних систем на разных этапах жизненного цикла веб-сервиса. Стаж респондентов и опыт проверки программного кода обеспечили предметную обоснованность ответов.

Предметом оценки стали причины ошибок авторизации, возникающих при обращении внешней системы

к конкретному объекту и выполнении операций с изменяемым состоянием записи. Ответы собирались индивидуально посредством электронной анкеты. Каждый участник заполнял её самостоятельно. Единая формулировка вопросов и одинаковая последовательность блоков снижали влияние различий в порядке предъявления материала. Респондентам предлагалось опираться на собственный опыт разработки, интеграции и сопровождения веб-сервисов. Следует отметить, что более подробная информация об экспертах не раскрывается в силу конфиденциальности личных данных.

Таблица 1.

Профессиональные характеристики участников экспертного опроса

№	Должность	Общий стаж работы, лет	Участие в разработке веб-сервисов, лет	Опыт интеграции внешних систем, лет	Опыт проверки программного кода, лет
1	Руководитель команды серверной разработки	11	9	8	7
2	Ведущий разработчик серверной части веб-сервисов	9	8	6	7
3	Архитектор программных решений	13	11	10	8
4	Инженер инфраструктуры и автоматизации разработки	10	7	8	5
5	Специалист по информационной безопасности	8	5	6	4
6	Инженер по автоматизации испытаний	7	6	5	4
7	Системный аналитик по интеграции веб-сервисов	9	7	8	3

Источник: авторская разработка.

Цель экспертного опроса состояла в определении наиболее распространённых источников ошибок авторизации и оценке применимости предложенных подходов к их предотвращению. Для этого были предложены

Таблица 2.

Структура анкеты экспертного опроса

№	Блок	Вопрос
1	Виды внешних запросов	Запросы каких внешних систем чаще всего поступают в сопровождаемые вами веб-сервисы?
2		Какие операции чаще всего выполняются по запросам внешних систем (чтение, создание, изменение, подтверждение, отмена или удаление записи)?
3		Какие виды запросов связаны с наибольшим риском нарушения установленных прав доступа?
4		Как часто внешние системы повторно направляют ранее переданный запрос?
5	Ошибки авторизации	Какая причина ошибок авторизации встречается наиболее часто: отсутствие отдельной проверки права на объект, недостаточная проверка роли внешней системы, повторная отправка запроса или изменение состояния записи до момента обработки?
6		На каком этапе обработки внешнего запроса чаще всего выявляется ошибка авторизации?
7		Как часто корректный по структуре запрос содержит обращение к объекту, доступ к которому ограничен?
8		Как часто право на одну операцию ошибочно распространяется на другие действия с той же записью?
9	Способы проверки прав доступа	Какие сведения используются при проверке полномочий внешней системы?
10		Применяется ли отдельное сопоставление идентификатора объекта с областью доступа внешней системы?
11		Проверяется ли текущее состояние записи перед выполнением запрошенного действия?
12		Насколько применима последовательная проверка источника запроса, права на объект, роли внешней системы и состояния записи в действующей процедуре обработки запросов?
13	Последствия ошибочной обработки запроса	Какие последствия ошибок авторизации наиболее значимы для веб-сервиса?
14		Как часто повторная обработка запроса приводит к дублированию операции или повторному изменению данных?
15		Как изменение состояния записи между отправкой и обработкой запроса влияет на безопасность выполнения операции?
16		Насколько регистрация отказов помогает выявлять причины ошибок авторизации и уточнять правила доступа?

Источник: авторская разработка.

16 вопросов (табл. 2). Эксперты рассматривали ситуации, связанные с проверкой источника запроса, принадлежности объекта, роли внешней системы, допустимости действия и состояния записи.

Обработка результатов опроса включала в себя следующие операции: кодирование ответов, подсчёт частоты выбора каждого варианта и расчёт долей по основным причинам ошибок авторизации. Развёрнутые ответы группировались по сходству содержания и соотносились с элементами обобщённой модели защиты веб-сервисов. Границы применимости выводов определяются экспертным характером выборки, её небольшим объёмом и предметной направленностью на веб-сервисы, взаимодействующие с внешними информационными системами. Прикладная значимость предложенных подходов оценивалась по возможности включения отдельных проверок в действующую процедуру обработки внешних запросов, ясности условий отказа и пригодности результатов контроля для последующего разбора ошибок. Полученные данные использовались в рамках установления преобладающих причин нарушений и уточнения содержания авторской модели. Экспертный опрос проводился весной 2026 г.

Результаты экспертного опроса о причинах ошибок авторизации представлены ниже (табл. 3).

По результатам экспертного опроса установлено, что основная зона риска связана с разграничением доступа к конкретному объекту и установлением допустимого состава действий внешней системы. Три эксперта указали отсутствие отдельной проверки права на объект, ещё два участника выделили недостаточную проверку роли внешней системы — совокупная доля этих ответов составила 71,5 %. Данное соотношение отражает системный характер ошибок, возникающих при формально корректной обработке запроса — веб-сервис распознаёт отправителя и принимает сообщение, однако сведения о принадлежности записи и пределах полномочий остаются без самостоятельного сопоставления. Иными словами, респонденты связали основной риск с уровнем прикладной логики, в рамках которой идентификатор объекта, роль участника и вид операции должны рассматриваться совместно. Ответы, посвящённые повторной отправке запроса и изменению состояния записи, составили 28,6 % и раскрыли временную сторону авторизации: допустимость действия зависит от итогов предшествующей обработки и актуального статуса объекта.

Таблица 3.

Результаты экспертного опроса о причинах ошибок авторизации

Причина ошибки авторизации	Доля ответов, %	Оценка значимости	Элемент обобщённой модели защиты
Отсутствие отдельной проверки права на конкретный объект	42,9	Высокая	Сопоставление объекта с областью доступа внешней системы
Недостаточная проверка роли внешней системы	28,6	Высокая	Сопоставление роли с разрешённым видом операции
Повторная отправка ранее обработанного запроса	14,3	Средняя	Проверка сведений о предшествующей обработке
Выполнение действия при изменившемся состоянии записи	14,3	Средняя	Сопоставление операции с текущим состоянием объекта
Итого	100,0	—	—

Источник: авторская разработка.

В совокупности выявленные причины охватывают две группы условий — постоянные правила доступа и изменяющийся контекст выполнения операции. Предложенная обобщённая модель учитывает обе группы посредством матрицы согласования, в которой источник запроса, полномочия внешней системы, характеристики объекта и содержание действия сопоставляются до передачи сообщения на обработку. Руководитель и специалисты по результатам зарегистрированных отказов выявляют повторяющиеся нарушения и уточняют правила доступа. Эксперты чаще всего связывали риск с ошибками при сопоставлении внешней системы, конкретной записи и разрешённой операции, поэтому предложенная модель соответствует выявленным условиям практики.

Кроме того, экспертами была дана оценка применимости авторской обобщённой модели защиты веб-сервисов (рис. 2).

Более половины экспертов (57,1 %) признали модель полностью применимой, ещё два специалиста (28,6 %) допустили её использование при частичной адаптации и лишь один участник опроса связал внедрение обобщённой модели защиты веб-сервисов с существенной доработкой. Однако ответ об ограниченной применимости модели никто не отметил. Большинство респондентов таким образом оценило предложенный порядок проверок как соответствующий практике разработки веб-сервисов, с возможным уточнением отдельных условий доступа с учётом архитектуры проекта и полномочий внешних систем.

Эксперты чаще всего связывали ошибки авторизации с ситуацией, когда веб-сервис распознаёт внешнюю систему и проверяет общий доступ к функции, однако полномочия на конкретную запись и выбранную операцию остаются без учёта отдельного сопоставления. В обоб-

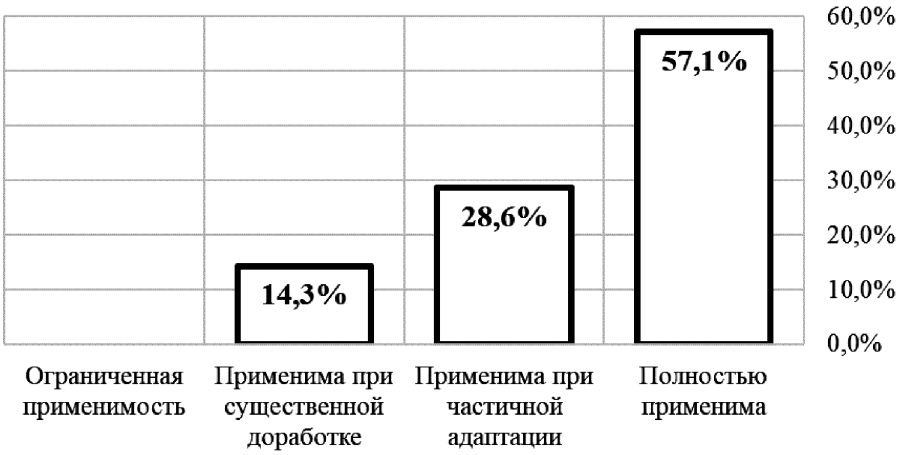


Рис. 2. Оценка экспертами применимости авторской обобщённой модели защиты веб-сервисов
Источник: авторская разработка.

щённой модели данный риск был учтён за счёт матрицы согласования условий доступа, в которой сведения об источнике, роли, объекте и действии рассматриваются совместным образом.

В профессиональной авторской практике в области проектирования, разработки и развития веб-сервисов можно выделить три ситуации применения предложенной модели защиты от ошибок авторизации:

— В первом примере внешняя платёжная система повторно направила запрос вследствие задержки ответа веб-сервиса. Поэтому было проведено сопоставление идентификатора запроса, сведений журнала и текущего состояния записи, затем была закреплена отдельная проверка ранее выполненного действия. Повторное сообщение завершалось возвратом зарегистрированного результата, что исключало вторичное изменение данных.
— Во втором примере партнёрская система передавала корректный токен и обращалась к существующей записи, принадлежавшей другому участнику обмена. Поэтому проверка полномочий была разделена на два этапа: определение разрешённой операции и сопоставление идентификатора записи с областью доступа внешней системы. Запросы к объектам другого участника завершались отказом и записью причины в журнал событий.
— В ещё одном примере внешняя система направила запрос на отмену операции, статус которой уже изменился в ходе внутренней обработки веб-сервиса. Для решения данной проблемы состояние записи было включено в состав условий авторизации и правила доступа были разграничены по стадиям обработки. Веб-сервис разрешал операцию только при совпадении роли, объекта, вида действия и актуального статуса записи.

Практическое применение предложенных подходов состоит в том, что разработчики включают проверки в процедуру обработки внешнего запроса поэтапно: подтверждают источник, сопоставляют объект с областью доступа внешней системы, проверяют роль и состояние записи. При расхождении условий веб-сервис прекращает операцию и записывает идентификатор запроса, причину отказа, сведения об объекте и его статус. Специалисты используют накопленные записи при разборе повторяющихся ошибок и уточнении правил доступа.

Заключение

В статье обоснован комплексный подход к защите веб-сервисов от ошибок авторизации при обработке запросов внешних систем. В ходе теоретического анализа разграничены установление подлинности отправителя и проверка его полномочий на конкретную запись и операцию, что позволило разработать обобщённую модель защиты веб-сервисов от ошибок авторизации при обработке запросов внешних систем. Согласно результатам экспертного опроса основная зона риска приходится на отсутствие отдельной проверки права на объект и недостаточный контроль роли внешней системы, в то время как авторская модель оценивается как применимая для реализации в системах защиты информации. Авторский деловой вклад в развитие отрасли разработки программного обеспечения заключается в разработке и апробации порядка проверки полномочий внешних систем, который команды веб-разработки применяют для предотвращения ошибочных операций с защищаемыми записями и уточнения правил доступа по сведениям об отказах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровков В.Е., Ключарёв П.Г. Методы защиты веб-приложений от злоумышленников // Вопросы кибербезопасности. — 2023. — № 5 (57). — С. 89–99.
2. Дергачев А.М. и др. Технологии веб-сервисов. — СПб: Университет ИТМО, 2021. — 100 с.
3. Рындин А.А. Современные стандарты информационного взаимодействия систем: учеб. пособие / А.А. Рындин, Э.Р. Саргсян; ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». — Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. — 144 с.
4. Aldea C.L., Bocu R. Authentication Challenges and Solutions in Microservice Architectures // Applied Sciences. — 2025. — Vol. 15. — No. 22. — P. 1–23.
5. Dixit A. et al. A privacy-aware authentication and usage-controlled access protocol for IIoT decentralized data marketplace // Computers & Security. — 2024. — Vol. 146. — P. 1–13.
6. Modesti P. et al. Security analysis of the open banking account and transaction API protocol // Cyber Security and Applications. — 2025. — Vol. 3. — P. 1–31.
7. Santos Filho A., Rodríguez R.J., Feitosa E.L. Automated broken object-level authorization attack detection in REST APIs through OpenAPI to colored Petri nets transformation // International Journal of Information Security. — 2025. — Vol. 24. — No. 2. — P. 1–19.
8. Tanveer F. et al. Towards Secure APIs: A Survey on RESTful API Vulnerability Detection // Computers, Materials & Continua. — 2025. — Vol. 84. — No. 3. — P. 4223–4257.
9. Vehent J. Securing DevOps: Security in the Cloud. — Shelter Island: Manning Publications, 2018. — 384.
10. Zhang T. et al. VeriFlow: A Framework for the Static Verification of Web Application Access Control via Policy-Graph Consistency // Electronics. — 2025. — Vol. 14. — No. 18. — P. 1–25.

© Федосеев Андрей Дмитриевич (skybleak333@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.41

НЕЧЕТКАЯ МАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ МЕТОДА НЕЧЕТКОГО АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ В ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И РИСКОВ ТЕХНОЛОГИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА

FUZZY MARKOV MODEL BASED ON THE FUZZY ANALYTIC HIERARCHY PROCESS FOR EVALUATING THE EFFICIENCY AND RISKS OF HYDRAULIC FRACTURING TECHNOLOGIES

Fetaroni Malak
Yu. Stepin

Summary. This paper presents a systemic approach to multi-criteria efficiency and risk evaluation of hydraulic fracturing technologies for oil and gas production stimulation under conditions of data uncertainty and incompleteness. The proposed framework solves this problem by assessing the efficiency level of different fracturing techniques through a fuzzy analytic hierarchy process (F-AHP) that explicitly incorporates operational uncertainties and risks via a structured set of criteria. The evaluation model is formulated and analyzed as a homogeneous, discrete-time fuzzy Markov chain with discrete states, where all input parameters are represented as LL type fuzzy numbers embedded with their respective uncertainty intervals. The decision problem is subsequently solved under the steady-state conditions of the fuzzy Markov chain. Furthermore, a concise fuzzy expert elicitation procedure is proposed to estimate transition probabilities within the fuzzy matrix using LL-type numbers, coupled with a defuzzification protocol of the final vectors to yield crisp values essential for robust engineering and project decision-making.

Keywords: hydraulic fracturing technologies (HF), fuzzy analytic hierarchy process (F-AHP), fuzzy Markov chain, LL-type fuzzy numbers, efficiency and risk evaluation, uncertainty of input information (or data), multi-criteria decision-making (MCDM), fuzzy expert elicitation procedure.

Фетарони Малак
Аспирант, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, г. Москва
malakfie2@gmail.com
Стёпин Юрий Петрович
Доктор технических наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, г. Москва
stepin.y@gubkin.ru

Аннотация. Статья посвящена системному решению задач многокритериальной оценки эффективности и рисков технологий гидравлического разрыва пласта (ГРП) для интенсификации добычи нефти и газа в условиях неопределенности и неполноты исходных данных. Решение этой проблемы на основе многокритериальной оценки уровня эффективности технологий ГРП и применения метода нечеткого анализа иерархий (Н-МАИ), учитывающего неопределенности и риски процессов через соответствующие показатели (критерии), сводится к построению и исследованию однородной нечеткой марковской цепи с дискретными состояниями и дискретным временем, где все входящие величины представляют собой нечеткие числа типа LL с собственными интервалами нечеткости. Задача решается в стационарном режиме работы нечеткой цепи Маркова. Предлагается нечеткая компактная экспертная процедура оценки переходных вероятностей нечеткой матрицы переходов на основе нечетких чисел типа LL а также процедура дефаззификации итоговых результатов для получения четких оценок, необходимых при принятии проектных решений.

Ключевые слова: технологии гидравлического разрыва пласта (ГРП), метод нечеткого анализа иерархий (Н-МАИ), нечеткая цепь Маркова, нечеткие числа типа LL, оценка эффективности и рисков, неопределенность исходной информации (или данных), многокритериальность, нечеткая экспертная процедура.

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) является базовой технологией интенсификации притока углеводородов и освоения трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) [1]. В современной практике нефтегазовой отрасли применяется широкий спектр технологических решений ГРП, включая традиционный (одностадийный) ГРП, многостадийный ГРП (МСГРП) и глубокий ГРП (ГГРП) [2]. Выбор оптимальной технологии представляет собой сложную многокритериальную задачу, требующую одновременной оценки технологической эффективности и сопутствующих рисков (экологических, социальных и экономических). Традиционные подходы, такие как классический метод анализа иерархий (МАИ) и однородные цепи Маркова, используемые в базовых исследованиях [3,4,5], ограничены применением четких, однозначных числовых данных. В условиях неопределенности исходной геолого-промысловой информации, а также субъективности экспертных оценок, данные модели могут приводить к неточным прогнозам.

В связи с этим одним из современных подходов к решению задачи многокритериальной оценки эффективности и рисков технологий ГРП в условиях неопределенности и неполноты исходных данных является предложенный и подробно описанный в [6,7] метод Н-МАИ. Тем не менее данный метод обладает рядом

существенных недостатков, суть которых заключается в следующем: 1. Сама анализируемая иерархическая структура не имеет четкой методологии построения, выбора или определения, а также оценки значимости составляющих ее элементов; 2. При реализации метода формируется большое количество нечетких матриц парных сравнений, требующих применения комплекса вычислительных процедур дефаззификации для получения соответствующих матриц весовых коэффициентов; 3. Другой важной группой проблем Н-МАИ является строгое теоретическое обоснование и совершенствование самой схемы вычислений (громоздкости и трудоемкости общей схемы вычислений), обусловленные тем, что модель нечеткого анализа иерархий представляет собой частную форму случайного процесса — нечеткую цепь Маркова. Из этого следует, что правильнее было бы называть его нечетким марковским методом принятия решений. Этот факт имеет не только сугубо теоретическое, но и практическое значение, поскольку позволяет применить к нечеткому анализу иерархий выверенный и мощный аппарат исследования, известный в теории цепей Маркова [5, 8, 9]. В настоящей статье авторами рассматриваются нечеткие модели, позволяющие решить эти проблемы.

Постановка и модели решения задач

В работах авторов [3,4,7] были рассмотрены модели, позволяющие обосновать выбор набора критериев и сформировать иерархическую структуру для оценки эффективности и рисков технологий гидравлического разрыва пласта (ГРП), а также вычислительная процедура Н-МАИ) [6,7]. Кратко представим этот метод для сравнения его с предлагаемой интегрированной нечетко-марковской моделью.

1. Метод нечеткого анализа иерархий (Н-МАИ) в оценке эффективности и рисков технологий ГРП. Применяется процедура НМАИ [6] для оценки эффективности трех технологий гидравлического разрыва пласта — традиционного ГРП (D_1), глубокого ГРП (D_2) и многостадийного ГРП (D_3) — на основе набора критериев, представленных в таблице 1 [4, 6].

Таблица 1.
Критерии оценки эффективности и рисков технологий ГРП

B_1. Экономические показатели	B_3. Экологические показатели
C_1. Уровень капиталовложений (млн рублей/год)	C_6. Уровень воздействия объекта на литосферу (отходы) (% примесей)
C_2. Чистая текущая стоимость — ЧТС (NPV) (млн рублей/год)	C_7. Уровень воздействия объекта на гидросферу (сбросы) (% примесей)
B_2. Технологические показатели	B_4. Социальные показатели
C_3. Прирост добычи нефти (раз. год)	C_8. Уровень производственного травматизма (случ./год)
C_4. темп обводнения (Обводненность) (вероятность в %)	C_9. Уровень воздействия на организм человека химических веществ (случ./год)
C_5. Наведенная (или индуцированная) сейсмичность (сколько раз. год)	

Для решения этой задачи строится иерархическая структура, приведенная на рисунке 1.

Согласно иерархии на рисунке 2, эксперт перемещается по уровням структуры от корня А к терминальным вершинам D_1, D_2 и D_3, выполняя вычислительные процедуры, которые состоят в составлении нечетких матриц парных сравнений (НМПС) и матриц весов с последующим проведением над ними следующих вычислений.

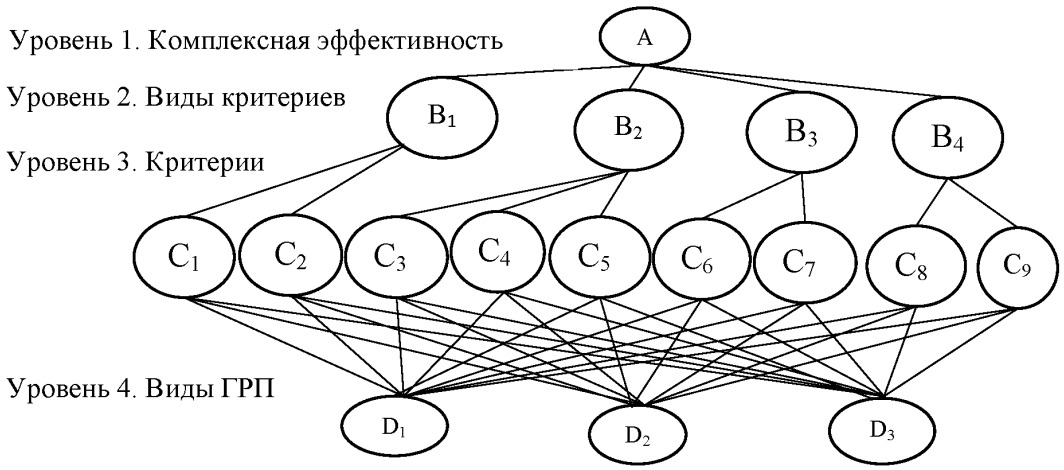


Рис. 1. Иерархия оценки эффективности технологий ГРП

Источник: Составлено автором на основании [4, 6]

Уровень 2: формирует нечеткую матрицу парных сравнений (НМПС) видов (групп) критериев друг относительно друга и по отношению к главной цели А в соответствии со шкалой, представленной в таблице 2 [6,10].

Таблица 2.

Шкала нечетких чисел МАИ

Лингвистическая переменная	Нечеткие числа	Нечеткое число типа L-L (a, b, c)
одинаковая значимость	$\overset{\vee}{1}$	(1,1,3)
слабое преобладание	$\overset{\vee}{3}$	(1,3,5)
существенное преобладание	$\overset{\vee}{5}$	(3,5,7)
очевидное преобладание	$\overset{\vee}{7}$	(5,7,9)
абсолютное преобладание	$\overset{\vee}{9}$	(7,9,9)

Таблица 3.

Нечеткая матрица парных сравнений видов критериев

A	B1A			B2A			B3A			B4A			W_i
AB1	1	1	3	1	1	3	1	3	5	3	5	7	0.325
AB2	1	1	3	1	1	3	1	3	5	3	5	7	0.325
AB3	0.2	0.33	1	0.2	0.33	1	1	1	3	1	3	5	0.223
AB4	0.142	0.2	0.33	0.142	0.2	0.33	0.2	0.33	1	1	1	3	0.116

В этой таблице Wi — представляет собой элементы вектора весов, вычисляемые с применением метода анализа экстента. Для устранения неопределенности в рамках данного метода используется процедура дефаззификации, основанная на расчете степеней возможности превосходства нечетких чисел с их последующей нормализацией, что позволяет получить точные (четкие) значения весовых коэффициентов.

Уровень 3: Далее, в соответствии с видами критериев создаются четыре НМПС. На основе полученных векторов весов составляется результирующая матрица весов, которая умножается на вектор весов видов критериев, в результате чего получаем следующий агрегированный вектор весов: W_i = (0.195, 0,130, 0.141, 0.141, 0.042, 0.173, 0.057,0.046, 0.069)

Уровень 4: На этом уровне иерархии составляются 9 нечетких матриц сравнений технологий ГРП D_i относительно каждого критерия C_i. В итоге получаем итоговый вектор весов технологий (видов) ГРП в соответствии со всеми критериями (рис. 2). Четкий вектор весов (приоритетов) технологий D_i: W_{D1}=0,338; W_{D2}=0,304; W_{D3}=0,401. Таким образом, наиболее предпочтительной по степени эффективности и минимальности рисков является технология многостадийного ГРП D_3 [6].

2. Нечеткая марковизация иерархической структуры НМАИ в многокритериальной оценке эффективности и выборе оптимальной технологии ГРП.

***2.1.* Обоснование Марковизации метода *Н-МАИ*.** С учетом изложенного во введении и в работах [5, 8, 9], построение нечеткой марковской модели НМАИ (нечеткая марковизация иерархии) и ее теоретическое обоснование на основе нечетких чисел типа L-L определяются следующим образом. Нечеткая марковизация заключается в преобразовании иерархической структуры НМАИ (см. рис. 1) в замкнутый ветвящийся случайный процесс — однородную нечеткую цепь Маркова с дискретными состояниями и дискретным временем [8]. Каждая терминальная вершина иерархии соединяется с корневой вершиной с переходной вероятностью, равной нечеткой единице [5]. Полученной модели отвечает ориентированный нечеткий граф переходов $G = \left(\dot{S}.\dot{V}\right)$, где элементы нечеткой матрицы вероятностей переходов (НМВП) $\dot{P}_{ij} = \left(p_{ij}.\alpha_{ij}.\beta_{ij}\right)$ выражаются в виде нечетких чисел типа LL. Поскольку марковское свойство независимости переходов сохраняется, дальнейший анализ эффективности и рисков технологий ГРП проводится в стационарном режиме. Решение задачи будет сводиться к заданию ЛПР соответствующей НМВП на основе нечетких чисел типа LL с применением разработанной нечеткой экспертной процедуры, и решению системы нечетких линейных алгебраических уравнений Колмогорова — Чепмена. На основе полученных дискретных нечетких вероятностей состояний применяется процедура дефаззификации путем нормализации результирующего вектора для получения четких финальных показателей. С учетом изложенного на рис. 2 представлена нечеткая марковизация иерархии решаемой задачи оценки эффективности и выбора оптимальной технологии ГРП. Рассмотрим нечеткую модель решения полученной задачи.

2.2* Модель определения нечетких матриц переходных вероятностей** (НМВП***). Для решения задачи необходимо определить элементы нечеткой матрицы переходов (НМВП). В отличие от традиционных подходов [3, 5], основанных на четких экспертных оценках, в данной работе применяется разработанная нечеткая экспертная процедура. С учетом неопределенности предпочтений ЛПР и неполноты исходных данных, значения критериев для текущего состояния $\dot{K}_i^D$ и желаемого состояния $\dot{K}_i^S$ задаются в виде нечетких чисел типа LL. Расчет взвешенной нечеткой оценки перехода $\dot{K}_i^*$принимает следующий вид:

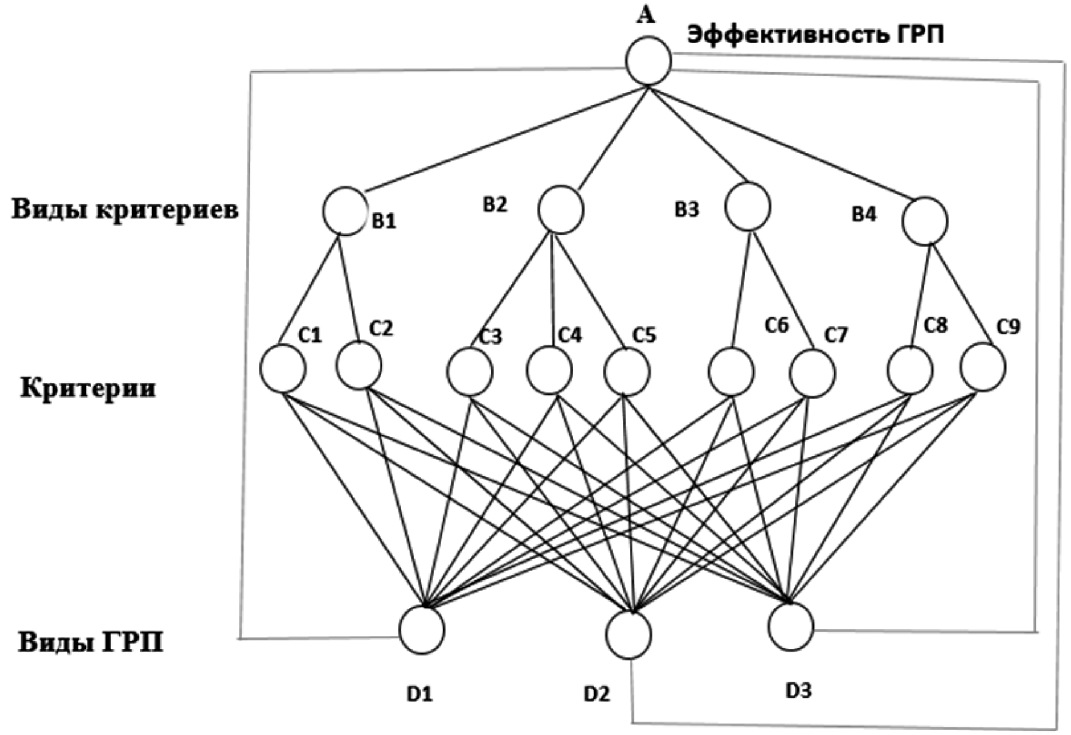


Рис. 2. Нечеткая марковизация иерархии оценки технологий ГРП

Источник: Составлено автором на основании [5]

$$\dot{K}_i^* = \gamma_i F_i\left(\dot{K}_i^D.\dot{K}_i^s\right) \quad (1)$$

Где $f(\dot{K}_i^s.\dot{K}_i^D)$ представляет собой функцию оценки изменений. На практике наиболее предпочтительным является вычисление разности значений $\dot{f}_i = \left(\dot{K}_i^S \ominus \dot{K}_i^D\right)$ согласно следующему соотношению:

$$\dot{K}_i^* = \gamma_i\left(\left(a_{Si} - c_{Di}\right).\left(b_{Si} - b_{Di}\right).\left(c_{Si} - a_{Di}\right)\right)LL \quad (2)$$

Следует отметить, что математическая процедура нечеткого вычитания существенно зависит от вида используемых функций принадлежности: например, для нечетких чисел типа L-R алгоритм вычислений реализуется по известным правилам, представленным в [11]. Однако данное исследование базируется исключительно на нечетких числах типа L-L [12], что обуславливает применение соответствующего математического аппарата нечеткой арифметики для оценки потенциала улучшения технологических критериев ГРП в рамках марковских переходов.

При этом нечеткие переходные вероятности НМВП последовательно определяются ЛПР между соседними уровнями иерархии сверху вниз (табл. 5–7). Для формализации экспертных суждений в работе используется 10-балльная лингвистическая шкала, адаптированная под нечеткие числа типа L-L (табл. 6) [10]. Данный подход позволяет эксперту выражать суждения в привычном числовом диапазоне с последующей их трансформацией в параметры функций принадлежности [12].

Таблица 4.

Балльная нечеткая шкала для оценки вероятностей переходов

Нечеткие числа	Нечеткое число типа L-L	Нечеткие числа	Нечеткое число типа L-L
$\overset{\vee}{1}$	(1,1,1)	$\overset{\vee}{6}$	(5,6,7)
$\overset{\vee}{2}$	(1,2,3)	$\overset{\vee}{7}$	(6,7,8)
$\overset{\vee}{3}$	(2,3,4)	$\overset{\vee}{8}$	(7,8,9)
$\overset{\vee}{4}$	(3,4,5)	$\overset{\vee}{9}$	(8,9,10)
$\overset{\vee}{5}$	(4,5,6)	$\overset{\vee}{10}$	(9,10,10)

В таблицах 5–7 представлен расчет нечетких переходных вероятностей для критериев эффективности и рисков (используя терминологию МАИ). Расчеты выполнены на основе 10-балльной шкалы (см. табл. 4) с применением разработанной нечеткой экспертной процедуры. Исходя из этого, вершины графа состояний (см. рис. 2) в нечеткой матрице вероятностей переходов (НМВП) (см. табл. 8) имеют обозначения: $A\dot{S}_0$, $B_1\dot{S}_1$, $B_2\dot{S}_2$, $B_3\dot{S}_3$, $B_4\dot{S}_4$ где $\dot{S}_0$, $\dot{S}_1$, $\dot{S}_3$, $\dot{S}_4$ — сквозная нумерация вершин от корня до терминальных элементов в направлении слева направо. Аналогичный подход применяется для остальных состояний системы ГРП.

Таблицы 5–7.

Суждения экспертов по определению нечетких переходных вероятностей для уровней иерархии оценки технологий ГРП

Критерии	$K^D_i (a_{Di}, b_{Di}, c_{Di})$			$K^S_i (a_{si}, b_{si}, c_{si})$			$K^S_i - K^D_i (a_{si} - a_{Di}, b_{si} - b_{Di}, c_{si} - c_{Di})$			γ_i, в %	$K^*_i = (K^S_i - K^D_i)\gamma_i = \gamma_i (a_{si} - a_{Di}, b_{si} - b_{Di}, c_{si} - c_{Di})$			Место K_i^*	Вес группы (вида) критериев (субъективная вероятность перехода — $\alpha_{ij}, P_{ij}, S_{ij}$)		
Оценка эффективности видов ГРП с учетом рисков; — A, $\dot{S}_0$																	
B_1	5	6	7	9	10	10	2	4	5	30	60	120	150	I–II	$\alpha_{0,1}$=0.167	$P_{0,1}$=0.333	$S_{0,1}$=0,417
B_2	5	6	7	9	10	10	2	4	5	30	60	120	150	I–II	$\alpha_{0,2}$=0.167	$P_{0,2}$=0,333	$S_{0,2}$=0,417
B_3	4	5	6	7	8	9	1	3	5	25	25	75	125	III	$\alpha_{0,3}$=0.069	$P_{0,3}$=0.209	$S_{0,3}$=0,25
B_4	1	2	3	4	5	6	1	3	5	15	15	45	75	IV	$\alpha_{0,4}$=0.042	$P_{0,4}$=0,125	$S_{0,4}$=0,208
Всего										100	160	360	500			1.000	

Критерии	$K^D_i (a_{Di}, b_{Di}, c_{Di})$			$K^S_i (a_{si}, b_{si}, c_{si})$			$K^S_i - K^D_i (a_{si} - a_{Di}, b_{si} - b_{Di}, c_{si} - c_{Di})$			γ_i, в %	$K^*_i = (K^S_i - K^D_i)\gamma_i = \gamma_i (a_{si} - a_{Di}, b_{si} - b_{Di}, c_{si} - c_{Di})$			Место K_i^*	Вес критерия в группе (субъективная вероятность перехода — $\alpha_{ij}, P_{ij}, S_{ij}$)		
Экономические показатели — B_1, $\dot{S}_1$																	
C_1	6	7	8	2	3	4	2	4	6	54	108	216	324	I	$\alpha_{1,5}$=0.304	$P_{1,5}$= 0.610	$S_{1,5}$=0.913
C_2	1	1	1	3	4	5	2	3	4	46	92	138	184	II	$\alpha_{1,6}$= 0,261	$P_{1,6}$= 0.389	$S_{1,6}$=0.522
Всего										100	272	354	508			1,00	
Технологические показатели — B_2, $\dot{S}_2$																	
C_3	2	3	4	7	8	9	3	5	7	37	111	185	259	I	$\alpha_{2,7}$=0.267	$P_{2,7}$=0.441	$S_{2,7}$=0.662
C_4	2	3	4	6	7	8	2	4	6	45	90	180	270	II	$\alpha_{2,8}$=0.213	$P_{2,8}$=0.429	$S_{2,8}$=0.640
C_5	3	4	5	1	1	1	2	3	4	18	36	54	72	III	$\alpha_{2,9}$=0.085	$P_{2,9}$=0.129	$S_{2,9}$=0.170
Всего										100	237	419	601			1,00	
Экологические показатели — B_3, $\dot{S}_3$																	
C_6	6	7	8	2	3	4	2	4	6	67	134	268	402	I	$\alpha_{3,10}$=0.365	$P_{3,10}$=0.730	$S_{3,10}$=1,10
C_7	4	5	6	1	2	3	1	3	5	33	33	99	165	II	$\alpha_{3,11}$=0.089	$P_{3,11}$=0.270	$S_{3,11}$=0.449
Всего											167	367	722			1,00	
Социальные показатели — B_4, $\dot{S}_4$																	
C_8	3	4	5	1	1	1	2	3	4	46	92	138	184	II	$\alpha_{4,12}$=0.266	$P_{4,12}$=0.390	$S_{4,11}$=0.533
C_9	6	7	8	2	3	4	2	4	6	54	108	216	324	I	$\alpha_{4,13}$=0.313	$P_{4,13}$=0.610	$S_{4,12}$=0.930
Всего										100	200	354	508			1,00	

виды ГРП	$K^D_i(a_{Di}, b_{Di}, c_{Di})$			$K^S_i(a_{si}, b_{si}, c_{si})$			$K^S_i - K^D_i(a_{si} - a_{Di}, b_{si} - b_{Di}, c_{si} - c_{Di})$			γ_i, в %	$K^*_i = (K^S_i - K^D_i)\gamma_i = \gamma_i(a_{si} - a_{Di}, b_{si} - b_{Di}, c_{si} - c_{Di})$			Место K^*_j	Вероятность выбора варианта A_i по критерию C_j		
Уровень капиталовложений — C_1, $\dot{S}_5$																	
D_1	4	5	6	1	2	3	1	3	5	22	22	66	110	II–III	$\alpha_{5,14}$=0.062	$P_{5,14}$=0.185	$S_{5,14}$=0.308
D_2	5	6	7	2	3	4	1	3	5	22	22	66	110	II–III	$\alpha_{5,15}$=0.062	$P_{5,15}$=0.185	$S_{5,15}$=0.308
D_3	7	8	9	3	4	5	2	4	6	56	112	224	336	I	$\alpha_{5,16}$=0.314	$P_{5,16}$=0,629	$S_{5,16}$=0.930
Всего										100	156	356	556			**1,00**	
Чистая текущая стоимость — ЧТС (NPV)— C_2, $\dot{S}_6$																	
D_1	2	3	4	5	6	7	1	3	5	22	22	65	110	II–III	$\alpha_{6,14}$=0.062	$P_{6,14}$=0,185	$S_{6,14}$=0.308
D_2	3	4	5	6	7	8	1	3	5	22	22	65	110	II–III	$\alpha_{6,15}$=0.062	$P_{6,15}$=0,185	$S_{6,15}$=0.308
D_3	4	5	6	8	9	10	2	4	6	56	112	224	336	I	$\alpha_{6,16}$=0.314	$P_{6,16}$=0,629	$S_{6,16}$=0.930
Всего										100	156	356	556			**1,00**	
Прирост добычи нефти — C_3, $\dot{S}_7$																	
D_1	1	2	3	4	5	6	1	3	5	20	20	60	100	II–III	$\alpha_{7,14}$=0.045	$P_{7,14}$=0,137	$S_{7,14}$=0.227
D_2	2	3	4	6	7	8	2	4	6	20	40	80	120	II–III	$\alpha_{7,15}$=0.090	$P_{7,15}$=0,137	$S_{7,15}$=0.227
D_3	4	5	6	9	10	10	4	5	6	60	240	300	360	I	$\alpha_{7,16}$=0.545	$P_{7,16}$=0,681	$S_{7,16}$=0.818
Всего										100	300	440	580			**1,00**	
Темп обводнения (Обводненность)— C_4, $\dot{S}_8$																	
D_1	4	5	6	1	2	3	1	3	5	48	48	144	240	I	$\alpha_{8,14}$=0.153	$P_{8,14}$=0.464	$S_{8,14}$=0.766
D_2	4	5	6	1	2	3	1	3	5	42	42	126	210	II	$\alpha_{8,15}$=0.137	$P_{8,15}$=0.406	$S_{8,15}$=0.686
D_3	7	8	9	3	4	5	2	4	6	10	20	40	60	III	$\alpha_{6,16}$=0.063	$P_{8,16}$=0.129	$S_{8,16}$=0.191
Всего											182	310	382			**1,00**	
Наведенная (или индуцированная) сейсмичность — C_5, $\dot{S}_9$																	
D_1	2	3	4	1	1	1	1	2	3	45	45	90	135	I–II	$\alpha_{9,14}$=0.214	$P_{9,14}$=0,428	$S_{9,14}$=0.642
D_2	2	3	4	1	1	1	1	2	3	45	45	90	135	I–II	$\alpha_{9,15}$=0.214	$P_{9,15}$=0,428	$S_{9,15}$=0.642
D_3	4	5	6	1	2	3	1	3	5	10	10	30	50	III	$\alpha_{9,16}$=0.047	$P_{9,16}$=0,142	$S_{9,16}$=0.238
Всего										100	100	210	220			1,00	
Уровень воздействия объекта на литосферу (отходы) — C_6, $\dot{S}_{10}$																	
D_1	3	4	5	1	1	1	2	3	4	60	120	180	240	I	$\alpha_{10,14}$=0.380	$P_{10,14}$=0.571	$S_{10,14}$=0.761
D_2	4	5	6	1	2	3	1	3	5	25	25	75	125	II	$\alpha_{10,15}$=0.079	$P_{10,15}$=0.238	$S_{10,15}$=0.396
D_3	6	7	8	2	3	4	2	4	6	10	30	60	90	III	$\alpha_{10,16}$=0.095	$P_{10,16}$=0.190	$S_{10,16}$=0.285
Всего										100	170	315	455			**1,00**	

виды ГРП	$K^D_i(a_{Di}, b_{Di}, c_{Di})$			$K^S_i(a_{si}, b_{si}, c_{si})$			$K^S_i - K^D_i(a_{si} - a_{Di}, b_{si} - b_{Di}, c_{si} - c_{Di})$			γ_i, в %	$K^*_i = (K^S_i - K^D_i)\gamma_i = \gamma_i(a_{si} - a_{Di}, b_{si} - b_{Di}, c_{si} - c_{Di})$			Место K^*_j	Вероятность выбора варианта A_i по критерию C_j		
Уровень воздействия объекта на гидросферу (сбросы) — C_7, $\dot{S}_{11}$																	
D_1	4	5	6	1	2	3	1	3	5	55	55	165	275	I	$\alpha_{11,14}$=0.150	$P_{11,14}$=0.452	$S_{11,14}$=0.753
D_2	6	7	8	2	3	4	2	4	6	30	60	120	180	II	$\alpha_{11,15}$=0.164	$P_{11,15}$=0.328	$S_{11,15}$=0.493
D_3	7	8	9	3	4	5	2	4	6	20	40	80	120	III	$\alpha_{11,16}$=0.109	$P_{11,16}$=0,219	$S_{11,16}$=0.328
Всего										100	155	365	575			**1,00**	
Уровень производственного травматизма — C_8, $\dot{S}_{12}$																	
D_1	2	3	4	1	1	1	1	2	3	40	40	80	120	I	$\alpha_{12,14}$=0.177	$P_{12,14}$=0,35	$S_{12,14}$=0.533
D_2	2	3	4	1	1	1	1	2	3	35	35	70	105	II–III	$\alpha_{12,15}$=0.155	$P_{12,15}$= 0.32	$S_{12,15}$=0.466
D_3	5	6	7	2	3	4	1	3	5	25	25	75	125	II–III	$\alpha_{12,16}$=0.111	$P_{12,16}$=0.33	$S_{12,16}$=0.555
Всего										100	100	225	350			**1,00**	
Токсическое и раздражающее воздействие на организм человека химических веществ — C_9, $\dot{S}_{13}$																	
D_1	3	4	5	1	1	1	2	3	4	70	140	210	280	I	$\alpha_{13,14}$=0.411	$P_{13,14}$=0.617	$S_{13,14}$=0.823
D_2	5	6	7	1	2	3	2	4	6	20	40	80	120	II	$\alpha_{13,15}$=0.117	$P_{13,15}$=0,235	$S_{13,15}$=0.353
D_3	7	8	9	2	3	4	3	5	7	10	30	50	70	III	$\alpha_{13,16}$=0.088	$P_{13,16}$=0,147	$S_{13,16}$=0.205
Всего										100	210	340	470			**1,00**	

2.3. Система нечетких линейных алгебраических уравнений Колмогорова-Чепмена и ее решение. В нечеткой матрице вероятностей переходов (см. табл. 6) по горизонтали и вертикали записаны группы критериев, частные критерии и альтернативные технологии ГРП. На пересечении этих строк и столбцов располагаются соответствующие переходные вероятности. Для нахождения вероятностей пребывания системы в дискретных состояниях в стационарном режиме, для каждого из этих состояний запишем классическую систему Колмогорова — Чепмена [5,13], состоящую из 17 линейных алгебраических уравнений. В качестве примера приведем расчетное уравнение для начального состояния системы S_0:

$$S_0 \frac{dp0(t)}{dt} = \left(-P_{0.1} - P_{0.2} - P_{0.3} - P_{0.4}\right) * P_0(t) + \\ + P_{14.0} * P_{14}(t) + P_{15.0} * P_{15}(t) + P_{16.0} * P_{16}(t) = 0 \quad (3)$$

Остальные 16 уравнений системы для состояний от (S_1 до S_{16}) составляются аналогичным образом на основе графа переходов и баланса вероятностей.

Ввиду неполноты исходных данных вероятности переходов в системе рассматриваются как нечеткие числа типа L-L. Для решения исходной системы дифференциальных уравнений предложен метод интегрирования, основанный на переходе к дискретному времени [13]. Заменяя производные конечными разностями, в рамках разработанного метода применяется следующее аппроксимационное соотношение:

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \frac{p_i(t_{k+1}) - p_i(t_k)}{(t_{k+1} - t_k)} \quad (4)$$

Принимая интервал дискретизации равным одному году $t_{k+1} - t_k$=1 поллучим конечно-разностную дискретную модель. В качестве примера приведем уравнение для начального состояния системы $p_0(t_{k+1})$:

$$p_0(t_{k+1}) = \\ = \begin{bmatrix} \left(1 - \left(P_{0.1} + P_{0.2} + P_{0.3} + P_{0.4}\right)\right) * P_0(t_k) + \\ + P_{14.0} * P_{14}(t_k) + P_{15.0} * P_{15}(t_k) + P_{16.0} * P_{16}(t_k) \end{bmatrix} = (5)$$

$$= 0\, p_{0.1} = \left(p_{0.1}.\alpha_{0.1}.\beta_{0.1}\right)$$

Остальные уравнения четкой дискретной модели формируются аналогично, фиксируя детерминированную динамику марковских переходов перед полной фазификацией системы.

На основе дискретной модели строится нечеткая модель, где все параметры системы (вероятности состояний и интенсивности переходов) рассматриваются как

Таблица 8.

Нечеткая матрица переходных вероятностей состояний ГРП

	$AS_0^{\cdot}$	$B_1S_1^{\cdot}$	$B_2S_2^{\cdot}$	$B_3S_3^{\cdot}$	$B_4S_4^{\cdot}$	$C_1S_5^{\cdot}$	$C_2S_6^{\cdot}$	$C_3S_7^{\cdot}$	$C_4S_8^{\cdot}$	$C_5S_9^{\cdot}$	$C_6S_{10}^{\cdot}$	$C_7S_{11}^{\cdot}$	$C_8S_{12}^{\cdot}$	$C_9S_{13}^{\cdot}$	$D_1S_{14}^{\cdot}$	$D_2S_{15}^{\cdot}$	$D_3S_{16}^{\cdot}$
$AS_0^{\cdot}$	(0,0,0)	(0.167,0.333, 0.417)	(0.167,0.333,0.417)	(0.069,0.209,0.25)	(0.042,0.125,0.208)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)
$B_1S_1^{\cdot}$	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0.304,0.610,0.913)	(0.261,0.389,0.522)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)
$B_2S_2^{\cdot}$	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0.267,0.441,0.662)	(0.213,0.429,0.640)	(0.085,0.129,0.170)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)
$B_3S_3^{\cdot}$	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0.365,0.730,1.10)	(0.089,0.270,0.449)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)
$B_4S_4^{\cdot}$	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0.266,0.390,0.533)	(0.313,0.610,0.930)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)
$C_1S_5^{\cdot}$	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0.062,0.185,0.308)	(0.062,0.185,0.308)	(0.314,0.629,0.930)
$C_2S_6^{\cdot}$	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0.062,0.185,0.308)	(0.062,0.185,0.308)	(0.314,0.629,0.930)
$C_3S_7^{\cdot}$	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0.045,0.137,0.227)	(0.090,0.137,0.227)	(0.545,0.681,0.818)
$C_4S_8^{\cdot}$	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0.153,0.464,0.766)	(0.137,0.406,0.686)	(0.063,0.129,0.191)
$C_5S_9^{\cdot}$	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0.214,0.428,0.642)	(0.214,0.428,0.642)	(0.047,0.142,0.238)
$C_6S_{10}^{\cdot}$	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0.380,0.571,0.761)	(0.079,0.238,0.396)	(0.095,0.190,0.285)
$C_7S_{11}^{\cdot}$	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0.150,0.452,0.753)	(0.164,0.328,0.493)	(0.109,0.219,0.328)
$C_8S_{12}^{\cdot}$	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0.177,0.35,0.533)	(0.155,0.32,0.466)	(0.111,0.33,0.555)
$C_9S_{13}^{\cdot}$	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0.411,0.617,0.832)	(0.117,0.235,0.353)	(0.088,0.147,0.205)
$D_1S_{14}^{\cdot}$	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)
$D_2S_{15}^{\cdot}$	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)
$D_3S_{16}^{\cdot}$	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)

числа типа *L-L* в параметрическом формате $(m.\alpha.\beta)_{LL}$. Каждый параметр имеет собственный интервал нечеткости, зависящий от временного дискретного параметра (t_k). В аналитических формулах для простоты явная зависимость коэффициентов от времени не указывается, однако разработанный программный комплекс позволяет её учитывать. Для формализации модели введем следующие параметрические обозначения на примере начального состояния и перехода [13]:

$$\dot{p}_0(t_k) = \left(p_0(t_k).\alpha_0.\beta_0\right)_{LL}; \text{ и } \dot{p}_{0.1} = \left(p_{0.1}.\alpha_{0.1}.\beta_{0.1}\right)_{LL} \quad (6)$$

С учетом введенных параметрических обозначений и раскрытия правил нечеткой арифметики для чисел типа *L-L*, исходная модель преобразуется в полную замкнутую систему нечетких разностных уравнений. Приведем модифицированную систему из 16 уравнений в явном параметрическом виде для всех состояний от p_0 до p_{16}:

$$\begin{aligned}
&\dot{p}_0(t_{k+1}) = (1 - P_{0.1} - P_{0.2} - P_{0.3} - P_{0.4}) * P_0(t_k) + \\
&+ P_{14.0}P_{14}(t_k) + P_{15.0}P_{15}(t_k) + P_{16.0}P_{16}(t_k) + \\
&+ \alpha_0(1 + p_{0.1} + p_{0.2} + p_{0.3} + p_{0.4}) + \\
&+ P_0(t_k)(\alpha_{0.1} + \alpha_{0.2} + \alpha_{0.3} + \alpha_{0.4}) + \\
&+ \alpha_{14}P_{14.0} + P_{14}(t_k)\alpha_{14.0} + \alpha_{15}P_{15.0} + \\
&+ P_{15}(t_k)\alpha_{15.0} + \alpha_{16}P_{16.0} + P_{16}(t_k)\alpha_{16.0} + \\
&+ \beta_0(1 + p_{0.1} + p_{0.2} + p_{0.3} + p_{0.4}) + \\
&+ P_0(t_k)(\beta_{0.1} + \beta_{0.2} + \beta_{0.3} + \beta_{0.4}) + \beta_{14}P_{14.0} + \\
&+ P_{14}(t_k)\beta_{14.0} + \beta_{15}P_{15.0} + P_{15}(t_k)\beta_{15.0} + \\
&+ \beta_{16}P_{16.0} + P_{16}(t_k)\beta_{16.0} = 0 \\
&\dot{p}_1(t_{k+1}) = (1 - P_{1.5} - P_{1.6})P_1(t_k) + P_{0.1}P_0(t_k) + \\
&+ \alpha_1(1 + p_{1.5} + p_{1.6}) + P_1(t_k)(\alpha_{1.5} + \alpha_{1.6}) + \\
&+ \alpha_0P_{0.1} + P_0(t_k)\alpha_{0.1} + \beta_1(1 + p_{1.5} + p_{1.6}) + \\
&+ P_1(t_k)(\beta_{1.5} + \beta_{1.6}) + \beta_0P_{0.1} + P_0(t_k)\alpha_{0.1}) = 0
\end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
&\dot{p}_2(t_{k+1}) = (1 - P_{2.7} - P_{2.8} - P_{2.9})P_2(t_k) + P_{0.2}P_0(t_k) + \\
&+ \alpha_2(1 + P_{2.7} + P_{2.8} + P_{2.9}) + P_1(t_k)(\alpha_{2.7} + \alpha_{2.8} + \alpha_{2.9}) + \\
&+ \alpha_0P_{0.2} + P_0(t_k)\alpha_{0.2} + \beta_2(1 + P_{2.7} + P_{2.8} + P_{2.9}) + \\
&+ P_1(t_k)(\beta_{2.7} + \beta_{2.8} + \beta_{2.9}) + \beta_0P_{0.2} + P_0(t_k)\beta_{0.2}) = 0 \\
&\dot{p}_3(t_{k+1}) = (1 - P_{3.10} - P_{3.11})P_3(t_k) + P_{0.3}P_0(t_k) + \\
&+ \alpha_3(1 + P_{3.10} + P_{3.11}) + P_3(t_k)(\alpha_{3.10} + \alpha_{3.11}) + \\
&+ \alpha_0P_{0.3} + P_0(t_k)\alpha_{0.3} + \beta_3(1 + P_{3.10} + P_{3.11}) + \\
&+ P_3(t_k)(\beta_{3.10} + \beta_{3.11}) + \beta_0P_{0.3} + P_0(t_k)\beta_{0.3}) = 0 \\
&\dot{p}_4(t_{k+1}) = (1 - P_{4.12} - P_{4.13})P_4(t_k) + P_{0.4}P_0(t_k) + \\
&+ \alpha_4(1 + P_{4.12} + P_{4.13}) + P_4(t_k)(\alpha_{4.12} + \alpha_{4.13}) + \\
&+ \alpha_0P_{0.4} + P_0(t_k)\alpha_{0.4} + \beta_4(1 + P_{4.12} + P_{4.13}) + \\
&+ P_4(t_k)(\beta_{4.12} + \beta_{4.13}) + \beta_0P_{0.4} + P_0(t_k)\beta_{0.4} = 0 \\
&\dot{p}_5(t_{k+1}) = (1 - P_{5.14} - P_{5.15} - P_{5.16})P_5(t_k) + \\
&+ P_{1.5}P_1(t_k) + \alpha_5(1 + P_{5.14} + P_{5.15} + P_{5.16}) + \\
&+ P_5(t_k)(\alpha_{5.14} + \alpha_{5.15} + \alpha_{5.16}) + \alpha_1P_{1.5} + \\
&+ P_1(t_k)\alpha_{1.5} + \beta_5(1 + P_{5.14} + P_{5.15} + P_{5.16}) + \\
&+ P_5(t_k)(\beta_{5.14} + \beta_{5.15} + \beta_{5.16}) + \beta_1P_{1.5} + P_1(t_k)\beta_{1.5} = 0 \\
&\dot{p}_6(t_{k+1}) = (1 - P_{6.14} - P_{6.15} - P_{6.16})P_6(t_k) + \\
&+ P_{1.6}P_1(t_k) + \alpha_6(1 + P_{6.14} + P_{6.15} + P_{6.16}) + \\
&+ P_6(t_k)(\alpha_{6.14} + \alpha_{6.15} + \alpha_{6.16}) + \\
&+ \alpha_1P_{1.6} + P_1(t_k)\alpha_{1.6} + \beta_6(1 + P_{6.14} + P_{6.15} + P_{6.16}) + \\
&+ P_6(t_k)(\beta_{6.14} + \beta_{6.15} + \beta_{6.16}) + \beta_1P_{1.6} + \\
&+ P_1(t_k)\beta_{1.6} = 0 \\
&\dot{p}_7(t_{k+1}) = (1 - P_{7.14} - P_{7.15} - P_{7.16})P_7(t_k) + \\
&+ P_{2.7}P_2(t_k) + \alpha_7(1 + P_{7.14} + P_{7.15} + P_{7.16}) + \\
&+ P_7(t_k)(\alpha_{7.14} + \alpha_{7.15} + \alpha_{7.16}) + \alpha_2P_{2.7} + \\
&+ P_2(t_k)\alpha_{2.7} + \beta_7(1 + P_{7.14} + P_{7.15} + P_{7.16}) + \\
&+ P_7(t_k)(\beta_{7.14} + \beta_{7.15} + \beta_{7.16}) + \beta_2P_{2.7} + P_2(t_k)\beta_{2.7} = 0 \\
&\dot{p}_8(t_{k+1}) = (1 - P_{8.14} - P_{8.15} - P_{8.16})P_8(t_k) + \\
&+ P_{2.8}P_2(t_k) + \alpha_8(1 + P_{8.14} + P_{8.15} + P_{8.16}) + \\
&+ P_8(t_k)(\alpha_{8.14} + \alpha_{8.15} + \alpha_{8.16}) + \alpha_2P_{2.8} + \\
&+ P_2(t_k)\alpha_{2.8} + \beta_8(1 + P_{8.14} + P_{8.15} + P_{8.16}) + \\
&+ P_8(t_k)(\beta_{8.14} + \beta_{8.15} + \beta_{8.16}) + \beta_2P_{2.8} + P_2(t_k)\beta_{2.8} = 0 \\
&\dot{p}_9(t_{k+1}) = (1 - P_{9.14} - P_{9.15} - P_{9.16})P_9(t_k) + \\
&+ P_{2.9}P_2(t_k) + \alpha_9(1 + P_{9.14} + P_{9.15} + P_{9.16}) + \\
&+ P_9(t_k)(\alpha_{9.14} + \alpha_{9.15} + \alpha_{9.16}) + \alpha_2P_{2.9} + \\
&+ P_2(t_k)\alpha_{2.9} + \beta_9(1 + P_{9.14} + P_{9.15} + P_{9.16}) + \\
&+ P_9(t_k)(\beta_{9.14} + \beta_{9.15} + \beta_{9.16}) + \beta_2P_{2.9} + P_2(t_k)\beta_{2.9} = 0 \\
&\dot{p}_{10}(t_{k+1}) = (1 - P_{10.14} - P_{10.15} - P_{10.16})P_{10}(t_k) + \\
&+ P_{3.10}P_3(t_k) + +\alpha_{10}(1 + P_{10.14} + P_{10.15} + P_{10.16}) + \\
&+ P_{10}(t_k)(\alpha_{10.14} + \alpha_{10.15} + \alpha_{10.16}) + \alpha_3P_{3.10} + \\
&+ P_3(t_k)\alpha_{3.10} + \beta_{10}(1 + P_{10.14} + P_{10.15} + P_{10.16}) + \\
&+ P_{10}(t_k)(\beta_{10.14} + \beta_{10.15} + \beta_{10.16}) + \beta_3P_{3.10} + \\
&+ P_3(t_k)\beta_{3.10} = 0 \\
&\dot{p}_{11}(t_{k+1}) = (1 - P_{11.14} - P_{11.15} - P_{11.16})P_{11}(t_k) + \\
&+ P_{3.11}P_3(t_k) + \alpha_{11}(1 + P_{11.14} + P_{11.15} + P_{11.16}) + \\
&+ P_{11}(t_k)(\alpha_{11.14} + \alpha_{11.15} + \alpha_{11.16}) + \alpha_3P_{3.11} + \\
&+ P_3(t_k)\alpha_{3.11} + \beta_{11}(1 + P_{11.14} + P_{11.15} + P_{11.16}) + \\
&+ P_{11}(t_k)(\beta_{11.14} + \beta_{11.15} + \beta_{11.16}) + \beta_3P_{3.11} + \\
&+ P_3(t_k)\beta_{3.11} = 0
\end{aligned}$$

$$\dot{p}_{12}(t_{k+1}) = (1 - P_{12.14} - P_{12.15} - P_{12.16})P_{12}(t_k) +$$
$$+ P_{4.12}P_4(t_k) + \alpha_{12}(1 + P_{12.14} + P_{12.15} + P_{12.16}) +$$
$$+ P_{12}(t_k)(\alpha_{12.14} + \alpha_{12.15} + \alpha_{12.16}) + \alpha_4 P_{4.12} +$$
$$+ P_4(t_k)\alpha_{4.12} + \beta_{12}(1 + P_{12.14} + P_{12.15} + P_{12.16}) +$$
$$+ P_{12}(t_k)(\beta_{12.14} + \beta_{12.15} + \beta_{12.16}) + \beta_4 P_{4.12} +$$
$$+ P_4(t_k)\beta_{4.12} = 0$$
$$\dot{p}_{13}(t_{k+1}) = (1 - P_{13.14} - P_{13.15} - P_{13.16})P_{13}(t_k) +$$
$$+ P_{4.13}P_4(t_k) + \alpha_{13}(1 + P_{13.14} + P_{13.15} + P_{13.16}) +$$
$$+ P_{13}(t_k)(\alpha_{13.14} + \alpha_{13.15} + \alpha_{13.16}) + \alpha_4 P_{4.13} +$$
$$+ P_4(t_k)\alpha_{4.13} + \beta_{13}(1 + P_{13.14} + P_{13.15} + P_{13.16}) +$$
$$+ P_{13}(t_k)(\beta_{13.14} + \beta_{13.15} + \beta_{13.16}) + \beta_4 P_{4.13} +$$
$$+ P_4(t_k)\beta_{4.13} = 0$$
$$\dot{p}_{14}(t_{k+1}) = (1 - P_{14.0})P_{14}(t_k) + P_{5.14}P_5(t_k) +$$
$$+ P_{6.14}P_6(t_k) + \ldots + P_{12.14}P_{12}(t_k) + P_{13.14}P_{13}(t_k) +$$
$$+ \alpha_{14}(1 + p_{14.0}) + P_{14}(t_k)\alpha_{14.0} + \alpha_5 p_{5.14} +$$
$$+ P_5(t_k)\alpha_{5.14} + \ldots + \alpha_{12}p_{12.14} + P_{12}(t_k)\alpha_{12.14} +$$
$$+ \alpha_{13}p_{13.14} + P_{13}(t_k)\alpha_{13.14} + \beta_{14}(1 + p_{14.0}) +$$
$$+ P_{14}(t_k)\beta_{14.0} + \beta_5 p_{5.14} + P_5(t_k)\beta_{5.14} + \ldots +$$
$$+ \beta_{12}p_{12.14} + P_{12}(t_k)\beta_{12.14} + \beta_{13}p_{13.14} + P_{13}(t_k)\beta_{13.14} = 0$$
$$\dot{p}_{15}(t_{k+1}) = (1 - P_{15.0})P_{15}(t_k) + P_{5.15}P_5(t_k) +$$
$$+ P_{6.15}P_6(t_k) + \ldots + P_{12.15}P_{12}(t_k) + P_{13.15}P_{13}(t_k) +$$
$$+ \alpha_{15}(1 + p_{15.0}) + P_{15}(t_k)\alpha_{15.0} + \alpha_5 p_{5.15} +$$
$$+ P_5(t_k)\alpha_{5.15} + \ldots + \alpha_{12}p_{12.15} + P_{12}(t_k)\alpha_{12.15} +$$
$$+ \alpha_{13}p_{13.15} + P_{13}(t_k)\alpha_{13.15} + \beta_{15}(1 + p_{15.0}) +$$
$$+ P_{15}(t_k)\beta_{15.0} + \beta_5 p_{5.15} + P_5(t_k)\beta_{5.15} + \ldots +$$
$$+ \beta_{12}p_{12.15} + P_{12}(t_k)\beta_{12.15} + \beta_{13}p_{13.15} + P_{13}(t_k)\beta_{13.15} = 0$$
$$\dot{p}_{16}(t_{k+1}) = (1 - P_{16.0})P_{16}(t_k) + P_{5.16}P_5(t_k) +$$
$$+ P_{6.16}P_6(t_k) + \ldots + P_{12.16}P_{12}(t_k) + P_{13.16}P_{13}(t_k) +$$
$$+ \alpha_{16}(1 + p_{16.0}) + P_{16}(t_k)\alpha_{16.0} + \alpha_5 p_{5.16} +$$
$$+ P_5(t_k)\alpha_{5.16} + \ldots + \alpha_{12}p_{12.16} + P_{12}(t_k)\alpha_{12.16} +$$
$$+ \alpha_{13}p_{13.16} + P_{13}(t_k)\alpha_{13.16} + \beta_{16}(1 + p_{16.0}) +$$
$$+ P_{16}(t_k)\beta_{16.0} + \beta_5 p_{5.16} + P_5(t_k)\beta_{5.16} + \ldots +$$
$$+ \beta_{12}p_{12.16} + P_{12}(t_k)\beta_{12.16} + \beta_{13}p_{13.16} + P_{13}(t_k)\beta_{13.16} = 0$$

Методика аналитического решения и дефаззификации системы

Полученная система нечетких разностных уравнений сформирована по правилам нечеткого сложения и умножения чисел типа *L-L*. Несмотря на громоздкость выражений, их математический смысл однозначен. Из теории марковских процессов иерархической структуры известно, что стационарная субъективная вероятность целевого узла на нулевом уровне должна быть строго равна единице:

$$P_0 = 1 \text{ или } \dot{P}_0 = (1.1.1)_{LL} \qquad (8)$$

Данная переопределенная система уравнений эффективно решается аналитическим методом подстановки. В результате последовательного расчета на основе базового уравнения для состояния S_0 определяются расчетные нечеткие значения финальных вероятностей для всех последующих состояний от S_1 до S_{16}. На заключительном этапе, поскольку полученные финальные вероятности состояний системы представляют собой дискретные величины, для перехода к четким (однозначным) числовым значениям приоритетов применяется процедура дефаззификации на основе операции нормализации результирующего вектора каждого уровня иерархии согласно следующему выражению [14]:

$$W_i^{(L)} = \frac{P_i^{(L)}}{\sum_{j=1}^{n} P_j^{(L)}} \qquad (9)$$

$W_i^{(L)}$— нормированное четкое значение приоритета i-го состояния на текущем уровне иерархии L; $P_i^{(L)}$— расчетное значение стационарной вероятности (или веса) i-го состояния системы на уровне L до процедуры норми-

Таблица 9.

Итоговые вероятности марковской модели НМАИ для выбора видов ГРП

A, S_0 — Комплексная эффективность ГРП-1	B_3, S_3 — Экологические показатели — 0.209
B_1, S_1. Экономические показатели — 0.335	C_6, S_{10} Уровень воздействия на литосферу— 0.715
C_1, S_5 Уровень капиталовложений — 0.604	C_7, S_{11} Уровень воздействия на гидросферу — 0.284
C_2, S_6 Чистая текущая стоимость — 0.395	B_4, S_4 — Социальные показатели — 0.124
B_2, S_2 — технологические показатели — 0.335	C_8, S_{12} Уровень производственного травматизма — 0.42
C_3, S_7 Прирост добычи нефти — 0.439	C_9, S_{13} Уровень воздействие на человека — 0.575
C_4, S_8 Темп обводнения — 0.429	
C_5, S_9 Наведенная сейсмичность — 0.131	
традиционный гидроразрыв пласта ГРП D_1, S_{14} — 0.317	
глубокопроникающий гидроразрыв пласта ГГРП D_2, S_{15} — 0.280	
многостадийный гидроразрыва пласта МГРП D_3, S_{16} — 0.403	

ровки; $\sum_{j=1}^{n} P_j^{(L)}$ — сумма вероятностей всех n состояний вектора текущего уровня. Последовательное применение выражения (9) для вектора каждого уровня обеспечивает строгое выполнение марковского условия нормировки $\sum_{i=1}^{n} W_i^{(L)} = 1$ и формирует итоговые показатели в таблице 9.

На основе разработанной нечеткой марковской модели и поуровневой нормализации (табл. 6) получены стационарные вероятности итогового ранжирования альтернатив ГРП. Наивысший приоритет получила технология МГРП (0,403), далее следуют традиционный ГРП (0,317) и ГГРП (0,280). Преимущество МГРП обусловлено его максимальной технологической эффективностью (приростом добычи нефти), что полностью компенсирует высокие риски и капиталоемкость.

Заключение

Из изложенного выше видно, что на примере решения задачи многокритериального выбора видов ГРП по критериям эффективности и рисков, предложенная нечеткая марковская модель обладает следующими ключевыми преимуществами по сравнению с традиционным методом НМАИ: 1. Повышение информативности и обоснованности оценок: разработанная нечеткая экспертная процедура обеспечивает большую информативность и строгое математическое обоснование при определении балльных оценок относительной важности элементов иерархии по сравнению с классическими парными сравнениями на основе нечеткой шкалы Саати. 2. Снижение вычислительной трудоемкости: вместо формирования множества нечетких матриц на каждом уровне декомпозиции и выполнения интервального анализа, предложенный подход требует составления лишь одной нечеткой матрицы вероятностей переходов (табл. 8) с последующим формированием и решением системы уравнений Колмогорова — Чепмена методом последовательной подстановки. 3. Высокая адаптивность к неопределенности данных: усовершенствованный математический аппарат, объединяющий нечеткую экспертную процедуру и систему уравнений Колмогорова — Чепмена для чисел типа L-L, оптимально применим в условиях высокой неопределенности или дефицита исходных данных, характерных для нефтегазовой отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Силин М.А., Магадова Л.А., Глущенко В.Н. Технологические аспекты и материалы для гидроразрыва пласта. 2012. — 422 с.
2. Батыров М.И. Техника и технология проведения ГРП на ем-ёговской площади красноленинского месторождения // Отраслевые научные и прикладные исследования: Науки о земле. — 2020. — С. 75–81.
3. Степин Ю.П. Компьютерная поддержка формирования, многокритериального ранжирования и оптимизации управленческих решений в нефтегазовой отрасли. — М.: Недра, 2016. — 421 с.
4. Фетарони М. Метод анализа иерархий для оценки эффективности и рисков различных видов гидроразрыва пласта и выбора подходящего вида для внедрения // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. — 2026. — № 02. — С. 187–192.
5. Бледных Е.Н., Макарик Е.В., Степин Ю.П. Марковская модель метода анализа иерархий в оценке рисков вариантов разработки месторождений углеводородов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 2021. — № 1 (570). — С. 23–32.
6. Фетарони М., Стёпин Ю.П. Разработка системы поддержки принятия решений на основе нечеткого логического вывода и нечеткого метода анализа иерархий в контексте оценки общего показателя эффективности технологий гидравлического разрыва пласта (ГРП) // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. — 2026. — № 04. — С. 155–161.
7. Фетарони М., Стёпин Ю.П. Нечеткая многокритериальная модель оценки рисков и эффективности видов гидроразрыва пласта (ГРП) // IX Рег. науч.-техн. конф. им. Л. Г. Злотниковой. — М., 2025. — С. 428.
8. Прядко С.А. Марковский логический анализ экспертных данных и его использование в задачах развития нефтегазо вых комплексов: дис. … канд. техн. наук: 05.13.18. — М., 2016. — 162 с.
9. Вентцель Е.С. Исследование операций. — М.: Советское радио, 1972. — 552 с.
10. Vinogradova-Zinkevič I. Comparative Sensitivity Analysis of Some Fuzzy AHP Methods // Mathematics. — 2023. — Vol. 11, № 24. — Art. 4984.
11. Dehghan M. Some computations on fuzzy matrices: an application in fuzzy analytical hierarchy process // International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems. — 2008. — Vol. 16, № 5. — P. 715–733.
12. Nagoor Gani A., Mohamed Assarudeen S. N. A New Operation on Triangular Fuzzy Number for Solving Fuzzy Linear Programming Problem // Applied Mathematical Sciences. — 2012. — Vol. 6, № 11. — P. 525–532.
13. Степин Ю.П., Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка управления нефтегазовыми технологическими процессами и производствами. Том 2. Методы поддержки принятия управленческих решений при планировании и динамик управления. — М.: МАКС Пресс, 2008. — 528 с.
14. Guangming L., Baoxin X. Fuzzy Markov chains based on the fuzzy transition probability // 2014 26th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). — 2014. — P. 4352–4356.

© Фетарони Малак (malakfie2@gmail.com); Стёпин Юрий Петрович (stepin.y@gubkin.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.42

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ДИНАМИКИ СРЕДНИХ И ОБОБЩЕННОГО КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ

MODELING AND CONTROL OF HYDRAULIC FRACTURING PROCESSES FOR OPERATIONAL COST OPTIMIZATION BASED ON THE METHOD OF DYNAMICS OF AVERAGES AND GENERALIZED OPTIMALITY CRITERION

Fetaroni Malak
Yu. Stepin

Summary. This paper considers the development of a new mathematical approach to optimizing hydraulic fracturing processes and reducing operational costs. The research is fundamentally based on the system decomposition into key elements: production facilities (wells), hydraulic fracturing crews, equipment (hydraulic fracturing fleet), as well as material, technical, and logistical resources. Each element is formalized in the form of a state graph describing technological transitions, considering technological risks and fracturing problems. By formulating and solving a system of equations derived from these graphs, the average state multiplicities and probabilistic characteristics of the system are determined. The obtained results are integrated into a general framework to form a "generalized criterion for hydraulic fracturing optimality" that accounts for operational reliability. Based on the developed criterion, a dynamic control algorithm is synthesized, allowing for cost optimization and technological risk minimization in real time.

Keywords: hydraulic fracturing (HF), system decomposition, state graph, method of mean dynamics, generalized optimality criterion, operational reliability, dynamic control algorithm, cost optimization, technological risks.

Фетарони Малак
Аспирант, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, г. Москва
malakfie2@gmail.com
Стёпин Юрий Петрович
Доктор технических наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, г. Москва
stepin.y@gubkin.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается разработка нового математического подхода к оптимизации процессов гидравлического разрыва пласта (ГРП) и снижению эксплуатационных затрат. В основе исследования лежит декомпозиция системы на ключевые элементы: производственные объекты (скважины), бригады по проведению ГРП, оборудование (флот ГРП), а также материально-технические и логистические ресурсы. Каждый элемент формализован в виде графа состояний, описывающего технологические переходы с учетом технологических рисков и проблем проведения разрыва. Путем составления и решения системы уравнений, полученных на основе данных графов, определены средние численности состояний и вероятностные характеристики системы. Полученные результаты интегрированы в общую структуру для формирования «обобщенного критерия оптимальности проведения ГРП», учитывающего эксплуатационную надежность. На базе разработанного критерия синтезирован алгоритм динамического управления, позволяющий оптимизировать затраты и минимизировать технологические риски в режиме реального времени.

Ключевые слова: гидравлический разрыв пласта (ГРП), системная декомпозиция, граф состояний, метод динамики средних, обобщенный критерий оптимальности, эксплуатационная надежность, алгоритм динамического управления, оптимизация затрат, технологические риски.

В настоящее время развитие теории системного анализа и управления сложными технологическими объектами связано с необходимостью интеграции классических случайных моделей и современных алгоритмов принятия решений (СППР) [1]. Процесс гидравлического разрыва пласта (ГРП) представляет собой сложную динамическую систему, функционирующую в условиях высокой неопределенности исходной информации, стохастического характера отказов оборудования и изменчивости внешних факторов [2]. Эффективное управление и оптимизация затрат при проведении ГРП требуют сквозного анализа всех компонентов системы: производственных объектов (скважин), бригад по проведению ГРП, наземного и подземного оборудования (флота ГРП), а также материально-технических и логистических ресурсов [3]. В данном исследовании для разработки научно обоснованного подхода к моделированию и динамическому управлению процессами ГРП сформулированы и решены следующие взаимосвязанные задачи:

- Задача системного анализа и графового моделирования функционирования ГРП с учетом технологических рисков. Данная задача включает декомпозицию процесса ГРП на ключевые технологические элементы и описание их динамики на основе теории графов состояний с использованием случайных марковских процессов. Разрабатываемые графы состояний учитывают внештатные ситуации, технологические проблемы и риски, возникающие при проведении ГРП. Применение метода динамики средних [4,5,6,7,8] позволяет перейти к детерминированным системам дифференциальных уравнений для определения средних численностей состояний системы в каждый момент времени.
- Задача оптимизации эксплуатационных затрат и синтеза алгоритма динамического управления. На основе результатов моделирования случайных процессов (средних численностей состояний элементов системы ГРП) сформирован обобщенный критерий оптимальности, учитывающий эксплуатационную надежность. Решение данной задачи позволяет разработать алгоритм динамического управления и выбора стратегий, оптимизирующих затраты на основе текущих состояний системыоснове текущих состояний системы.

Задача системного анализа и графового моделирования функционирования ГРП с учетом технологических рисков на основе метода динамики средних

В настоящее время метод динамики средних успешно применяется для моделирования и анализа сложных организационно-технических систем, включая информационно-вычислительные комплексы [6], процессы технического обслуживания и ремонта (ТОР) оборудования, а также геофизические исследования скважин (ГИС) [4,7,8,9,10] и бурение. Применительно к процессам ГРП возникает необходимость сквозного описания одновременного функционирования множества его компонентов в условиях высокой неопределенности и технологических рисков. В качестве ключевых структурно-образующих элементов системы ГРП в работе выделены: производственные объекты (скважины), бригады по проведению ГРП, основное технологическое оборудование (флот ГРП) и материально-технические ресурсы [3].

Специфика ГРП сопряжена с возникновением внештатных ситуаций. Для оценки их влияния на непроизводительное время (НПВ) динамика функционирования системы описывается векторным случайным процессом X(t) с зависимыми состояниями, структура которого интегрирует штатные технологические переходы и вероятностные траектории рисков и отказов.

$$X(t)= \{X_1(t), X_2(t), X_3(t), X_4(t), X_5(t)\} \quad (1)$$

Где $X_1(t)$ — случайный процесс, описывающий динамику процессов очистки скважины к ГРП (работу промывочных агрегатов, насосных установок, скважины), а также проблемы неполной очистки ствола или заклинивания оборудования; $X_2(t)$ — случайный процесс, описывающий функционирование объектов ГРП (скважины, насосные агрегаты грп, блендери и манифольдный блок и др.), с учетом кратковременных технологических рисков и критических отказов, возникающих непосредственно при реализации процесса ГРП; $X_3(t)$ — случайный процесс, описывающий работу бригад по проведению ГРП (инженерно-технического персонала и операторов); $X_4(t)$— случайный процесс, описывающий функционирование нерасходуемых МТР (флота ГРП); $X_5(t)$ — случайный процесс, описывающий функционирование расходуемых МТР (запасов технологических жидкостей, химреагентов и проппанта, и т.д.) с учетом расходуемых материалов для ликвидации технологических рисков.

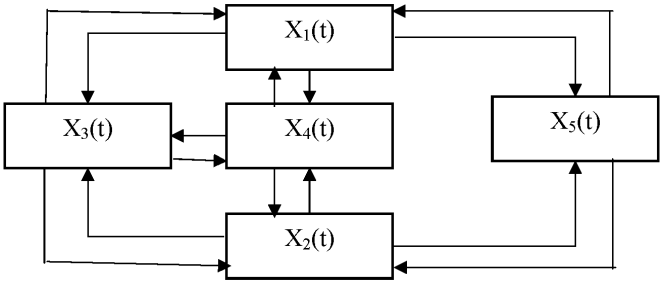
Предполагаем, что каждая из составляющих векторного случайного процесса $X(t)$, описывающего функционирование системы ГРП, представляет собой однородное разложение случайного процесса [4]:

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^{5} S_k^i(t) \quad (2)$$

где $S_k^{(i)}$ ($k = 1,2,...,5$) случайный процесс, описывающий динамику прохождения определенного множества состояний одной единицы соответствующего структурно-образующего элемента системы ГРП

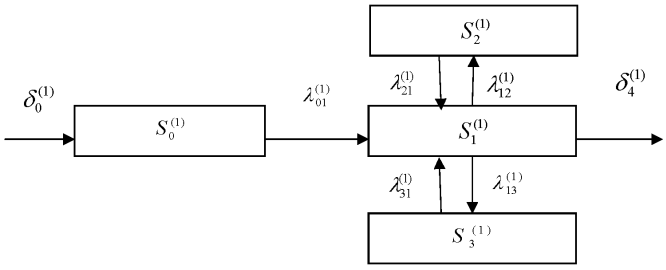
$$s_k^i = \left\{ s_0^i . s_1^i . \cdots . s_n^i \right\} \quad (3)$$

Предположим далее, что единицы производственных объектов (скважин), бригад по проведению ГРП, оборудования флота ГРП, а также материально-технических и логистических ресурсов внутри каждой из своих групп функционируют независимо и статистически однородно [3]. В связи с этим представим каждый случайный процесс $x_i(t)$ в виде однородного канонического разложения с учетом технологических рисков. Покажем, что взаимодействие компонентов векторного процесса ГРП $x(t)$ является транзитивным [4] и описывается следующим графом взаимодействий:



Действительно, интенсивность проведения ГРП на единицу скважины определяется числом требующих обработки объектов $X_2(t)$, качеством их очистки $X_1(t)$, а также количеством и производительностью флота ГРП $X_3(t)$ и бригад $X_4(t)$. Таким образом, технологически процессы $X_3(t)$ и $X_4(t)$ управляют процессами $X_1(t)$ и $X_2(t)$. С другой стороны, интенсивность вызова флота и бригад зависит от потребности скважин на ГРП и объемов материально-технических ресурсов $X_5(t)$; следовательно, в плане формирования потребности, процессы $X_1(t)$ и $X_2(t)$ управляют процессами $X_3(t)$, $X_4(t)$ и $X_5(t)$ [3]. Принимая принцип линейного взаимодействия между процессами, характерный для метода динамики средних, рассмотрим подробнее состояния каждого процесса и интенсивности переходов с учетом технологических рисков и отказов оборудования.

Опираясь на принятые выше обозначения, проанализируем состояния производственных объектов (скважин) $X_1(t)$ при реализации процесса их технологической очистки и подготовки к ГРП, граф состояний и переходов элементарной единицы которых имеет следующий вид:



Где $S_0^{(1)}$— Скважина ожидает начала процесса очистки; $S_1^{(1)}$— Ведется процесс технологической очистки и промывки ствола скважины; $S_2^{(1)}$— Кратковременный технический простой из-за устранимых сбоев при очистке, находящихся в процессе ликвидации (засорение фильтров, отклонение параметров жидкости, нестабильность давления); $S_3^{(1)}$— Аварийный простой вследствие критических технологических осложнений, требующий проведения сложных ремонтно-восстановительных работ (прихват инструмента, разгерметизация изоляции или полное поглощение жидкости пластом).

$\delta_0^{(1)}$ — интенсивность поступления требований на очистку одной скважины. $\delta_0^{(1)} = a_1 = const$.

$\lambda_{01}^{(1)}$ — интенсивность потока принятия на очистке. имеет следующим вид: $\lambda_{01}^{(1)} = a_2\left(m_{s_0^{(3)}} / m_{s_0^{(1)}} \right)$; $a_2 = const$ — производительность работы одной бригады при выполнении технологической очистки.

$\lambda_{12}^{(1)}$ — интенсивность потока технических сбоев (кратковременных простоев) в процессе выполнения очистки. $\lambda_{12}^{(1)} = a_3 = const$

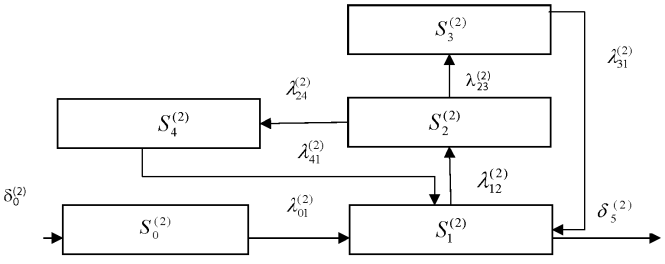
$\lambda_{21}^{(1)}$ — интенсивность восстановления процесса очистки из состояния кратковременного простоя. $\lambda_{21}^{(1)} = a_1^{(1)}\left(m_{s_2^{(3)}} / m_{s_2^{(1)}} \right)$; $a_1^{(1)}$ — производительность одной бригады при выполнении работ по устранению технических сбоев.

$\lambda_{13}^{(1)}$ — Интенсивность возникновения критических технологических рисков при очистке. $\lambda_{13}^{(1)} = a_4 = const$

$\lambda_{31}^{(1)}$— Интенсивность проведения ремонтно-восстановительных работ после аварийного отказа. $\lambda_{31}^{(1)} = a_2^{(1)}\left(m_{s_2^{(3)}} / m_{s_3^{(1)}} \right)$; $a_2^{(1)}$ — производительность бригады при ликвидации аварийных ситуаций и тяжелых технологических рисков.

$\delta_3^{(1)}$— интенсивность очистки одной скважины. $\delta_4^{(1)} = a_2\left(m_{s_2^{(3)}} / m_{s_1^{(1)}} \right)$

Граф состояний и переходов элементарной единицы скважины непосредственно при реализации процесса ГРП $X_2(t)$ имеет следующий вид:



$S_0^{(2)}$— Скважина ожидает начала процесса ГРП; $S_1^{(2)}$— Ведется процесс реализации ГРП; $S_2^{(2)}$— Диагностика технического состояния скважины (определение вида отказа по аномалиям кривых давления и расхода); $S_3^{(2)}$— Кратковременный технологический простой из-за устранимых сбоев или локальных осложнений (сбои приготовления жидкостей, засорение линий, рост давления трения, начальное оседание проппанта); $S_4^{(2)}$— Аварийный простой вследствие критических отказов, требующий сложных ремонтно-восстановительных работ (полный СТОП-эффект, катастрофическое поглощение жидкости пластом, смыкание трещины).

$\delta_0^{(2)}$ — интенсивность поступления скважин на процесс ГРП, обеспечивающая сквозную связь между этапами: $\delta_0^{(2)} = \delta_3^{(1)}$.

$\lambda_{01}^{(2)}$ — интенсивность потока принятия на ГРП. $\lambda_{01}^{(2)} = a_5\left(m_{s_0^{(3)}} / m_{s_0^{(2)}} \right)$; $a_5 = const$ — производительность одной бригады при реализации технологии ГРП.

$\lambda_{12}^{(2)}$ **—** интенсивность потока диагностических мероприятий при обнаружении аномалий (на кривых давления и расхода) в ходе закачки: $\lambda_{12}^{(2)} = a_6\left(m_{s_1^{(2)}} / N \right)$; $a_6 = const$ **—** интенсивность направления системы на диагностику при выявлении нештатных ситуаций, а N **—** Общее количество скважин в проекте.

$\lambda_{23}^{(2)}$ — интенсивность потока классификации отказа как легкого технического сбоя по результатам проведенной диагностики. $\lambda_{23}^{(2)} = \frac{P_{simple}}{T} \cdot \frac{m_{s_2^{(2)}}}{m_{s_1^{(2)}}}$, где Т — технологическая постоянная времени диагностики; а P_{simple} — вероятностный коэффициент веса легких отказов на основе статистических данных.

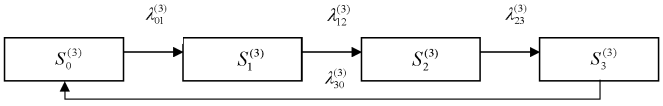
$\lambda_{31}^{(2)}$ — интенсивность потока возобновления процесса ГРП после оперативного устранения неполадок из состояния кратковременного простоя: $\lambda_{31}^{(2)} = a_1^{(2)}\left(m_{s_2^{(3)}} / m_{s_3^{(2)}} \right)$; $a_1^{(2)}$ — производительность одной бригады при устранении легких технических сбоев.

$\lambda_{24}^{(2)}$ — ининтенсивность потока классификации отказа как критического (аварийного) на основе результатов диагностики: $\lambda_{23}^{(2)} = \frac{1 - P_{simple}}{T} \cdot \frac{m_{s_2^{(2)}}}{m_{s_1^{(2)}}}$

$\lambda_{41}^{(2)}$— интенсивность потока возобновления процесса ГРП после проведения сложного ремонта: $\lambda_{41}^{(2)} = a_2^{(2)}\left(m_{s_2^{(3)}} / m_{s_4^{(2)}} \right)$; $a_2^{(2)}$ — производительность одной бригады при проведении сложных ремонтно-восстановительных работ по ликвидации критических осложнений.

$\delta_5^{(2)}$— интенсивность успешного завершения ГРП на одной скважине. $\delta_5^{(2)} = a_5\left(m_{s_2^{(3)}} / m_{s_1^{(2)}} \right)$

Размеченный граф состояний и переходов для бригад по проведению ГРП $X_3(t)$ имеет следующий вид:



На этом графе $S_0^{(3)}$— бригада на базе и ожидает вызова; $S_1^{(3)}$ — бригада выезжает с базы на объект; $S_2^{(3)}$— бригада выполняет ГРП и очистки , а также проводит ремонтные работы в случае неисправностей и отказов; $S_3^{(3)}$— бригада возвращается с объекта на базу.

$\lambda_{01}^{(3)}$ — интенсивность вызова для проведения ГРП. $\lambda_{01}^{(3)} = a_1\left(m_{s_0^{(1)}} / m_{s_0^{(3)}} \right)$. где a_1=$const$ — интенсивность поступления на ГРП одной единицы объект.

$\lambda_{12}^{(3)}$ — интенсивность потока бригады, направляющихся к объекту: $\lambda_{12}^{(3)} = 1 / \tilde{t}_{12}^{(3)}$, где $\tilde{t}_{12}^{(3)}$ — среднее время переезда бригады от базы к объекту проведения ГРП, определяемое как:

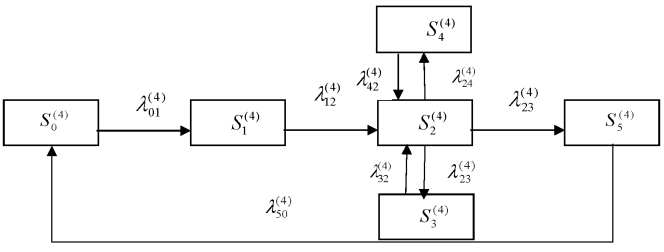
$$\overset{\vee}{t}_{12}^{(3)} = \left(t_{12}^{(3)1} + \cdots + t_{12}^{(3)j} + \cdots + t_{12}^{(3)n} \right) / n$$

где $t_{12}^{(3)\ j}$ — Время транспортировки от базы к j-объекту, n — число объектов.

$\lambda_{23}^{(3)}$ — интенсивность потока выполнения основных технологических операций ГРП. $\lambda_{23}^{(3)} = \frac{a_2 \cdot a_5}{a_2 + a_5}$

$\lambda_{30}^{(3)}$— интенсивность потока бригады, возвращающихся на базу. $\lambda_{12}^{(3)} = \lambda_{30}^{(3)}$

Размеченный граф состояний и переходов для единицы материально-технических ресурсов МТР (Флота ГРП) $X_4(t)$ имеет следующий вид:



$S_0^{(4)}$— Флот ГРП находится на базе в режиме ожидания; $S_1^{(4)}$— Флот ГРП получил вызов и совместно с бригадой направляется на объект; $S_2^{(4)}$ — С использованием флота ГРП выполняется технологический процесс; $S_3^{(4)}$ — Кра-

тковременный простой из-за отказа вспомогательных единиц флота (выход из строя одного насоса, неисправность датчиков) при сохранении его частичной работоспособности; $S_4^{(4)}$ — Флот ГРП выведен из строя и находится на ремонте вследствие критического отказа (блендера, станции управления или манифольдного блока); $S_5^{(4)}$ — Флот ГРП успешно завершил работу и возвращается на базу.

$\lambda_{01}^{(4)}$ — интенсивность вызова единица МТР на ГРП . $\lambda_{01}^{(4)} = a_1\left(m_{s_0^{(1)}} / m_{s_0^{(4)}} \right)$

Далее $\lambda_{12}^{(4)}$, $\lambda_{23}^{(4)}$, $\lambda_{50}^{(4)}$ и имеют тот же значение что и $\lambda_{01}^{(3)}$, $\lambda_{12}^{(3)}$,$\lambda_{23}^{(3)}$,$\lambda_{30}^{(3)}$ и т.е. $\lambda_{12}^{(3)} = \lambda_{12}^{(4)}, \lambda_{23}^{(3)} = \lambda_{23}^{(4)}, \lambda_{30}^{(3)} = \lambda_{50}^{(4)}$ при условии, что на одно ГРП требуется одна единица МТР.

$\lambda_{23}^{(4)}$— интенсивность потока возникновения отказов безрезервного (основного) оборудования, влекущих за собой полный простой всего комплекса флота ГРП: $\lambda_{24}^{(4)} = a_7 = const$

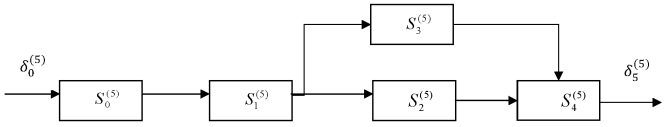
$\lambda_{32}^{(4)}$ — интенсивность потока завершения сложных ремонтно-восстановительных работ (РВР) и приведения флота ГРП в штатное рабочее состояние: $\lambda_{32}^{(4)} = a_1^{(4)}\left(m_{s_2^{(3)}} / m_{s_3^{(4)}} \right)$; $a_1^{(4)}$ — производительность одной ремонтной бригады по восстановлению основного оборудования флота ГРП.

$\lambda_{24}^{(4)}$ — интенсивность потока возникновения отказов вспомогательных единиц оборудования при сохранении общей работоспособности комплекса ГРП. $\lambda_{24}^{(4)} = a_8 = const$

$\lambda_{42}^{(4)}$ — интенсивность потока восстановления (оперативного ремонта) вспомогательных единиц оборудования флота ГРП и возвращения к полной производительности: $\lambda_{42}^{(4)} = a_2^{(4)}\left(m_{s_2^{(3)}} / m_{s_4^{(4)}} \right)$;

$a_2^{(4)}$ — Производительность одной бригады по ремонту и обслуживанию вспомогательного оборудования флота ГРП.

Размеченный граф состояний и переходов для единицы расходуемых материально-технических ресурсов (МТР) $X_5(t)$ имеет следующий вид:



$S_0^{(5)}$ — единица расходуемого МТР на базе; $S_1^{(5)}$— единица МТР транспортируется на объект; $S_2^{(5)}$— единица МТР участвует в ГРП. $S_3^{(5)}$— единица расходуемого МТР (вода и химреагенты) задействована в процессе корректирующей закачки для непосредственной ликвидации технологических рисков в скважине; $S_3^{(5)}$ — единица расходуемого МТР списывается.

$\delta_0^{(5)}$— интенсивность пополнения запаса расходуемого МТР;

$\lambda_{01}^{(5)}$— интенсивность вызова единица МТР на ГРП. $\lambda_{01}^{(5)} = \lambda_{01}^{(4)}$;

$\lambda_{12}^{(5)}$, $\lambda_{13}^{(5)}$— интенсивность транспортирования расходуемого МТР на объект: $\lambda_{12}^{(5)} = \lambda_{13}^{(5)} = \lambda_{12}^{(4)}$;

$\lambda_{24}^{(5)}$ — интенсивность расходования (списывания) МТР, задействованных в процессе гидравлического разрыва пласта: $\lambda_{24}^{(5)} = \lambda_{23}^{(4)} = \lambda_{23}^{(3)}$

$\lambda_{34}^{(5)}$— интенсивность расходования (списывания) МТР, задействованных в процессе корректирующей закачки: $\lambda_{34}^{(5)} = \lambda_{41}^{(2)} = \lambda_{31}^{(2)}$.

$\delta_5^{(5)}$— интенсивность расходования (списывания) МТР: $\lambda_{34}^{(5)} + \lambda_{24}^{(5)}$.

Здесь $m_{s_k^i}$ представляют собой средние численности состояний элементов системы ГРП, а параметры a_1, ..., a_8 определяются экспертным путем (руководителем проекта) либо автоматически извлекаются СППР из соответствующей базы данных [3].

На основе представленных графов СППР формирует систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику средних значений состояний процесса:

Объекты очистки (X_1):

$$\frac{dm_{s_0^{(1)}}}{d(t)} = \delta_0^{(1)} - \lambda_{01}^{(1)} m_{s_0^{(1)}} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{dm_{s_1^{(1)}}}{d(t)} = \lambda_{01}^{(1)} m_{s_0^{(1)}} + \lambda_{21}^{(1)} m_{s_2^{(1)}} + \lambda_{31}^{(1)} m_{s_3^{(1} - \delta_4^{(1)} m_{s_1^{(1)}} - ;$$

$$- \lambda_{12}^{(1)} m_{s_1^{(1)}} - \lambda_{13}^{(1)} m_{s_3^{(1)}} = 0$$

$$\frac{dm_{s_2^{(1)}}}{d(t)} = \lambda_{12}^{(1)} m_{s_1^{(1)}} - \lambda_{21}^{(1)} m_{s_2^{(1)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_3^{(1)}}}{d(t)} = \lambda_{13}^{(1)} m_{s_1^{(1)}} - \lambda_{31}^{(1)} m_{s_3^{(1)}} = 0;$$

$$N_{S^{(1)}} = m_{s_0^{(1)}} + m_{s_1^{(1)}} + m_{s_2^{(1)}} + m_{s_3^{(1)}} + \delta_0^{(1)} N_{S^{(1)}} - \delta_4^{(1)} m_{s_1^{(1)}}.$$

Объекты ГРП (X_2):

$$\frac{dm_{s_0^{(2)}}}{d(t)} = \delta_0^{(2)} - \lambda_{01}^{(2)} m_{s_0^{(2)}} = 0; \qquad (5)$$

$$\frac{dm_{s_1^{(2)}}}{d(t)} = \lambda_{01}^{(2)} m_{s_0^{(2)}} + \lambda_{31}^{(2)} m_{s_3^{(2)}} + \lambda_{41}^{(2)} m_{s_4^{(2)}} - ;$$
$$- \delta_3^{(2)} m_{s_1^{(2)}} - \lambda_{12}^{(2)} m_{s_1^{(2)}} = 0$$

$$\frac{dm_{s_2^{(2)}}}{d(t)} = \lambda_{12}^{(2)} m_{s_1^{(2)}} - \lambda_{23}^{(2)} m_{s_2^{(2)}} - \lambda_{24}^{(2)} m_{s_4^{(2)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_3^{(2)}}}{d(t)} = \lambda_{23}^{(2)} m_{s_2^{(2)}} - \lambda_{31}^{(2)} m_{s_3^{(2)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_4^{(2)}}}{d(t)} = \lambda_{24}^{(2)} m_{s_2^{(2)}} - \lambda_{41}^{(2)} m_{s_4^{(2)}} = 0;$$

$$N_{S^{(2)}} = m_{s_0^{(2)}} + m_{s_1^{(2)}} + m_{s_2^{(2)}} + m_{s_3^{(2)}} + m_{s_4^{(2)}} + .$$
$$+ \delta_0^{(2)} N_{S^{(2)}} - \delta_5^{(2)} m_{s_1^{(2)}}$$

Для Бригады (X_3) :

$$\frac{dm_{s_0^{(3)}}}{d(t)} = \lambda_{01}^{(3)} m_{s_0^{(3)}} - \lambda_{12}^{(3)} m_{s_1^{(3)}} = 0; \qquad (6)$$

$$\frac{dm_{s_1^{(3)}}}{d(t)} = \lambda_{12}^{(3)} m_{s_1^{(3)}} - \lambda_{23}^{(3)} m_{s_2^{(3)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_2^{(3)}}}{d(t)} = \lambda_{23}^{(3)} m_{s_2^{(3)}} - \lambda_{30}^{(3)} m_{s_3^{(3)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_3^{(3)}}}{d(t)} = \lambda_{30}^{(3)} m_{s_3^{(3)}} - \lambda_{01}^{(3)} m_{s_0^{(3)}} = 0;$$

$$N_{S^{(3)}} = m_{s_0^{(3)}} + m_{s_1^{(3)}} + m_{s_2^{(3)}} + m_{s_3^{(3)}}$$

Для Нерасходуемого МТР (X_4):

$$\frac{dm_{s_0^{(4)}}}{d(t)} = \lambda_{30}^{(4)} m_{s_3^{(4)}} - \lambda_{01}^{(4)} m_{s_0^{(4)}} = 0; \qquad (7)$$

$$\frac{dm_{s_1^{(4)}}}{d(t)} = \lambda_{01}^{(4)} m_{s_0^{(4)}} - \lambda_{12}^{(4)} m_{s_1^{(4)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_2^{(4)}}}{d(t)} = \lambda_{12}^{(4)} m_{s_1^{(4)}} + \lambda_{32}^{(4)} m_{s_3^{(4)}} + \lambda_{42}^{(4)} m_{s_4^{(4)}} - ;$$
$$- \lambda_{23}^{(4)} m_{s_2^{(4)}} - \lambda_{24}^{(4)} m_{s_2^{(4)}} - \lambda_{25}^{(4)} m_{s_2^{(4)}} = 0$$

$$\frac{dm_{s_3^{(4)}}}{d(t)} = \lambda_{23}^{(4)} m_{s_2^{(4)}} - \lambda_{32}^{(4)} m_{s_3^{(4)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_4^{(4)}}}{d(t)} = \lambda_{24}^{(4)} m_{s_2^{(4)}} - \lambda_{42}^{(4)} m_{s_4^{(4)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_5^{(4)}}}{d(t)} = \lambda_{25}^{(4)} m_{s_2^{(4)}} - \lambda_{50}^{(4)} m_{s_5^{(4)}} = 0;$$

$$N_{S^{(4)}} = m_{s_0^{(4)}} + m_{s_1^{(4)}} + m_{s_2^{(4)}} + m_{s_3^{(4)}} + m_{s_4^{(4)}} + m_{s_5^{(4)}}$$

Для расходуемого МТР (X_5)

$$\frac{dm_{s_0^{(5)}}}{d(t)} = \delta_0^{(5)} - \lambda_{01}^{(5)} m_{s_0^{(5)}} = 0: \qquad (8)$$

$$\frac{dm_{s_1^{(5)}}}{d(t)} = \lambda_{01}^{(5)} m_{s_0^{(5)}} - \lambda_{12}^{(5)} m_{s_1^{(5)}} + \lambda_{13}^{(5)} m_{s_1^{(5)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_2^{(5)}}}{d(t)} = \lambda_{12}^{(5)} m_{s_1^{(5)}} - \lambda_{24}^{(5)} m_{s_2^{(5)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_3^{(5)}}}{d(t)} = \lambda_{13}^{(5)} m_{s_1^{(5)}} - \lambda_{34}^{(5)} m_{s_3^{(5)}} = 0;$$

$$\frac{dm_{s_4^{(5)}}}{d(t)} = \lambda_{24}^{(5)} m_{s_2^{(5)}} + \lambda_{34}^{(5)} m_{s_3^{(5)}} = 0;$$

$$N_{S^{(5)}} = m_{s_0^{(5)}} + m_{s_1^{(5)}} + m_{s_2^{(5)}} + m_{s_3^{(5)}} +$$
$$+ \delta_0^{(5)} N_{S^{(5)}} + \delta_5^{(5)} m_{s_4^{(5)}}$$

Путём интегрирования данной системы дифференциальных уравнений выбранным численным методом (определяемым руководителем или системой автоматически) СППР определяет все необходимые численности состояний элементов системы гидроразрыва пласта и показатели эффективности её функционирования [3, 7,8].

Задача оптимизации эксплуатационных затрат и синтеза алгоритма динамического управлени

Обобщенный критерий оптимальности функционирования системы ГРП. Для комплексной оценки эффективности и динамического управления процессом ГРП формируется обобщенный критерий оптимальности. Если функционирование производственных объектов (скважин), процессов очистки, флота ГРП, бригад и материально-технических ресурсов описывается разработанной моделью динамики средних на основе выведенных выше систем дифференциальных уравнений (4)–(7), то критерий оптимальности (эффективности) функционирования всей организационно-технической

системы через средние численности состояний её элементов записывается в следующем виде.

Составляющие критерия для объектов очистки (скважин), объектов ГРП (скважин) и бригад:

$$f_1 = \int_0^T \left[\begin{array}{l} m_{s_0^{(1)}}(t) c_0^{(1)}(t) + m_{s_2^{(1)}}(t) c_2^{(1)}(t) + \\ + m_{s_3^{(1)}}(t) c_3^{(1)}(t) \end{array} \right] dt \rightarrow min \quad (9)$$

Где $c_0^{(1)}(t)$ — удельная стоимость потерь от простоя скважины в ожидании технологической очистки; $c_2^{(1)}(t)$ — удельная стоимость потерь от простоя скважины при проведении кратковременных ремонтных работ; $c_3^{(1)}(t)$ — удельная стоимость потерь от аварийного простоя скважины при ликвидации критических осложнений.

$$f_2 = \int_0^T \left[\begin{array}{l} m_{s_0^{(2)}}(t) c_0^{(2)}(t) + \\ + m_{s_2^{(2)}}(t) c_2^{(2)}(t) + \\ + m_{s_3^{(2)}}(t) c_3^{(2)}(t) + \\ + m_{s_4^{(2)}}(t) \left(c_4^{(2)}(t) + c_{matrial}(t) \right) \end{array} \right] dt \rightarrow \min \quad (10)$$

Где $c_0^{(2)}(t)$ — удельная стоимость потерь от простоя скважины в ожидании ГРП; $c_2^{(2)}(t)$ — дельная стоимость потерь от простоя скважины при проведении диагностических мероприятий; $c_3^{(2)}(t)$ — удельная стоимость потерь от технологического простоя при устранении легких неисправностей; $c_4^{(2)}(t)$ — удельная стоимость потерь от аварийного простоя при ликвидации критических рисков ГРП; $c_{matrial}(t)$ — удельная стоимость безвозвратных потерь основных материалов (проппанта и жидкости) при аварийном прекращении процесса ГРП.

$$f_3 = \int_0^T m_{s_0^{(3)}}(t) c_0^{(3)}(t) dt \rightarrow min \quad (11)$$

$c_0^{(3)}(t)$ — стоимость содержания одной бригады ГРП в единицу времени.

Составляющие критерия для МТР (Флота ГРП и Расходуемого МТР):

$$f_4 = \int_0^T \left[\begin{array}{l} m_{s_0^{(4)}}(t) c_0^{(4)}(t) + \\ + \left(c_3^{(4)}(t) + c_{\text{ремонт}} \right) m_{s_3^{(4)}}(t) + \\ + m_{s_4^{(4)}}(t) c_4^{(4)}(t) \end{array} \right] dt \rightarrow min \quad (12)$$

Где $c_0^{(4)}(t)$ — удельная стоимость потерь от неиспользования (простоя) флота ГРП в режиме ожидания; $c_3^{(4)}(t)$ — удельная стоимость потерь от кратковременного простоя флота ГРП при отказе вспомогательного оборудования; $c_{\text{ремонт}}$ — удельная стоимость ремонта единицы основного (безрезервного) оборудования флота ГРП; $c_4^{(4)}(t)$ — удельная стоимость ремонта флота ГРП при критическом отказе основного комплекса.

$$f_5 = \int_0^T \left[m_{s_0^{(5)}}(t) c_0^{(5)}(t) + m_{s_3^{(5)}}(t) c_3^{(5)}(t) \right] dt \rightarrow min \quad (13)$$

$c_0^{(5)}(t)$ — удельная стоимость потерь от «пролеживания» МТР на складе в режиме ожидания; $c_3^{(5)}(t)$ — стоимость дополнительных химических реагентов и технологической воды, расходуемых в процессе корректирующей закачки для ликвидации осложнений; T — период планирования, год.

Тогда обобщенный (комплексный) критерий оптимальности реализации ГРП имеет, учитывающий все составляющие эксплуатационной надежности имеет вид:

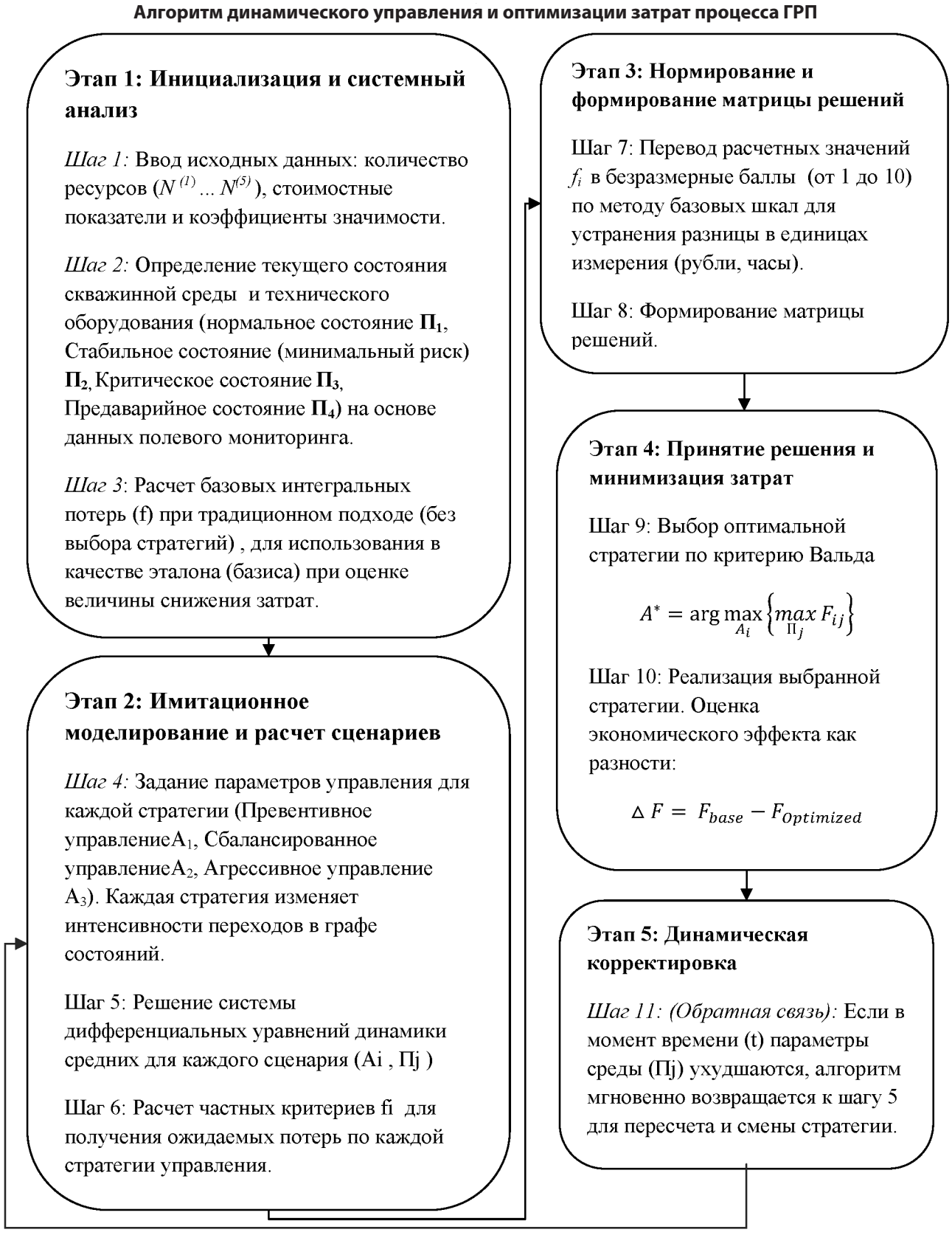
$$f\left(A_i.\Pi_j\right) = \sum_{i=1}^{i=5} \varphi_i \cdot f_i \rightarrow min \quad (14)$$

Где f_i — значения частных компонент критерия оптимальности (9)–(13), вычисленные для различных комбинаций стратегий управления (A_i) и состояний системы (Π_j); φ_i — экспертные весовые коэффициенты относительной важности частных критериев.

Заключение

В результате проведенного исследования разработан научно обоснованный математический аппарат и алгоритм динамического управления процессами гидравлического разрыва пласта (ГРП), направленный на оптимизацию эксплуатационных затрат и повышение технологической надежности. Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Выполнена системная декомпозиция сложного технологического комплекса ГРП на пять взаимосвязанных структурно-образующих элементов (производственные объекты, процессы очистки, флот ГРП, бригады и материально-технические ресурсы), что позволило учесть сквозные связи между ними.
2. Разработан комплекс графов состояний и переходов, интегрирующий штатные технологические режимы, а также специфические риски кратковременных технологических простоев и критических отказов.



Источник: Составлено автором на основании [7,8]

Рис. 1. Алгоритм динамического управления и оптимизации затрат

3. На основе метода динамики средних сформирована система дифференциальных уравнений Колмогорова, решение которой выбранными численными методами позволяет СППР определять средние численности состояний элементов системы в режиме реального времени.
4. Синтезирован обобщенный критерий оптимальности, объединяющий стоимостные показатели функционирования элементов и их эксплуатационную надежность в единый динамический функционал.
5. Разработан алгоритм динамического управления, реализующий гибкое автоматическое переключение между четырьмя управляющими стратегиями (стабильная, сбалансированная, превентивная и агрессивная) на основе фактического технического состояния оборудования и скважины, что обеспечивает гарантированную оптимизацию эксплуатационных затрат и минимизацию непроизводительного времени (НПВ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Степин, Ю.П. Адаптивная система поддержки принятия решений для разработки месторождений на арктическом шельфе / Ю.П. Степин, Н.С. Рыжов // Тезисы докладов 76-й Международной молодежной научной конференции. — Москва, 2022. — Т. 2. — С. 238–239.
2. Силин М.А. Технологические аспекты и материалы для гидр разрыва пласта / М.А. Силин, Л.А. Магадова, В.Н. Глущенко. — М., 2012. — 422 с.
3. Фетарони М., Степин Ю.П. Адаптивная система поддержки принятия решений для оптимизации организации процесса гидроразрыва пласта (ГРП) // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки.— 2026. — № 4. — С. 162–169.
4. Тараканов К.В. Аналитические методы исследования систем / К.В. Тараканов, Л.А. Овчаров, А.Н. Тырышкин. — М. : Сов. радио, 1974. — 240 с.
5. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. — М.: Наука, 1991. — 384 с.
6. Коган Б.М. Вероятностные модели информационно-вычислительных сетей на основе динамики средних / Б.М. Коган, А.Ф. Короганов // Автоматика и телемеханика. — 1970. — № 1. — С. 100–110.
7. Степин Ю.П. Компьютерные методы поддержки принятия управленческих решений в нефтегазовой промышленности / Э.А. Трахтенгерц, Ю.П. Степин, А.Ф. Андреев. — М. : СИНТЕГ, 2005. — 592 с.
8. Степин Ю.П., Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка управления нефтегазовыми технологическими процессами и производствами. Том 2. Методы поддержки принятия управленческих решений при планировании и динамик управления. — М. : МАКС Пресс, 2008. — 528 с.
9. Старосельский В.А. К вопросу об оптимизации некоторых систем массового обслуживания / В.А. Старосельский // Кибернетика.— 1967. — № 3. — С. 47–52.
10. Овчаров, Л.А. Математическая модель функционирования систем обслуживания нефтегазового производства / Л.А. Овчаров, Ю.П. Степин, Э.Ю. Есипова // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 1994. — № 8. — С. 23–26.

© Фетарони Малак (malakfie2@gmail.com); Стёпин Юрий Петрович (stepin.y@gubkin.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.43

ГРАФОВАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ В ПРОЦЕССЕ ОТБОРА ПЕРСОНАЛА

GRAPH MODEL OF DISTRIBUTED EXPERT ASSESSMENT IN THE PERSONNEL SELECTION PROCESS

I. Khismatov
V. Antonov

Summary. *Problem statement.* Traditional interview methods in Russian practice are characterized by a high degree of subjectivity, low inter-expert consistency, and lack of formalized mechanisms for cross-checking assessments. Existing decision support systems in personnel management do not integrate multiple expert assessments into a single management cycle with feedback, which is especially important for large Russian corporations and government agencies.
Methods. This study applies a systematic approach to formalizing the hiring process as a managed cycle within an organizational system. A graph model of distributed peer review has been developed that includes mechanisms for hierarchical decomposition of criteria and dynamic calibration of weighting coefficients, considering the specifics of Russian corporate governance.
Results. The structure of the evaluation graph with two verification cycles (triangles A–C–B and A–D–B) is proposed, where A is the recruiter, C is the head of the structural unit, D is the head of the department, and B is the candidate. The mechanism of hierarchical decomposition of expert nodes (X ⟶ X′) has been introduced, which allows to increase the detail of the assessment without loss of control. A closed feedback loop D ⟶ A has been formalized for adaptive adjustment of the weighting coefficients of the criteria, considering the strategic priorities of the organization.
Conclusions. The developed model increases the objectivity of management's hiring decisions by cross-checking assessments, reducing the impact of cognitive biases among individual experts, and considering the organization's strategic priorities at the departmental level. The model is adapted to the conditions of the Russian labor market, considering the requirements of the legislation on personal data protection and the specifics of corporate culture.

Keywords: management in organizational systems, personnel selection, graph model, distributed decision-making, expert assessment, assessment verification, hierarchical decomposition.

Хисматов Ильдар Эльмирович
аспирант, Уфимский университет науки и технологии
khismatov.ildar@mail.ru
Антонов Вячеслав Викторович
доктор технических наук, профессор,
Уфимский университет науки и технологии
antonov.v@bashkortostan.ru

Аннотация. *Постановка проблемы*. Традиционные методы проведения собеседований в российской практике характеризуются высокой степенью субъективности, низкой межэкспертной согласованностью и отсутствием формализованных механизмов перекрестной проверки оценок. Существующие системы поддержки принятия решений в управлении персоналом не интегрируют множественные экспертные оценки в единый управленческий цикл с обратной связью, что особенно актуально для крупных российских корпораций и государственных учреждений.
Методы. В данном исследовании применяется системный подход к формализации процесса найма как управляемого цикла в рамках организационной системы. Разработана графовая модель распределенной экспертной оценки, включающая механизмы иерархической декомпозиции критериев и динамической калибровки весовых коэффициентов с учетом специфики российского корпоративного управления.
Результаты. Предложена структура графа оценки с двумя циклами проверки (треугольники A–C–B и A–D–B), где A — рекрутер, C — руководитель структурного подразделения, D — руководитель отдела, а B — кандидат. Введен механизм иерархической декомпозиции узлов экспертов (X ⟶ X′), позволяющий повысить детализацию оценки без потери контроля. Формализована замкнутая петля обратной связи D ⟶ A для адаптивной корректировки весовых коэффициентов критериев с учетом стратегических приоритетов организации.
Выводы. Разработанная модель повышает объективность решений руководства о найме персонала за счет перекрестной проверки оценок, снижения влияния когнитивных искажений среди отдельных экспертов и учета стратегических приоритетов организации на уровне подразделений. Модель адаптирована к условиям российского рынка труда с учетом требований законодательства о защите персональных данных и специфики корпоративной культуры.

Ключевые слова: управление в организационных системах, отбор персонала, графовая модель, распределенное принятие решений, экспертная оценка, проверка оценок, иерархическая декомпозиция.

Введение

Процесс подбора персонала является критически важным управленческим циклом в организационных системах, напрямую влияющим на качество человеческого капитала и стратегическую адаптивность организации. На российском рынке труда, характеризующемся высокой динамичностью кадровых изменений и растущей конкуренцией за квалифицированных специалистов, задача повышения эффективности процедур отбора особенно актуальна.

Традиционные методы проведения собеседований, основанные на индивидуальной экспертной оценке специалистами по кадрам или руководителями отделов, демонстрируют системные ограничения. Согласно

исследованиям, прогностическая валидность неструктурированных собеседований колеблется от r = 0,20 до 0,30, что указывает на высокий уровень субъективности и значительное влияние когнитивных искажений. В российской практике эта проблема усугубляется недостаточной формализацией критериев оценки и отсутствием единых стандартов проведения собеседований в большинстве организаций. Современные подходы к автоматизации кадровых процессов в России в основном сосредоточены на рутинных операциях (первичный анализ резюме, планирование встреч) или изолированных алгоритмах оценки, не интегрируя их в единую систему управления с механизмами обратной связи и калибровки. Отсутствие формализованных процедур перекрестной проверки оценок и учета стратегических приоритетов на различных организационных уровнях снижает качество решений руководства о найме, особенно в крупных компаниях и государственных корпорациях, где процессы утверждения многоуровневы.

Целью данного исследования является повышение объективности и прогностической достоверности решений руководства в процессе найма путем разработки графовой модели распределенной экспертной оценки с циклами валидации и иерархической декомпозицией критериев, адаптированной к условиям российского рынка труда.

Проблемы традиционной экспертной оценки в российской практике

Исследования в области управленческой психологии и управления персоналом последовательно демонстрируют ограничения индивидуальной экспертной оценки. Эффект ореола, подтверждение гипотез, эффект привязки и сходство интервьюеров вносят систематические искажения в процесс принятия решений. В российском корпоративном контексте эти искажения могут усугубляться неформальными методами принятия решений и отсутствием прозрачности в процедурах отбора.

Метааналитические исследования показывают, что структурированные интервью с участием нескольких экспертов демонстрируют более высокую валидность (r = 0,50–0,60) по сравнению с неструктурированными форматами [4, 8]. Однако внедрение таких практик в российских организациях сталкивается с рядом препятствий: сопротивление изменениям со стороны линейных менеджеров, отсутствие методической подготовки рекрутеров и отсутствие нормативной базы, регулирующей процедуры коллективной оценки.

Практика групповых интервью и принятия решений на основе консенсуса

Практика проведения интервью с участием нескольких экспертов одновременно (панельные интервью) получила широкое распространение в корпоративной среде крупных российских компаний [9, 10]. Исследования показывают, что агрегирование независимых оценок снижает дисперсию ошибок и повышает надежность решений [11].

Однако эти подходы не формализуют механизмы разрешения разногласий между экспертами и не учитывают иерархическую структуру организационных систем, характерную для российского управления. В частности, в крупных компаниях и государственных учреждениях решения по этому вопросу часто требуют координации на нескольких уровнях управления, что создает необходимость разработки моделей, гармонизирующих эту спецификацию.

Применение графовых моделей в рекрутинге

Использование графовых нейронных сетей для сопоставления кандидатов и вакансий демонстрирует потенциал графовых подходов в HR-аналитике [12, 13]. Исследования показывают, что учет структурных связей между компетенциями, требованиями к должности и профилями кандидатов повышает точность прогнозирования [14].

В российском контексте эти подходы могут быть адаптированы к специфике местного рынка труда: региональной специфике, отраслевым требованиям и нормативным ограничениям, связанным с обработкой персональных данных (Федеральный закон № 152). Однако существующие исследования в основном сосредоточены на алгоритмическом аспекте, не рассматривая графовые модели как инструмент формализации принятия управленческих решений.

Графовая модель распределённого оценивания

Пусть процесс оценки описывается ориентированным взвешенным графом:

$$G = (V, E, W),$$

где:

- $V = \{A, B, C, D\}$ — множество вершин, соответствующих участникам процесса;
- $E \subseteq V \times V$ — множество направленных рёбер, отражающих потоки оценочных сигналов;
- $W \in R^{|V|\times|V|}$ — матрица весов экспертного влияния.

Ролевая структура вершин (адаптирована к российской организационной практике) (рис. 1):

- A (специалист по подбору персонала) — координатор процесса, оценка соответствия корпоративной культуре и процессным требованиям;

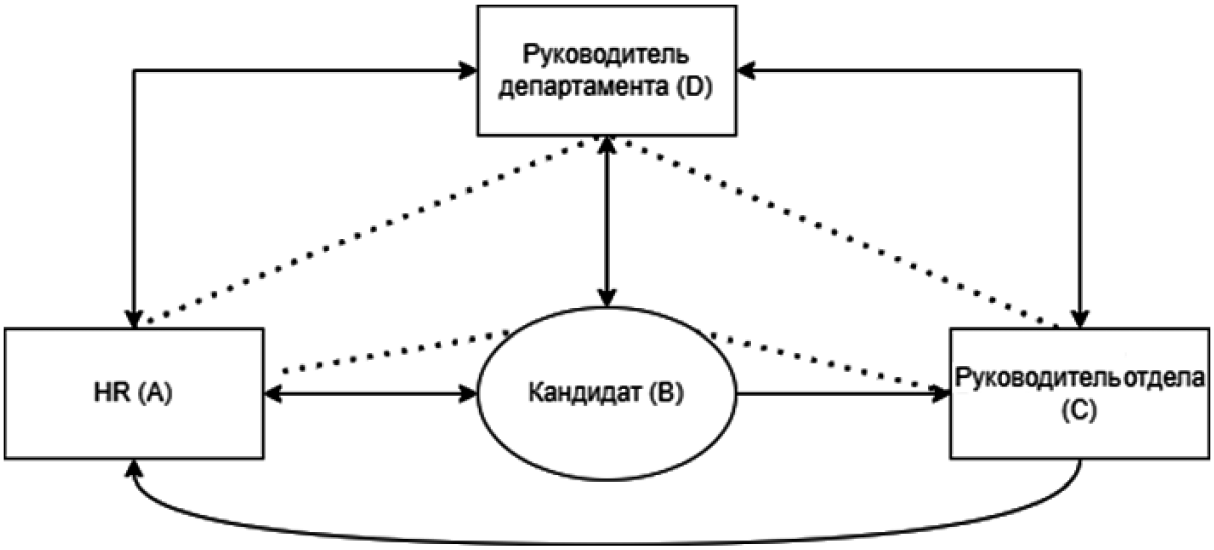


Рис. 1. Ролевая структура вершин

- *B* (кандидат) — объект оценивания, источник мультимодальных данных;
- *C* (руководитель структурного подразделения) — эксперт по профессиональным компетенциям и операционным задачам;
- *D* (руководитель департамента) — стратегический контролёр, оценка соответствия долгосрочным целям организации.

Структура рёбер: $E = \{(A,C), (C,A), (C,B), (B,C), (B,D), (D,A), (A,B), (D,C)\}$

Замкнутый контур $A \leftrightarrow C \leftrightarrow B \rightarrow D \rightarrow A$ обеспечивает циркуляцию оценочных сигналов и возможность корректировки решений на основе обратной связи.

Треугольники валидации

В графе выделяются два треугольных подграфа, выполняющих функцию перекрёстной валидации:

Треугольник 1: ΔACB

Обеспечивает согласование процессных требований (роль *A*) с профессиональными компетенциями (роль *C*). Метрика согласованности:

$$\kappa_{ACB} = 1 - (1/|E_\Delta|) \times \Sigma_{(u,v)\in E_\Delta} ||sim(s_u, s_v) - \theta_{consensus}||^2,$$

где s_u, s_v — векторы оценок экспертов, $sim(\cdot)$ — метрика косинусного сходства, $\theta_{consensus}$ — порог управленческого согласия.

Треугольник 2: ΔADB

Добавляет уровень стратегической валидации через участие руководителя департамента (роль *D*). Позволяет выявить рассогласования между операционной необходимостью (оценка *C*) и стратегическими приоритетами (оценка *D*), что особенно важно в условиях российских корпораций с выраженной иерархией управления.

Механизм обратной связи и калибровки

Замыкание $D \rightarrow A$ формирует адаптивный контур корректировки весовых коэффициентов. Пусть Y_{post} — фактические результаты работы нанятого сотрудника через период T (ключевые показатели эффективности, успешность адаптации, оценка руководителя). Тогда обновление весов осуществляется по правилу:

$$W^{(t+1)} = W^{(t)} + \eta \times \nabla W L(Y\{post\}, P),$$

где $L(\cdot)$ — функция потерь, отражающая расхождение между прогнозом P и фактическим результатом, η — скорость обучения.

Данный механизм обеспечивает эволюционную настройку системы подбора под изменяющиеся требования организации, что соответствует принципам адаптивного управления в российских компаниях.

Функция агрегации и принятия решений

Итоговая оценка кандидата формируется как взвешенная комбинация мнений экспертов:

$$P = \sigma(\lambda_A \times s_A + \lambda_C \times s_C + \lambda_D \times s_D),$$

где $\lambda_A, \lambda_C, \lambda_D$ — динамические веса, $\sigma(\cdot)$ — сигмоидальная функция нормализации.

Управленческое решение принимается по правилу:

«Рекомендован», если $P \geq \theta_{accept}$;

«Отклонён», если $P \le \theta\_reject$;

«Дополнительный этап», в остальных случаях.

Пороги *θ_accept, θ_reject* адаптируются в зависимости от критичности вакансии и уровня организационного риска, что позволяет учитывать специфику различных должностей в российской практике.

Учет иерархичности и корпоративной культуры

Российский менеджмент характеризуется высокой дистанцией власти (по Г. Хофстеде) и централизацией принятия решений. Это учитывается в модели через **асимметрию весовых коэффициентов** и **динамические пороги принятия решений**.

Вычислительный эксперимент и имитационное моделирование

Постановка эксперимента

Целью эксперимента является количественная оценка эффективности механизмов валидации и адаптивной калибровки весов в предложенной графовой модели $G=(V, E, W)$. В качестве базового метода (baseline) выбрана традиционная практика принятия решений на основе простого среднего арифметического оценок экспертов без учета их иерархического веса и согласованности: $Pbase=3sA+sC+sD$

В эксперименте моделируется процесс оценки $N=100$ кандидатов. Для каждого кандидата генерируются векторы оценок экспертов $sA,sC,sD \in [0,1]$, где 1 — максимальное соответствие, 0 — полное несоответствие.

Параметры модели:

- Начальные веса экспертов: $\lambda A(0)=0.33$, $\lambda C(0)=0.33$, $\lambda D(0)=0.34$
- Порог консенсуса: $\theta consensus=0.8$.
- Скорость обучения (learning rate): $\eta=0.1$.
- Функция потерь L рассчитывается как квадратичное отклонение прогноза P от «идеального» результата *Ypost* (в моделировании *Ypost* формируется как взвешенная сумма истинных компетенций кандидата с добавлением шума).

Сценарии моделирования

Для анализа устойчивости модели были рассмотрены три типовых сценария взаимодействия экспертов, характерные для российской корпоративной практики:

1. **Сценарий «Консенсус»:** Оценки всех экспертов (*A*,*C*,*D*) высоко коррелированы. Разброс мнений минимален.
2. **Сценарий «Конфликт A↔C» (Рекрутер vs Линейный руководитель):** Рекрутер (*A*) дает высокую оценку soft-skills и культуре, но линейный руководитель (*C*) низкую оценку hard-skills. Руководитель департамента (*D*) занимает нейтральную позицию. Этот сценарий проверяет работу треугольника валидации ΔACB.
3. **Сценарий «Конфликт C↔D» (Операционист vs Стратег):** Линейный руководитель (*C*) высоко оценивает кандидата за текущие навыки, но руководитель департамента (*D*) низко оценивает стратегический потенциал. Рекрутер (*A*) поддерживает кандидата. Этот сценарий проверяет треугольник ΔADB и механизм эскалации.

Результаты моделирования

Динамика метрики согласованности *к*

На Рисунке 2 представлена динамика метрики согласованности *к* в зависимости от сценария.

- **В сценарии 1 (Консенсус):** Значение *к* стабильно держится выше порога 0.9. Система принимает решения быстро, без активации процедур эскалации.
- **В сценарии 2 (Конфликт A↔C):** Наблюдаются периодические падения *к* ниже порогового значения $\kappa min=0.6$. Это сигнализирует системе о необходимости пересмотра весов. В отличие от базового метода, который просто усредняет конфликтующие оценки (давая ложноположительный или ложноотрицательный результат), графовая модель фиксирует «зону неопределенности» и инициирует дополнительный этап проверки.
- **В сценарии 3 (Конфликт C↔D):** Снижение *к* носит более устойчивый характер, так как разногласие затрагивает стратегический уровень. Модель демонстрирует рост влияния узла *D* в итоговом решении.

Адаптивная калибровка весовых коэффициентов

Рисунок 3 иллюстрирует изменение весовых коэффициентов λA, λC, λD в процессе прохождения серии кандидатов в Сценарии 3.

- **Наблюдение:** В начале эксперимента веса равны. По мере поступления данных о том, что кандидаты, одобренные только руководителем *C* (но отвергнутые *D*), показывают низкие результаты *Ypost*, вес λC постепенно снижается с 0.33 до 0.25, а вес λD возрастает до 0.45.
- **Интерпретация:** Модель автоматически «понимает», что в данном контексте стратегическое видение департамента важнее текущих операционных навыков, и корректирует формулу агрегации *P*. Традиционное среднее арифметическое не обладает свойством адаптивности и продолжает

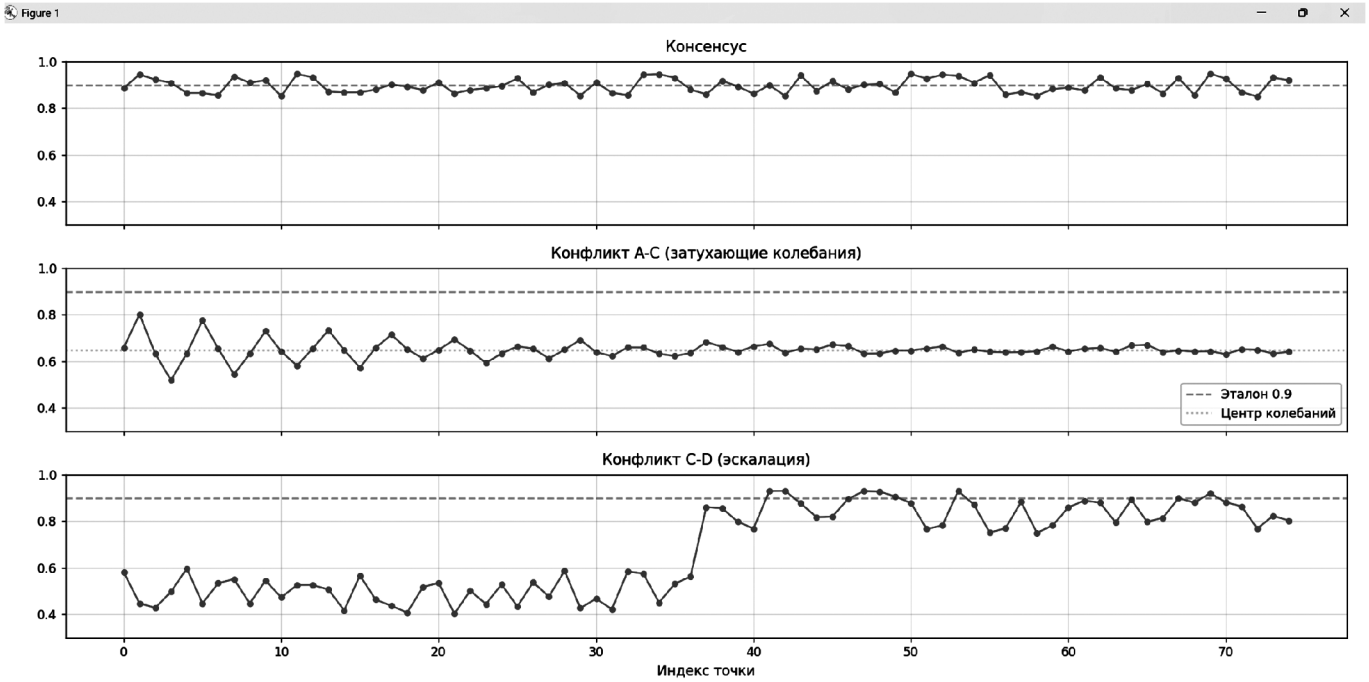


Рис. 2. Динамика метрики согласованности *к* в зависимости от сценария по оси X — номер кандидата/итерация, по оси Y — значение к от 0 до 1

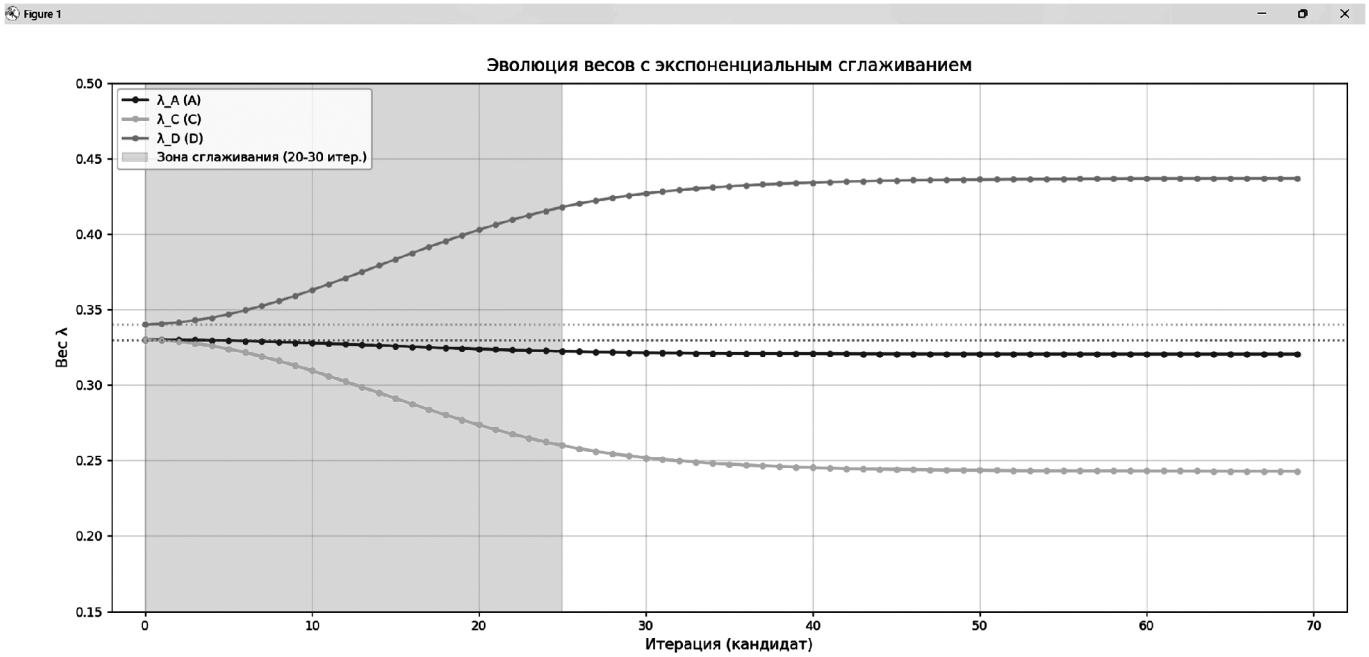


Рис. 3. Изменение весовых коэффициентов

придавать равный вес всем мнениям, что приводит к снижению прогностической валидности.

Сравнение точности прогнозирования

В Таблице 1 приведены результаты сравнения предлагаемой модели (Pgraph) и базового метода по метрике доли верно предсказанных успехов/неудач кандидата.

Вывод по таблице: Наибольший прирост эффективности наблюдается в конфликтных сценариях (2 и 3).

Таблица 1.

Результаты сравнения предлагаемой модели и базового метода по метрике Accuracy

Сценарий	Точность базового метода (Pbase)	Точность графовой модели (Pgraph)	Прирост эффективности
1. Консенсус	78 %	80 %	+2 %
2. Конфликт A↔C	65 %	82 %	+17 %
3. Конфликт C↔D	62 %	85 %	+23 %
Среднее	68.3 %	82.3 %	+14 %

Это подтверждает гипотезу о том, что формализованная перекрестная валидация и учет иерархии наиболее востребованы именно в ситуациях неопределенности и разногласий, которые часто встречаются при найме на сложные позиции.

Заключение

В данной статье разработана графическая модель распределения экспертных оценок кандидатов в процессе найма, адаптированная к условиям российского рынка труда. Модель формализует процесс как управляемую структурную организационную систему с двумя треугольниками валидации (A-C-B и A-D-B), механизмом иерархической декомпозиции соответствующих переменных ($X \rightarrow X'$) и замкнутой обратной связью для динамической переменной весовых коэффициентов.

Научная новизна заключается в интеграции распределенного принятия решений, перекрестной валидации и иерархического утверждения в единую формальную структуру, совместимую с модулями алгоритмического искусственного интеллекта и требованиями российского законодательства.

Практическое применение модели позволяет повысить объективность управленческих решений, снизить влияние когнитивных искажений отдельных экспертов и согласовать характеристики эффективности со стратегическими приоритетами организации. Дальнейшие исследования будут сосредоточены на эмпирической валидации моделей в российских корпорациях и разработке программного прототипа для менеджеров, работающих с существующими системами управления персоналом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берталанфи Л. фон. Общая теория систем. Критический обзор // Исследования по общей теории систем. М.: Прогресс, 1969. С. 23–82.
2. Акофф Р. О целеустремлённых системах // Исследования по общей теории систем. М.: Прогресс, 1971. С. 108–134.
3. Schmidt F.L., Hunter J.E. Development of a causal model of processes determining job performance // Current Directions in Psychological Science. 1992. Vol. 1, No. 3. P. 89–92.
4. Levashina J., Hartwell C.J., Morgeson F.P., Campion M.A. The structured employment interview: Narrative and quantitative review of the research literature // Personnel Psychology. 2014. Vol. 67, No. 1. P. 241–293.
5. Marler J.H., Boudreau J.W. An evidence-based review of HR Analytics // The International Journal of Human Resource Management. 2017. Vol. 28, No. 1. P. 3–26.
6. Tambe P., Cappelli P., Yakubovich V. Artificial intelligence in human resources management: Challenges and a path forward // California Management Review. 2019. Vol. 61, No. 4. P. 15–42.
7. Тверски А., Канеман Д. Суждение в условиях неопределённости: эвристики и искажения // Психологический журнал. 2005. Т. 26, № 4. С. 78–95.
8. Huffcutt A.I., Conway J.M., Roth P.L., Stone N.J. Identification and meta-analytic assessment of psychological constructs measured in employment interviews // Journal of Applied Psychology. 2001. Vol. 86, No. 5. P. 897–918.
9. Campion M.A., Palmer D.K., Campion J.E. A review of structure in the selection interview // Personnel Psychology. 1997. Vol. 50, No. 3. P. 655–702.
10. Иванов С.В., Петрова А.Н. Коллективные методы оценки кандидатов в российских компаниях // Вестник Московского университета. Серия 14: Психология. 2021. № 3. С. 45–62.
11. Клемен Р.Т., Уинклер Р.Л. Комбинирование вероятностных распределений от экспертов в анализе рисков // Управление рисками. 2020. № 2. С. 34–49.
12. Frazzetto F., Haq I. Graph Neural Networks for Candidate-Job Matching: An Inductive Approach // arXiv preprint arXiv:2203.12345. 2022.
13. Zhang Y., Chen X. Knowledge Graph-based Person-Job Fit // Proceedings of the 28th ACM SIGKDD Conference. 2022. P. 4567–4575.
14. Сидоров А.А., Козлова Е.М. Применение графовых моделей в задачах подбора персонала // Информационные технологии и управление. 2024. № 1. С. 23–35.
15. Месарович М., Мако Д., Такахара Я. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973.
16. Саймон Г.А. Архитектура сложности // Системные исследования. М.: Наука, 1973. С. 45–67.
17. Джинсен М., Меклинг У. Теория фирмы: поведение менеджеров, агентские издержки и структура собственности // Корпоративные финансы. 2018. № 4. С. 12–31.
18. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. М.: ЛИБРОКОМ, 2011.

© Хисматов Ильдар Эльмирович (khismatov.ildar@mail.ru); Антонов Вячеслав Викторович (antonov.v@bashkortostan.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.44

ПОДСИСТЕМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУР ТРАНСПОРТНЫХ ОПЕРАЦИЙ, РЕАЛИЗУЕМЫХ В РАМКАХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

THE SUBSYSTEM FOR DESIGN AND OPTIMIZATION OF TRANSPORT OPERATIONS STRUCTURES IMPLEMENTED WITH IN THE MACHINE-BUILDING ENTERPRISE

I. Khrustaleva
M. Khrustalev
S. Stepanov
L. Chernykh

Summary. Comprehensive optimization of traffic flow parameters is one of the key tasks of the technological preparation of machine-building production. The process of planning traffic flows can be divided into two stages: the first stage is the design of the structures of individual transport operations; the second stage — structural and parametric optimization of basic models of transport operations designed within the framework of the first stage. The design of transport operation structures is based on the principle of uniform movement of cargo volume within the analyzed scheduling period. The determination of the number of transport operations is based on the minimum load factor of the vehicle. The determination of the base time for the start of the implementation of the relevant transport operations within the studied scheduling period is based on the principle of uniformity of the implementation cycle of operations. The result of the design module is a set of basic parametric models of transport operations planned for implementation within the studied period of scheduling. These parametric models are the basis for the optimization module. Optimization of the structure and parameters of transport operations is carried out based on a vector optimization criterion consisting of four targets. Also, within the framework of the optimization model, many control parameters, input, and output parameters, as well as boundary conditions for the implementation of the model are formed.

Keywords: production preparation, transport operation, Pareto-optimization, transferred cargo, vector optimization criterion.

Хрусталева Ирина Николаевна
Кандидат технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
irina.khrustaleva@mail.ru
Хрусталев Михаил Борисович
ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
m320prk1@rambler.ru
Степанов Сергей Николаевич
Кандидат технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
stepanov56@mail.ru
Черных Лариса Георгиевна
Кандидат технических наук,
ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
2904180@mail.ru

Аннотация. Комплексная оптимизация параметров транспортных потоков является одной из ключевых задач этапа технологической подготовки машиностроительного производства. Процесс планирования транспортных потоков может быть разделен на два этапа: первый этап — проектирование структур отдельных транспортных операций; второй этап — структурная и параметрическая оптимизация базовых моделей транспортных операций, спроектированных в рамках первого этапа. Проектирование структур транспортных операций базируется на принципе равномерности перемещения объема грузов в рамках анализируемого периода календарного планирования. Определение количества транспортных операций производится на основе минимального коэффициента загрузки транспортного средства. Определение базового времени начала реализации соответствующих транспортных операций в рамках исследуемого периода календарного планирования базируется на принципе равномерности такта реализации операций. Результатом выполнения модуля проектирования является множество базовых параметрических моделей транспортных операций, планируемых для реализации в рамках исследуемого периода календарного планирования. Данные параметрические модели являются базовыми для модуля оптимизации. Оптимизация структуры и параметров транспортных операций производится на основании векторного критерия оптимизации, состоящего из четырех целевых показателей. Также в рамках оптимизационной модели сформировано множество параметров управления, входных и выходных параметров, а также граничные условия реализации модели.

Ключевые слова: технологическая подготовка производства, транспортная операция, Парето-оптимизация, перемещаемый груз, векторный критерий оптимизации.

Введение

Производственный процесс на машиностроительных предприятиях имеет сложную структуру [1]. Одним из ключевых элементов, непосредственно влияющих на эффективность реализации производственного процесса, является транспортный поток, который состоит из множества транспортных операций [2,3]. К основным критериям эффективности транспортных потоков, реализуемых в рамках производственной системы, можно отнести [4,5,6,7]:

- Время реализации отдельных транспортных операций (продолжительность логистических циклов);
- Операционные затраты, возникающие в процессе реализации транспортных операций.
- Производительность транспортных операций, т.е. количество груза перемещаемого в рамках соответствующей транспортной операции.
- Эффективность использования транспортных средств в процессе реализации соответствующих транспортных операций.

В основе процесса оптимизации параметров транспортного потока лежит анализ большого количества структурированных и взаимосвязанных между собой данных, характеризующих условия реализации отдельных транспортных операций [8,9]. Массивы структурированных данных, характеризующих соответствующие параметры транспортных операций, будут являться основой для проведения многокритериального анализа и выбора оптимального варианта реализации транспортных потоков [10,11].

Эффективным инструментом повышения эффективности технологической подготовки производства в части организации транспортных потоков является разработка оптимизационной модели, позволяющей проводить многофакторный анализ процесса [12,13]. Для решения задач оптимизации широко применяется метод Парето-оптимизации. Данный метод оптимизации предполагает определение оптимального варианта реализации процесса с учетом выбранной стратегии оптимизации [14, 15]. Таким образом, целью исследования является повышение эффективности технологической подготовки производства в части планирования транспортных потоков, реализуемых в рамках машиностроительного предприятия, за счет их структурной и параметрической оптимизации.

Для достижения поставленной цели исследования определены следующие задачи: проведение структурного анализа исследуемого процесса и определение его структурных элементов; разработка алгоритма формирования структур транспортных операций; определение множества целевых показателей; формирование векторного критерия оптимизации, множества параметров управления и граничных условий реализации модели. Объектом исследования является транспортная операция, реализуемая в рамках машиностроительного предприятия.

Описание системы проектирования транспортных операций, реализуемых в рамках машиностроительного предприятия

Процесс проектирования структур транспортных операций, реализуемых в рамках машиностроительного предприятия, состоит из пяти этапов (рисунок 1):

1. Этап 1: Определение количества транспортных операций, выполняемых в рамках s-го периода календарного планирования.
2. Этап 2: Формирование подмножества базовых точек начала реализации соответствующих транспортных операций.
3. Этап 3: Формирование допустимого подмножества единичных транспортных операций, выполняемых в рамках соответствующих базовых точек, начала реализации транспортных операций.
4. Этап 4: Формирование базового и вариативного подмножеств единичных транспортных операций, выполняемых в рамках соответствующих базовых точек, начала реализации транспортных операций.
5. Формирование структурных матриц транспортных операций для соответствующих базовых точек начала реализации транспортных операций.

В данном случае единичной транспортной операцией является операция по перемещению соответствующей партии изделий между двумя смежными технологическими операциями согласно установленному технологическому маршруту обработки.

Алгоритм проектирования структур транспортных операций представлен на рисунке 1.

Расчет количества транспортных операций, реализуемых в рамках s-ой рабочей смены, выполняемых с применением k-ой единицы транспортного средства i-го типа, производится по формуле:

$$\left(N_{ik}^{Vah/TrOp}\right)_s^{CPSp5} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{iks}^{CPSp5/Unit}} m_i^{Cargo}}{G_{ik}^{Vah} \cdot \left(K_{ik}^{Vah}\right)^{av} \cdot \left(N_{ik}^{Vah/TypeTrS}\right)_s^{CPSp5/av}},$$

$$Cargo_i \in \left(M_{ik}^{Vah/Cargo}\right)_s^{CPSp5}$$

$$\left(N_{ik}^{Vah/TrOp}\right)_s^{CPSp5} \rightarrow max,$$

$$\left(N_{ik}^{Vah/TrOp}\right)_s^{CPSp5} \geq 1, \left(N_{ik}^{Vah/TrOp}\right)_s^{CPSp5} \in \mathbb{Z},$$

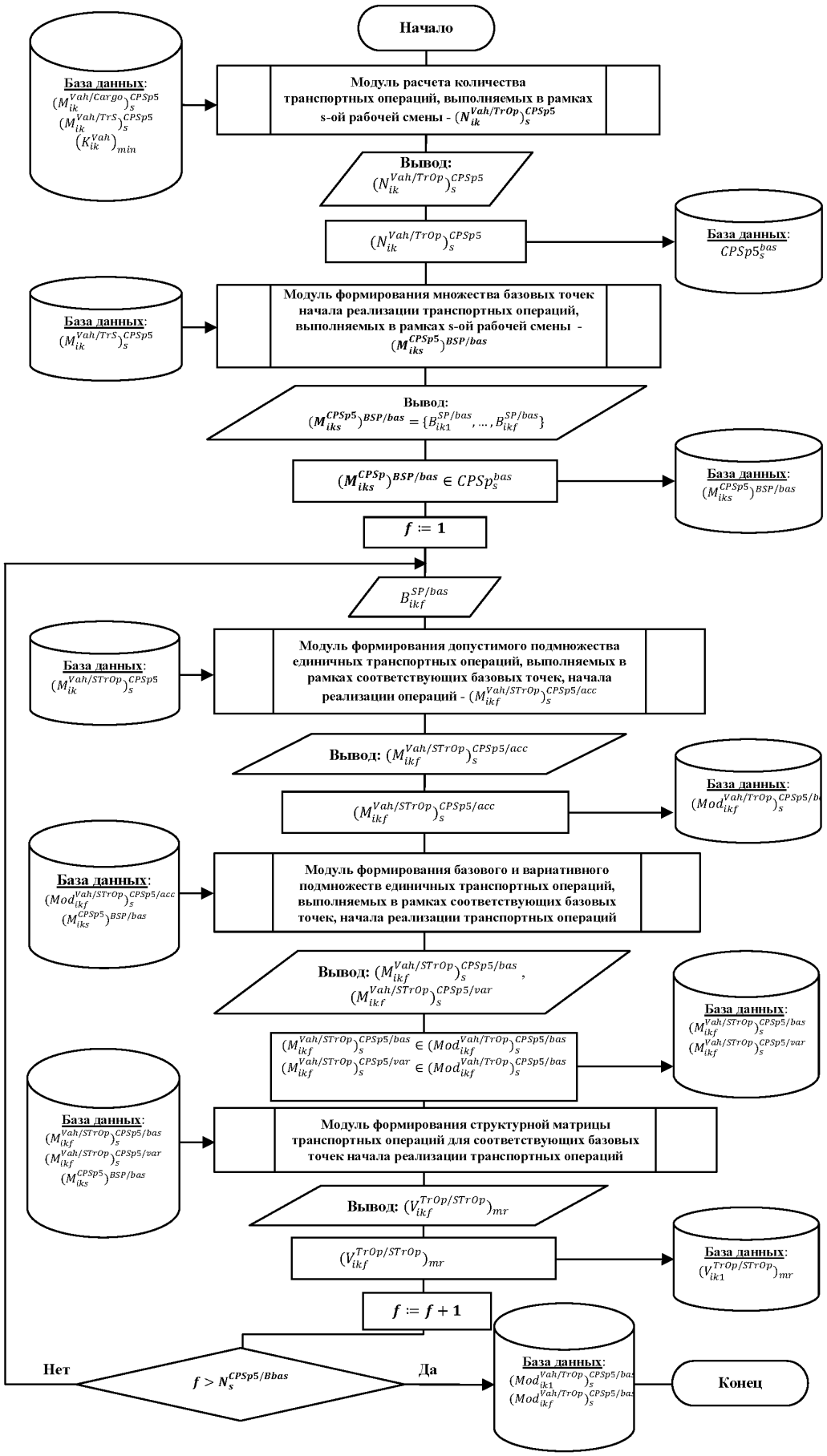


Рис. 1. Алгоритм формирования структур транспортных операций

где $\left(N_{ik}^{Vah/TrOp}\right)_s^{CPSp5}$ — параметр, характеризующий количество транспортных операций, реализуемых в рамках s-ой рабочей смены с применением k-ой единицы транспортного средства i-го типа, шт.; m_i^{Cargo} — параметр, характеризующий массу i-го груза, кг.; $Cargo_i$ — параметрическая модель i-го наименования груза; $\left(M_{ik}^{Vah/Cargo}\right)_s^{CPSp5}$ — множество грузов, планируемых для перемещения в рамках s-ой рабочей смены с применением k-ой единицы транспортного средства i-го типа; G_{ik}^{Vah} — параметр, характеризующий величину грузоподъемности k-ой единицы транспортного средства i-го типа, т.; $\left(K_{ik}^{Vah}\right)^{av}$ — параметр, характеризующий среднюю величину коэффициента загрузки k-ой единицы транспортного средства i-го типа; $\left(N_{ik}^{Vah/TypeTrS}\right)_s^{CPSp5/av}$ — параметр, характеризующий среднее количество типов транспортных участков, реализуемых в структуре транспортных операций, выполняемых в рамках s-ой рабочей смены с применением k-ой единицы транспортного средства i-го типа, шт.

Определение величин базовых значений начальных точек реализации соответствующих транспортных операций производится на основании принципа ритмичности, т.е. реализация транспортных операция должна производится через равные промежутки времени в рамках соответствующего периода календарного планирования. Таким образом, определение значений данных параметров производится на основании зависимостей:

$$\left(B_{ik1}^{TrOp}\right)^{SP/bas} = \min\left(\left(B_{ik1}^{STrOp}\right)^{SP},\ldots,\left(B_{ikr}^{STrOp}\right)^{SP}\right),$$

$$\left(B_{ik1\ldots r}^{STrOp}\right)^{SP} \in STrOp_{1\ldots r},\ STrOp_{1\ldots r} \in \left(M_{opt}^{STrOp}\right)_s^{CPSp5}$$

.....

$$\left(B_{ik(f-1)}^{TrOp}\right)^{SP/bas} = \left(B_{ik(f-2)}^{TrOp}\right)^{SP/bas} + \left(\delta\right)^{SP/bas}$$

$$\left(B_{ikf}^{TrOp}\right)^{SP/bas} = \max\left(\left(B_{ik1}^{STrOp}\right)^{SP},\ldots,\left(B_{ikr}^{STrOp}\right)^{SP}\right),$$

$$\left(B_{ik1\ldots r}^{STrOp}\right)^{SP} \in STrOp_{1\ldots r},\ STrOp_{1\ldots r} \in \left(M_{opt}^{STrOp}\right)_s^{CPSp5}$$

$$\left(\delta\right)^{SP/bas} = \frac{\left(B_{ik1}^{TrOp}\right)^{SP/bas} + \left(B_{ikf}^{TrOp}\right)^{SP/bas}}{\left(\left(N_{ik}^{Vah/TrOp}\right)_s^{CPSp5} - 1\right)}$$

где $\left(B_{ikr}^{STrOp}\right)^{SP}$ — параметр, характеризующий величину начальной точки реализации r-ой единичной транспортной операции, час.; $\left(M_{opt}^{STrOp}\right)_s^{CPSp5}$ — оптимизированное подмножество единичных транспортных операций, реализуемых в рамках s-ой рабочей смены; $\left(\delta\right)^{SP/bas}$ — параметр, характеризующий базовую величину такта реализации транспортных операций, час.

Подмножество базовых точек начала реализации соответствующих транспортных операций имеем следующую структуру:

$$\left(M_f^{TrOp/STrOp}\right)_s^{CPSp5/bas} =$$

$$\left\{\left(B_{ikf}^{TrOp}\right)^{SP/bas} \middle| \begin{array}{l}\left(B_{ikf}^{TrOp}\right)^{SP/bas} \in \left[\left(A_{SP}^{CPSp5}\right)_s;\left(A_{EP}^{CPSp5}\right)_s\right] \\ \left(B_{ik1}^{TrOp}\right)^{SP/bas} < \ldots < \left(B_{ikf}^{TrOp}\right)^{SP/bas}\end{array}\right\}$$

где $\left(B_{ikf}^{TrOp}\right)^{SP/bas}$ — параметр, характеризующий базовое значение начальной точки реализации f-ой транспортной операции, выполняемой с применением k-ой единицы транспортного средства i-го типа, час; $\left(A_{SP}^{CPSp5}\right)_s$ — параметр, характеризующий начальное значение s-ой рабоче смены, час.; $\left(A_{EP}^{CPSp5}\right)_s$ — параметр, характеризующий конечное значение s-ой рабоче смены, час.

Формирование базового и вариативных подмножеств единичных транспортных операций, допустимых для реализации в рамках *f-ой* базовой точки, производится на основании анализа параметра $\left(\delta_{fr}^{STrOp}\right)^{SP}$, где $\left(\delta_{fr}^{STrOp}\right)^{SP}$ — параметр, характеризующий величину отклонения среднего значения допустимого интервала реализации единичной транспортной операции от соответствующей базовой точки начала реализации транспортной операции. Таким образом, формула для расчета данного параметра имеет вид:

$$\left(\delta_{rf}^{STrOp}\right)^{SP} = \left|\left(B_{ikr}^{STrOp}\right)_{SP}^{acc/av} - \left(B_{ikf}^{TrOp}\right)^{SP/bas}\right|$$

$$\left(B_{ikr}^{STrOp}\right)_{SP}^{acc/av} = \frac{\left(\left(B_{ikr}^{STrOp}\right)^{EP} - T_r^{STrOp}\right) + \left(B_{ikr}^{STrOp}\right)^{SP}\right)}{2}$$

где $\left(B_{ikr}^{STrOp}\right)_{SP}^{acc/av}$ — параметр, характеризующий среднее значение допустимого интервала реализации r-ой единичной транспортной операции, час; T_r^{STrOp} — параметр, характеризующий трудоемкость реализации r-ой единичной транспортной операции, час.; $\left(B_{ikr}^{STrOp}\right)^{EP}$ — параметр, характеризующий величину конечной точки допустимого периода реализации r-ой единичной транспортной операции, час.; $\left(B_{ikr}^{STrOp}\right)^{SP}$ — параметр, характеризующий величину начальной точки допустимого периода реализации r-ой единичной транспортной операции, час.

Результатом реализации модуля проектирования является формирование базовых моделей транспортных операций, реализуемых в рамках соответствующего периода календарного планирования (рабочая смена) с применением k-ой единицы транспортного средства i-го типа. Параметрическая модель базового модуля транспортных операций, допустимых для реализации в рамках f-ой базовой точки, выполняемых с применением k-ой единицы транспортного средства i-го типа, имеет следующую структуру:

$$\left(Mod_{ikf}^{Vah/TrOp}\right)_s^{CPSp5/bas} = \left\{\begin{array}{l} B_{ikf}^{SP/bas}, \left(M_f^{TrOp/STrOp}\right)_s^{CPSp5/bas}, \\ \left(M_f^{TrOp/STrOp}\right)_s^{CPSp5/var}, \left(V_{ikf}^{TrOp/STrOp}\right)_{mr} \end{array}\right\}$$

где $\left(Mod_{ikf}^{Vah/TrOp}\right)_s^{CPSp5/bas}$ — параметрическая модель базового модуля транспортных операций, допустимых для реализации в рамках f-ой базовой точки, выполняемых с применением k-ой единицы транспортного средства i-го типа; $B_{ikf}^{SP/bas}$ — параметр, характеризующий величину *f-ой* базовой точки начала реализации транспортной операции, выполняемой с применением k-ой единицы транспортного средства i-го типа, час; $\left(M_f^{TrOp/STrOp}\right)_s^{CPSp5/bas}$ — базовое подмножество единичных транспортных операций, которые могут быть реализованы в рамках f-ой базовой точки; $\left(M_f^{TrOp/STrOp}\right)_s^{CPSp5/var}$ — вариативное подмножество единичных транспортных операций, которые могут быть реализованы в рамках f-ой базовой точки; $\left(V_{ikf}^{TrOp/STrOp}\right)_{mr}$ — матрица транспортных операций, допустимых для реализации в рамках f-ой базовой точки, выполняемых с применением k-ой единицы транспортного средства i-го типа.

Матрица $\left(V_{ikf}^{TrOp/STrOp}\right)_{mr}$ имеет следующую структуру и параметры структурных элементов:

$$\left(V_{ikf}^{TrOp/STrOp}\right)_{mr} = \left(v_{ikf}^{TrOp/STrOp}\right)_{mr},$$
$$\left(v_{ikf}^{TrOp/STrOp}\right)_{mr} \in [0;1], \left(v_{ikf}^{TrOp/STrOp}\right)_{mr} \in \mathbb{Z}$$

где $\left(v_{ikf}^{TrOp/STrOp}\right)_{mr}$ — параметр соответствия r-го единичной транспортной операции m-ой транспортной операции, реализуемой в рамках f-ой базовой точки, выполняемых с применением k-ой единицы транспортного средства i-го типа.

На основании матрицы $\left(V_{ikf}^{TrOp/STrOp}\right)_{mr}$ производится формирование подмножеств $\left(M_f^{TrOp/STrOp}\right)_s^{CPSp5/bas}$, $\left(M_f^{TrOp/STrOp}\right)_s^{CPSp5/var}$.

Описание модуля оптимизации структуры транспортных операций

В рамках данного модуля задачами управления является структурная оптимизация транспортной операция, заключающаяся в определении:

- оптимального количества и видов производственных партий изделий, перемещаемых в процессе ее реализации;
- оптимального количества транспортных участков, реализуемых в рамках транспортной операции.

Определено следующее множество входных параметров для управления структурой транспортной операции:

$$\left(M_{Tr}^{CL1}\right)^{Input} = \{\left\{\left(V_{mr}^{Vah/CPSp4}\right)_{ik}^{STrOp/opt}\right\}, W_{zjk}^{LUOp},$$
$$W_{ikj}^{Vah/TechPar}, W_{ikj}^{TrOp/TechPar}, V_{ij}^{LEq/TechPar}, W_{zjk}^{PrB/TechPar}\}$$

где $\left(M_{Tr}^{CL1}\right)^{Input}$ — множество входных параметров; W_{zjk}^{LUOp} — матрица значений величин трудоемкости реализации погрузочно-разгрузочных операций, выполняемых для соответствующих производственных партий изделий; $\left(V_{mr}^{Vah/CPSp4}\right)_{ik}^{STrOp/opt}$ — матрица оптимизированных параметров соответствия единичных транспортных операций, реализуемых с применением k-ой единицы транспортного средства i-го типа в рамках m-го рабочего дня; $W_{ikj}^{TrOp/TechPar}$ — матрица значений параметров транспортных операций, реализуемых с применением соответствующих единиц транспортных средств; $V_{ij}^{LEq/TechPar}$ — матрица значений параметров, характеризующих технические параметры соответствующих типов погрузочно-разгрузочного оборудования.

Матрицы W_{zjk}^{LUOp}, $W_{ikj}^{TrOp/TechPar}$, $V_{ij}^{LEq/TechPar}$, $W_{ikj}^{Vah/TechPar}$, $V_{jr}^{TechEq/TechPar}$ имеют следующую структуру и параметры элементов:

$$W_{zjk}^{LUOp} = t_{zjk}^{LUOp} \Rightarrow t_{zjk}^{LUOp} \geq 0$$
$$W_{ikj}^{TrOp/TechPar} = w_{ikj}^{TrOp/TechPar}, w_{ikj}^{TrOp/TechPar} > 0$$
$$V_{ij}^{LEq/TechPar} = v_{ij}^{LEq/TechPar}, v_{ij}^{LEq/TechPar} > 0$$
$$W_{ikj}^{Vah/TechPar} = w_{ikj}^{Vah/TechPar}, w_{ikj}^{Vah/TechPar} > 0$$

где t_{zjk}^{LUOp} — параметр, характеризующий величину трудоемкости реализации k-ой погрузочно-разгрузочной операции, реализуемой для j-ой производственной партии z-го изделия, мин.; $w_{ikj}^{TrOp/TechPar}$ — параметр, характеризу-

ющий величину j-го параметра транспортной операции, реализуемой с применением k-ой единицы транспортного средства i-го типа; $v_{ij}^{LEq/TechPar}$ — параметр соответствия значения величины, характеризующей j-ый технический параметр i-го типа погрузочно-разгрузочного оборудования; $w_{ikj}^{Vah/TechPar}$ — параметр соответствия значения величины, характеризующей j-ый технический параметр k-ой транспортного средства i-го типа.

Эффективность структуры f-ой транспортной операции характеризуется следующей группой целевых показателей:

- Целевой показатель, характеризующий среднюю величину трудоемкости реализации *f*-ой транспортной операции, мин. — $\left(T_{av}^{TrOp}\right)_f$.
- Целевой показатель, характеризующий среднюю величину операционных затрат, возникающих в результате реализации *f*-ой транспортной операции, руб. — $\left(OPEX_{av}^{TrOp}\right)_f$.
- Целевой показатель, характеризующий величину общей массы груза, перемещаемого в рамках *f*-ой транспортной операции, кг. — $M_f^{cargo/TrOp}$.
- Целевой показатель, характеризующий величину коэффициента эффективности использования транспортного средства по грузоподъемности в процессе реализации *f*-ой транспортной операции — $\left(K_{ef/G}^{Vah/TrOp}\right)_f$.

На основе данной группы целевых показателей сформирован следующий векторный критерий оптимизации:

$$F_{Tr}^{CL1} = (\left(T_{av}^{TrOp}\right)_f\left(U_{Tr}^{CL1}\right),$$

$$\left(OPEX_{av}^{TrOp}\right)_f\left(U_{Tr}^{CL1}\right), M_f^{cargo/TrOp}\left(U_{Tr}^{CL1}\right), \left(K_{ef/G}^{Vah/TrOp}\right)_f\left(U_{Tr}^{CL1}\right))$$

где F_{Tr}^{CL1} — векторный критерий оптимизации структуры транспортной операции; U_{Tr}^{CL1} — множество параметров управления структурой транспортной операции.

Множество параметров управления структурой транспортной операции имеет вид:

$$U_{Tr}^{CL1} = \{\left(N_f^{TrOp/TrS} | N_f^{TrOp/TrS} \geq 1, N_f^{TrOp/TrS} \in \mathbb{N}\right),$$

$$\left(STrOp_r | STrOp_r \in \left(\left(M_{ik}^{STrOp}\right)_s^{CPSp5}\right)^{opt}\right)\}$$

где $N_f^{TrOp/TrS}$ — параметр, характеризующий количество транспортных участков, реализуемых в рамках f-ой транспортной операции, шт.; $\left(\left(M_{ik}^{STrOp}\right)_s^{CPSp5}\right)^{opt}$ — оптимизированное множество единичных транспортных операций, реализуемых в рамках s-ой рабочей смены.

Определены следующие граничные условия для данного уровня управления:

$$N_{min}^{TrOp/TrS} \leq N_f^{TrOp/TrS} \leq N_{max}^{TrOp/TrS}$$

$$\left(OPEX_{av}^{TrOp}\right)_f \leq OPEX_{max}^{TrOp}$$

$$\left(T_{av}^{TrOp}\right)_f \leq T_{max}^{TrOp}$$

$$\left(K_{ef/G}^{Vah/TrOp}\right)^{min} \leq \left(K_{ef/G}^{Vah/TrOp}\right)_f$$

где $N_f^{TrOp/TrS}$ — параметр, характеризующий количество транспортных участков в структуре f-ой транспортной операции, шт.; $\left(N_f^{TrOp/TrS}\right)_{min}$, $\left(N_f^{TrOp/TrS}\right)_{max}$ — параметры, характеризующие минимальное и максимальное количество транспортных участков, реализуемых в рамках *f*-ой транспортной операции, соответственно, шт.; $\left(OPEX_{max}^{TrOp}\right)_f$ — параметр, характеризующий максимальную величину операционных затрат, возникающих в результате реализации *f*-ой транспортной операции, руб.; T_{max}^{TrOp} — параметр, характеризующий максимальную допустимую величину трудоемкости реализации транспортной операции, мин.; $\left(K_{ef/G}^{Vah/TrOp}\right)_f^{min}$ — параметр, характеризующий минимальную величину коэффициента эффективности использования транспортного средства по грузоподъемности в процессе реализации *f*-ой транспортной операции; $\left(T_{ef}^{Vah}\right)_{iks}^{CPSp5}$ — параметр, характеризующий величину эффективного форда рабочего времени в рамках s-ой рабочей смены для k-ой единицы транспортного средства i-го типа, час.; T_r^{TrOp} — параметр, характеризующий величину трудоемкости реализации r-ой единичной транспортной операции, мин.

Определено следующее множество выходных параметров, сформированных по результатам оптимизации структуры f-ой транспортной операции:

$$\left(M_{Tr}^{CL1}\right)^{Output} =$$

$$= \left\{\begin{matrix} N_f^{TrOp/TrS}, \left(V_{fr}^{TrOp/STrOp}\right)_{ik}^{opt}, \\ \left\{\left(T_{av}^{TrOp}\right)_f, \left(OPEX_{av}^{TrOp}\right)_f, M_f^{cargo/TrOp}, \left(K_{ef/G}^{Vah/TrOp}\right)_f\right\} \end{matrix}\right\}$$

где $\left(M_{TrOp}^{CL1}\right)^{Output}$ — множество выходных параметров, сформированных по результатам оптимизации структуры f-ой транспортной операции; $\left(V_{fr}^{TrOp/STrOp}\right)_{ik}^{opt}$ — параметр соответствия единичных транспортных операций f-ой транспортной операции, реализуемой с применением k-ой единицы транспортного средства i-го типа.

Матрица $\left(V_{fr}^{TrOp/STrOp}\right)_{ik}^{opt}$ имеет следующую структуру и параметры структурных элементов:

$$\left(V_{fr}^{TrOp/STrOp}\right)_{ik}^{opt} = \left\|\left(v_{fr}^{TrOp/STrOp}\right)_{ik}^{opt}\right\|,$$

$$\left(V_{fr}^{TrOp/STrOp}\right)_{ik}^{opt} \in [0;1], \left(V_{fr}^{TrOp/STrOp}\right)_{ik}^{opt} \in \mathbb{N}$$

где $\left(v_{fr}^{TrOp/STrOp}\right)_{ik}^{opt}$ — параметр соответствия r-ой единичной транспортной операции, реализуемой с применением k-ой единицы транспортного средства i-го типа, f-ой транспортной операции.

Заключение

В процессе выполнения исследования была разработана подсистема проектирования и оптимизации структуры и параметров транспортных потоков, реализуемых в рамках машиностроительного предприятия. Для модуля проектирования разработан алгоритм, позволяющий:

1. Определять оптимальное количество транспортных операций, реализуемых в рамках рассматриваемого периода календарного планирования.
2. Рассчитывать базовые значения начальных точек реализации соответствующих транспортных операций.
3. Формировать допустимые, базовые и вариативные подмножества единичных транспортных операций, которые могут формировать структуры соответствующих транспортных операций.
4. Формировать структурную матрицу транспортных операций для соответствующих базовых точек начала реализации транспортных операций. На основании данной матрицы могут быть спроектированы допустимые варианты структур транспортных операция, реализация которых производится в рамках рассматриваемого периода календарного планирования с применения соответствующих единиц транспортных средств.

Для реализации модуля оптимизации сформированы множества входных и выходных параметров, а также параметров управления. Определено множество целевых показателей, на основании которого сформирован векторный критерий оптимизации. Представленная в работе подсистема может применяться как самостоятельный элемент в процессе планирования транспортных потоков предприятия, так и как являться частью комплексной системы планирования и оптимизации производственного процесса, реализуемого на машиностроительном предприятии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хрусталева И.Н., Бровкина Я.Ю., Черных Л.Г., Романов П.И., Гасюк Д.П. Модель оптимизации параметров процесса формообразования отдельных конструкторских элементов // Металлообработка. 2025.№3 (147). С.46–61.
2. Хрусталева И.Н. Модель оптимизации параметров внутрицеховых транспортных операций // Автоматизация. Современные технологии. 2025. Т.79. №3. С.118–124.
3. И.Н. Хрусталева Модель оптимизации параметров межцеховых транспортных операций // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2024. №12. С.135–142.
4. Yunlin Chen, Optimizing the efficiency and cost of enterprise logistics warehouse: From the perspective of green supply chain management, Innovation and Green Development, Volume 4, Issue 5, 2025, 100296, ISSN 2949-7531, https://doi.org/10.1016/j.igd.2025.100296.
5. Farouq Halawa, Husam Dauod, In Gyu Lee, Yinglei Li, Sang Won Yoon, Sung Hoon Chung, Introduction of a real time location system to enhance the warehouse safety and operational efficiency, International Journal of Production Economics, Volume 224, 2020, 107541, ISSN 0925-5273, https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107541.?
6. Apostolos Kotsialos, Polyxeni Vassilakopoulou, Fleet management enterprise systems and traffic control synergies: a literature review and research agenda,Procedia Computer Science, Volume 219, 2023,Pages 529–536, ISSN 1877-0509,https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.321.?
7. Mario Henrique Bueno Moreira Callefi, Gilberto Miller Devós Ganga, Moacir Godinho Filho, Maciel M. Queiroz, Vasco Reis, João Gilberto Mendes dos Reis, Technology-enabled capabilities in road freight transportation systems: A multi-method study, Expert Systems with Applications,Volume 203,2022, 117497, ISSN 0957-4174, https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117497.?
8. Chen C.Y.T., Sun E.W., Chang M.F. et al. Enhancing travel time prediction with deep learning on chronological and retrospective time order information of big traffic data. Ann Oper Res 343, 1095–1128 (2024). https://doi.org/10.1007/s10479-023-05223-7
9. Marouane Bouadi, Bin Jia, Rui Jiang, Xingang Li, Ziyou Gao, Optimizing sensitivity parameters of automated driving vehicles in an open heterogeneous traffic flow system, Transportmetrica A Transport Science, Volume 18, Issue 3, 2022, Pages 762–806, ISSN 2324-9935, https://doi.org/10.1080/23249935.2021.1896592.
10. Guo-hua Chen, Bo Zhou, Tao Li, Jie Mao, Bo Li, Zhen-xin Fu,Research on thermal error compensation modeling for the machine tool integrated drive system based on energy consumption big data and an optimized bidirectional network, Precision Engineering, Volume 94,2025, Pages 91–112, ISSN 0141-6359, https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2025.02.024.
11. Yuhao Hu, Xiaolong Xu, Muhammad Bilal, Weiyi Zhong, Yuwen Liu, Huaizhen Kou, Lingzhen Kong,Optimizing CNN inference speed over big social data through efficient model parallelism for sustainable web of things, Journal of Parallel and Distributed Computing, Volume 192, 2024, 104927,ISSN 0743-7315, https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2024.104927.
12. Yuxin Zheng, Jie Yang, Xiaoning Zhang, Multi-Period operations optimization for passenger-freight shared transport: A game-theoretic approach, Transportation Research Part A: Policy and Practice,Volume 199, 2025, 104601,ISSN 0965-8564, https://doi.org/10.1016/j.tra.2025.104601.
13. Jiao Ye, Zhilu Yuan, Yu Jiang, Optimizing transfer locations and capacities for capacitated multimodal transport network operations, Reference Module in Social Sciences,Elsevier,2025,ISBN 9780443157851, https://doi.org/10.1016/B978-0-443-28993-4.00109-8.
14. Sanyapong Petchrompo, David W. Coit, Alexandra Brintrup, Anupong Wannakrairot, Ajith Kumar Parlikad, A review of Pareto methods for multi-objective optimization, Computers & Industrial Engineering, Volume 167, 2022, 108022, ISSN 0360-8352, https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108022.
15. R.V. Rao, R.J. Lakshmi, Ranking of Pareto-optimal solutions and selecting the best solution in multi- and many-objective optimization problems using R-method, Soft Computing Letters, Volume 3, 2021, 100015,ISSN 2666-2221, https://doi.org/10.1016/j.socl.2021.100015.

© Хрусталева Ирина Николаевна (irina.khrustaleva@mail.ru); Хрусталев Михаил Борисович (m320prk1@rambler.ru);
Степанов Сергей Николаевич (stepanov56@mail.ru); Черных Лариса Георгиевна (2904180@mail.ru)

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.45

РАЗРАБОТКА УПРАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛОВ И РЕАЛИЗАЦИЯ ДРАЙВЕРОВ ДЛЯ МОДЕЛИ ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

DEVELOPMENT OF CONTROL SIGNALS AND REALISING OF DRIVERS FOR THE VALVE ELECTRIC DRIVE MODEL

A. Chumakova

Summary. This article submits mathematical modeling of drivers for controlling transistor switches of the power part of the valve electric drive. The prinsipals of building controling signals and their realizasion on automation language.

Keywords: transistor switchers, drivers, controlling, signals diagram, the truth table.

Чумакова Анжелика Владимировна
Аспирант, ФГБОУ ВО Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова
lika-pavlova-00@mail.ru

Аннотация. В данной статье представлено математическое моделирование драйверов для управления транзисторными ключами силовой части вентильного электропривода. Рассматриваются принципы построения управляющих сигналов и их реализация на автоматном языке.

Ключевые слова: транзисторные ключи, драйверы, управление, диаграммы сигналов, таблица истинности.

Введение

Вентильные электроприводы находят широкое применение в современной промышленности благодаря своей высокой эффективности, точности управления и надежности. Они входят в состав станков ЧПУ, применяются в робототехнике, транспорте, вентиляционном оборудовании, т.е. там, где требуется точное регулирование скорости и момента вращения, в военной сфере, как указано в анализе статьи [10].

Одним из важных элементов в системе ВЭП является управление силовыми транзисторными ключами, что определяют работу самого двигателя. Чтобы получить полное понимание о процессах, возникающих в вентильном электроприводе, данная работа посвящена исследованию математической модели ВЭП и анализу принципов управления транзисторными ключами.

Цель — разработка методов управления транзисторными ключами вентильного электропривода с использованием современных инструментов цифрового моделирования.

Задачи:

1. Разработать алгоритм управления транзисторными ключами, исключающий возникновение сквозных токов и повышающую надежность системы.
2. Реализация алгоритма на автоматном языке
3. Проведение сравнительного анализа традиционных и реализованного методов управления транзисторами

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования алгоритмов управления транзисторными ключами, направленных на повышения надежности и долговечности устройства.

Новизна работы:

1. Программная модель реализована на блоках библиотеки конечных автоматов. Такое решение позволяет гибко настраивать управляющие сигналы;
2. Предложенная логика управления транзисторами снижает возникновение сквозных токов за счет оптимизации временных интервалов воздействия ключей

Методы исследования

Метод математического моделирования. Создание виртуальной модели позволяет детально исследовать динамику системы и выявить возможные повреждения

Метод теории автоматов и конечных состояний. На основе диаграмм состояний и переходов с использованием графического языка разработана логика управления МОП-транзисторов, что позволило реализовать логику управления с использованием масштабирования и модификаций

Метод табличного представления данных. Разработка таблицы истинности обеспечила удобство верификации правильности функционирования системы.

В первую очередь необходимо построить схему электропривода с ВЭП. Полагаясь на работы Михайлова О.П.[2,3] и Охоткина Г.П.[4,5] получим результат в виде рис. 1.

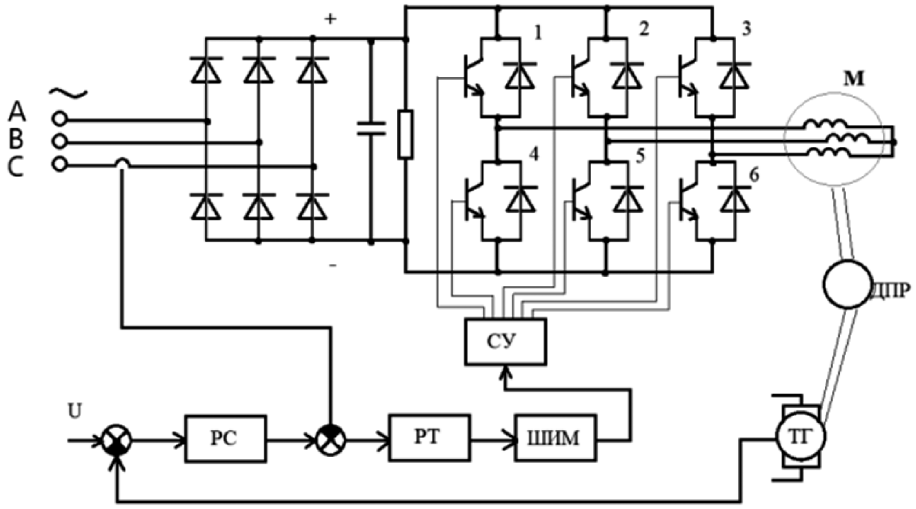


Рис. 1. Схема электропривода с вентильным двигателем

Разработка управляющих сигналов и таблиц истинности

Основываясь на работах Михайлова [2,3] и на последовательности переключения силовых транзисторов инвертора напряжения по сигналам с дискретного датчика положения ротора в статье [9], осуществляется построение диаграмм сигналов управления транзисторами. Эти диаграммы наглядно иллюстрируют последовательность включения и выключения силовых ключей, обеспечивая необходимое распределение фазных токов в обмотках двигателя.

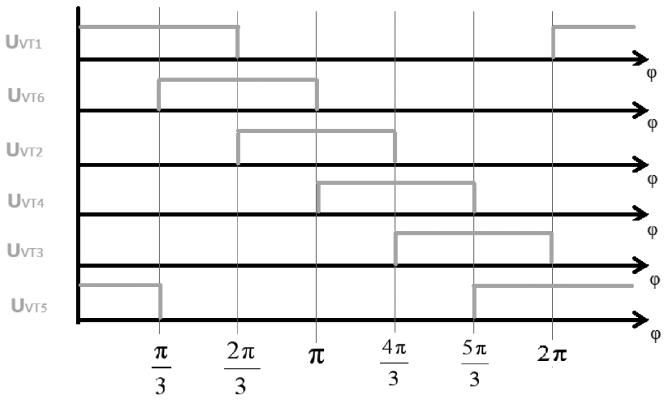


Рис. 2. Диаграммы сигналов управления транзисторами с драйверов

Для наглядности управления транзисторными ключами построена таблица истинности (таблица 1), где VT1-3 входные сигналы, а VT4-6 — выходные. Сигналы VT1-6 отображают состояния соответствующих МОП-транзисторов. Таблица истинности значительно упрощает отладку и тестирование системы, т.к. достаточно будет проверить реальные состояния ключей с ожидаемыми по таблице.

В ходе реализации таблицы по рис. 2 видно, что:

Таблица 1.

Таблица истинности

VT1	VT2	VT3	VT4	VT5	VT6
1	0	0	0	1	0
1	0	0	0	0	1
0	1	0	0	0	1
0	1	0	1	0	0
0	0	1	1	0	0
0	0	1	0	1	0

1. В периоды активного транзистора VT1(1 и 2 строки) запускается последовательность поочерёдного включения VT5 и VT6 — смена фаз от B к C;
2. При активном транзисторе VT2(3 и 4 строки) запускается следующая пара VT6 и VT4 — смена контура тока и фаз (от C к A);
3. При активном транзисторе VT3(5 и 6 строки) — пара VT4 и VT5 — очередная смена (от A к B) и окончание цикла.

Реализация программного обеспечения для драйверов

В диаграмме состояния и переходы являются основными структурными элементами последовательной модальной логической системы. Состояния соответствуют режимам работы, а переходы — переходу системы из одного режима работы в другой.[1]

Используя блок графического программирования, согласно построенной логике, полагаясь на статью Охоткина Г.П. [5], Шуракова [8] и на автореферат Петунии А.А. [6], написана программа для драйверов, управляющих транзисторами VT4-6 (рис. 3) и получена диаграмма (рис. 4)

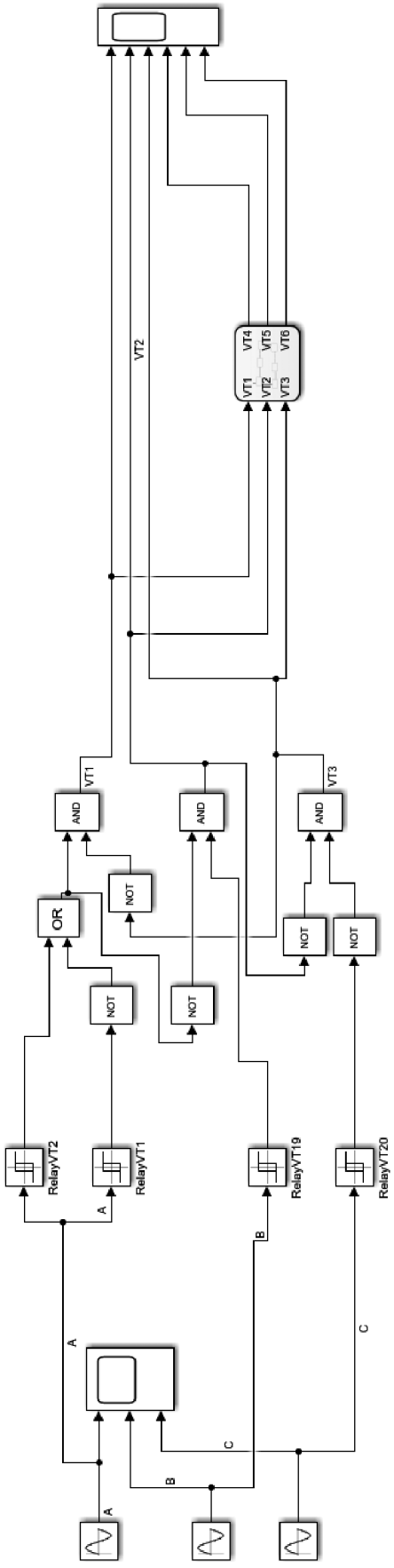


Рис. 3. Драйверы для управления транзисторами

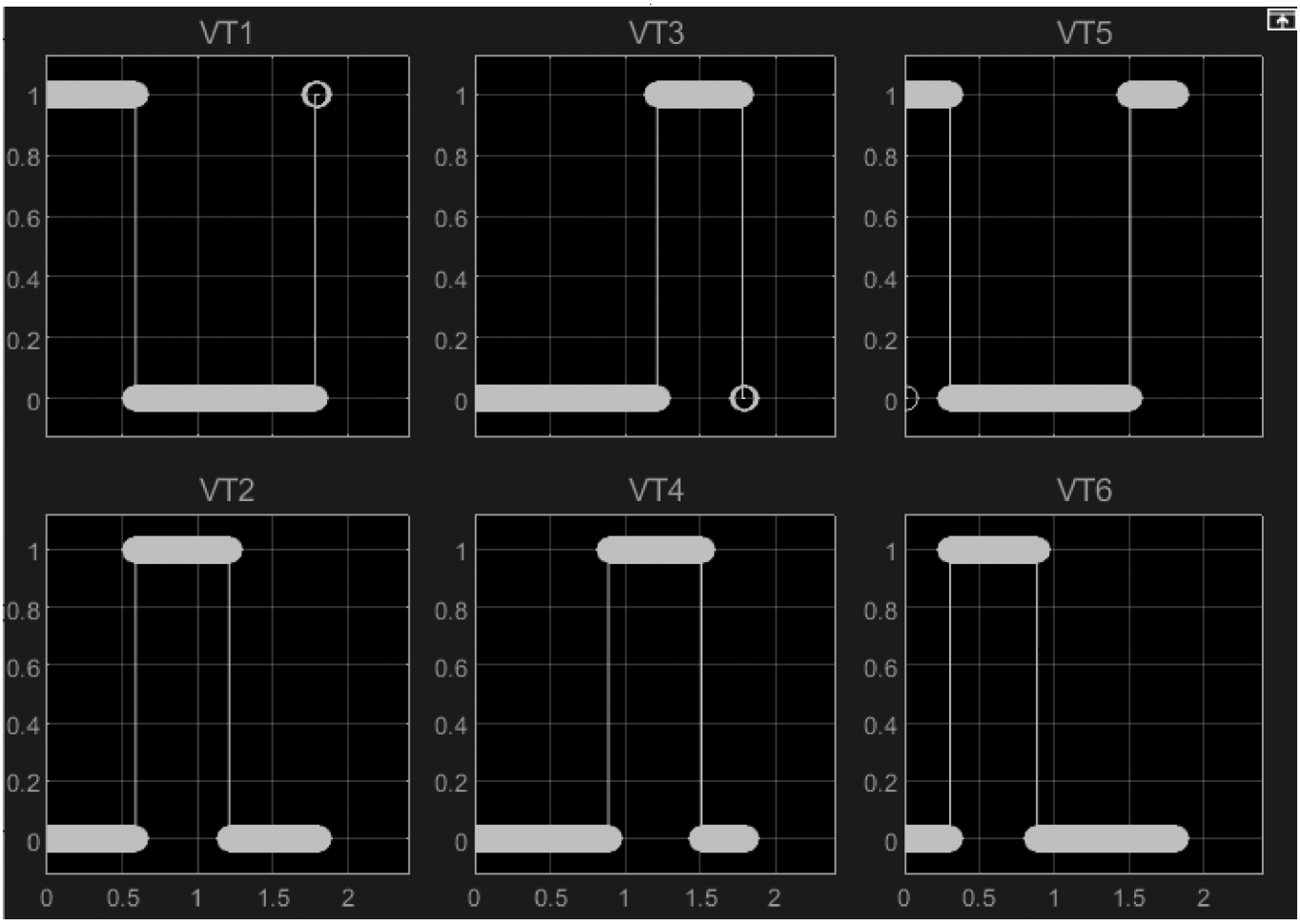


Рис. 4. Диаграмма управляющих сигналов для транзисторов VT1-6

В работе Высоцкого Е.Е. [7] управление драйверами происходит за счет таймеров и настроек прерываний, а в статье [8] полностью на логических элементах. Учитывая, что переключения входных и выходных состояний происходит каждые условные 30 секунд, удобнее всего использовать блок автоматов и состояний.

Блок Chart, являясь мозгом системы, считывает входные команды VT1-VT3 и формирует выходные сигналы VT4-VT6 с учётом задержек.

Полученная в результате работы программы диаграмма (рис. 4) демонстрирует временные зависимости управляющих сигналов, подаваемых на затворы транзисторов VT4-6. Анализ этой диаграммы позволяет убедиться в корректности реализации алгоритма управления и соответствии полученных сигналов теоретическим расчётам и таблице истинности.

Заключение

В ходе проведённого исследования было реализовано математическое моделирование вентильного электропривода с упором на управление транзисторными ключами. Разработанная модель, внедрённая в промышленность, транспорт и робототехнику приведёт к более эффективному рабочему процессу. Дальнейшие исследования будут направлены на блоки регулирования скоростью и током.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chart (Implement control logic with finite state machine) / [Электронный ресурс] // MATLAB Documentation: [сайт]. — URL: https://www.mathworks.com/help/stateflow/ref/chart.html (дата обращения: 23.04.2026).
2. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов: Учебник для вузов/// Москва: Машиностроение, 1990. — 304 с.: ил. — ISBN 5-217-01012-6.
3. Михайлов О.П., Орлова Р.Т., Пальцев А.В. Гибкие производственные системы, промышленные роботы, робототехнические комплексы. Практическое пособие. Книга 14. Современный электропривод станков с ЧПУ и промышленных роботов// Москва: Высшая школа, 1989 — с.111.

4. Охоткин Г.П. Имитационная модель двукратно интегрирующего электропривода постоянного тока с ШИП / Г.П. Охоткин, А.В. Чумакова // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы VIII Международной научно-технической конференции, Чебоксары, 22 ноября 2024 года. — Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2024. — С. 567–572. — EDN AXAXPB.
5. Охоткин Г.П. Синтез логического устройства релейной САР тока при диагональной коммутации с поочередным переключением ключей мостовой схемы ВП // Вестник Чувашского университета / Чуваш. гос. ун-т. — Чебоксары, 2016. — №1. — С. 65–70.
6. Петунии А.А. Вентильный индукторный электропривод для водяных насосов центробежного типа: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: Автореферат на соискание кандидата технических наук / Петунии А.А.; Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Липецкий государственный технический университет». — г. Липецк, 2005 г. — 20 с.
7. Высоцкий В.Е. Вентильные двигатели с постоянными магнитами в системах судового электропривода: состояние и перспективы / В.Е. Высоцкий // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. — 2023. — Т. 15, № 3. — С. 476–489. — DOI 10.21821/2309–5180-2023-15-3-476-489. — EDN MSFJNH.
8. Проектирование математической модели электропривода на базе вентильного двигателя в среде Simulink / И.А. Шураков, Е.Н. Малышев, Ю.Г. Пономарев [и др.] // Общество. Наука. Инновации. (НПК-2023): Сборник материалов XXIII Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, приуроченной к 60-летию ВятГУ. В 2-х томах, Киров, 12–22 июня 2023 года. Том 2. — Киров: Вятский государственный университет, 2023. — С. 98–101. — EDN WFHTEE.
9. Тяговый электропривод на базе вентильного двигателя с микропроцессорным управлением / И.Е. Бердников, А.П. Слузов, С.А. Смирнов, В.В. Соколов // Актуальные проблемы электроэнергетики: Сборник научно-технических статей, Нижний Новгород, 22 декабря 2022 года. — Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2022. — С. 80–86. — DOI 10.46960/47355565_2022_80. — EDN LWANXX.
10. Анализ использования вентильных электроприводов в стабилизаторах вооружения нового поколения / Д.В. Раджабов, А.А. Сидоренко, Н.С. Черепанов, П.О. Кашников // Эхо войны : Материалы Международной научно-практической конференции, посвящённой 80-летию начала Великой Отечественной войны, Омск, 25 июня 2021 года / Под общей редакцией К.В. Костина. — Омск: Омский государственный технический университет, 2021. — С. 224–229. — EDN MCVASF.

© Чумакова Анжелика Владимировна (lika-pavlova-00@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.46

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО БЛОКА ПЕРЕРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ В ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМАХ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ[1]

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED SYSTEM TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF THE PHYSICAL AND CHEMICAL UNIT FOR PROCESSING ORGANIC WASTE IN CLOSED LIFE SUPPORT SYSTEMS[2]

O. Shmelev
V. Butakov
S. Trifonov
A. Aleksandrova

Summary. This paper presents a software package for automated monitoring and control of the wet incineration of organic waste in closed life support systems. The package implements a method for identifying the chain nature of reactions based on an autocatalytic model and logistic approximation of time series, which allows for distinguishing chain processes from non-chain processes without constructing a rigorous kinetic model. A statistical breakpoint detector has been developed, providing automatic segmentation of the process into individual phases, along with an algorithm for predicting the safe moment for switching the control voltage, while also verifying additional process limitations. The software architecture includes a universal bus for connecting various measuring devices (serial ports, network protocols, external scripts), making the system independent of specific equipment types. Experimental verification using real data demonstrated the possibility of reducing reaction time by 10–25 % while maintaining complete process safety. The obtained results can be used both in closed ecosystems for space and polar applications, and in laboratory and pilot-industrial reactors where chain oxidation processes occur.

Keywords: chain reactions, autocatalytic model, wet combustion, automated system, software package, fracture detection, switching prediction, closed life support systems.

Шмелев Олег Сергеевич
Младший научный сотрудник, аспирант, Федеральный исследовательский центр Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Институт биофизики СО РАН
shmelyo.oleg@yandex.ru
Бутаков Виталий Алексеевич
Младший научный сотрудник, аспирант, Федеральный исследовательский центр Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук
k-s-a_k-s-a@mail.ru
Трифонов Сергей Викторович
Кандидат биологических наук, Федеральный исследовательский центр Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук
trifonov_sergei@inbox.ru
Александрова Александра Евгеньевна
Сибирский федеральный университет
sasaaleksandrova010@gmail.com

Аннотация. В работе представлен программный комплекс для автоматизированного мониторинга и управления процессом «мокрого» сжигания органических отходов в замкнутых системах жизнеобеспечения. Цепную природу реакции комплекс опознаёт через автокаталитическую модель и логистическую аппроксимацию временных рядов, а потому отличает цепные процессы от нецепных, не требуя строгой кинетической модели под каждый состав отходов. Разработан статистический детектор изломов: он сам разбивает процесс на отдельные фазы. Разработан и алгоритм, прогнозирующий безопасный момент переключения управляющего напряжения с проверкой дополнительных технологических ограничений. Программная архитектура включает универсальную шину подключения разнородных измерительных устройств (последовательные порты, сетевые протоколы, внешние скрипты), и от конкретного типа оборудования система не зависит. Экспериментальная верификация на реальных данных показала, что продолжительность реакции удаётся сократить на 10–25 % при сохранении полной безопасности процесса. Результаты применимы и в замкнутых экосистемах космического и полярного назначения, и в лабораторных и опытно-промышленных реакторах, где протекают цепные окислительные процессы.

Ключевые слова: цепные реакции, автокаталитическая модель, мокрое сжигание, автоматизированная система, программный комплекс, детектирование изломов, прогнозирование переключения, замкнутые системы жизнеобеспечения.

[1] Благодарности «Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FWES-2024-0041)»

[2] Acknowledgments «The study was funded by State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FWES-2024-0041)»

Исследование космоса требует автономных систем жизнеобеспечения (СЖО) высокой замкнутости. Они перерабатывают отходы жизнедеятельности и восстанавливают ресурсы для обитания экипажей на орбитальных станциях, планетарных базах и в экспедициях [1]. Работают такие технологии и на Земле, где снижают антропогенную нагрузку на экосистемы [2;3].

Системы, сочетающие физико-химические и биологические методы регенерации воздуха, воды и утилизации отходов, достигают высокой замкнутости и надёжности [4;5]. Переработанные отходы идут дальше в дело. На них выращивают растения, а те восстанавливают атмосферу и дают экипажу пищу и воду, замыкая контур, где ничто не выбрасывается и всё возвращается на следующий виток.

Одно из ведущих направлений здесь — переработка отходов, реализованная в проекте БИОС-3; Институт биофизики СО РАН продолжает улучшать технологии утилизации продуктов жизнедеятельности ради высокоэффективных удобрений [1].

В основе процесса лежит физико-химический комплекс. Он превращает органические отходы в минерализованный раствор для питательной смеси растений, а цепочка выходит длинная: мокрое сжигание органики, выделение хлора, синтез соляной кислоты, разложение мочевины, получение щёлочи, выделение карбоната натрия и, наконец, синтез соли.

Схема блока физико-химической переработки отходов показана на рисунке 1.

В биолого-технических системах жизнеобеспечения (BTLSS) этапы переработки должны укладываться в 1–2 суток. Мокрое сжигание есть смешивание измельчённых твёрдых и жидких отходов с перекисью водорода при воздействии переменного электрического потенциала через угольные электроды. Расход окислителя разнится: для соломы, клетчатки и лигнина 16 мл 33 %-ной перекиси на 1 г сухого вещества, для плотных отходов человека 4 мл, для урины 0,5 мл на 1 мл.

Реакция протекает при 95–98 °C. Окисление метаболитов занимает 1,5–2 часа, а мочевина разлагается лишь частично, сохраняя до 80 % исходного количества. Что реакция завершилась, видно по осветлению раствора и прекращению газовыделения; итоговый pH для мочи равен 7, для плотных отходов 8, для древесной клетчатки 9. Раствор стерилен и содержит минеральные соли, мочевину и остаточную органику.

Дальше мочевину ферментативно разлагают уреазой из соевой муки [2, с. 61]: процесс длится от 8 часов до 4 суток при 37 °C, а кислотность поддерживают добавлением азотной кислоты.

Раствор поступает в секцию выделения хлора. Хлор идёт на синтез соляной кислоты при взаимодействии с водородом в присутствии аргона. В диализаторе под постоянным током компоненты разделяются: кислотная фракция концентрируется у анода, щелочная у катода, после чего обессоленный и кислотный растворы отправляются в ирригационный бак, а щелочной идёт в секцию выделения карбоната натрия.

Получение Na_2CO_3 разбито на три стадии: осаждение карбонатов (Ca, Mg, Fe) при повышенных давлении и температуре; выделение карбонатов калия и натрия концентрированием и охлаждением; разделение осад-

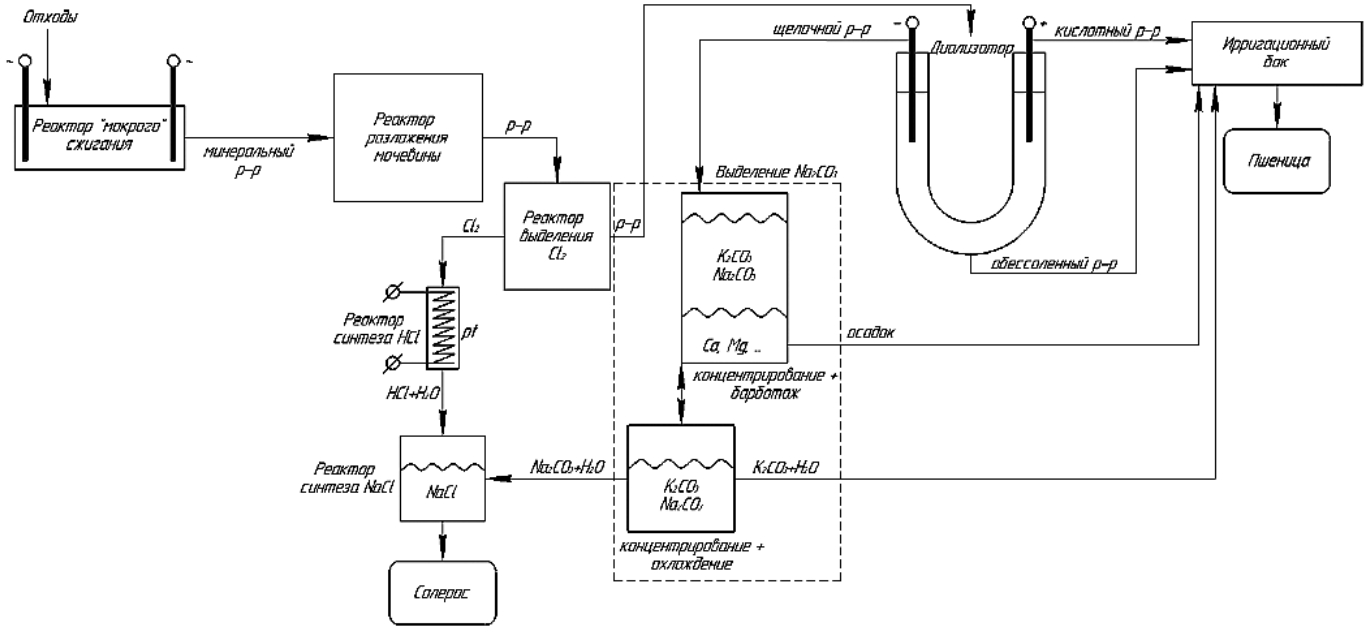


Рис. 1. Схема физико-химического блока

ка, где Na_2CO_3 уходит на переработку, а раствор K_2CO_3 возвращается в ирригационную систему [3, с. 4].

На заключительном этапе карбонат натрия реагирует с соляной кислотой и даёт NaCl и угольную кислоту; та при нагревании распадается на воду и углекислый газ, поддерживая газовый состав атмосферы. Раствор соли идёт на полив солеросов.

Для исследований «мокрого» сжигания разработана комплексная аппаратно-программная измерительная система. Биомассу готовили в фитотронных камерах: режимами выращивания управляло ПО на C# для Windows, микроклимат контролировали модули ESP32 NodeMCU с датчиками DHT11 и YL-38/YL-69 по Wi-Fi, а состав газовой среды отслеживал газоанализатор «MonolitXL».

Назначение и архитектура программного комплекса

Для экспериментов развёрнута многоуровневая сеть сенсоров и исполнительных устройств. Центральные приборы здесь газоанализаторы «MonolitXL» и «Гамма-100»; параметры среды регистрировала сеть на ESP32 NodeMCU с датчиками температуры (Max6675, термопара WRNK-191, тип K), ротаметрами ASAIR AMS2106, датчиком давления PCM300D, датчиками напряжения и тока.

Не менее важен и программный комплекс для приёма, систематизации и интеллектуальной обработки данных, написанный на C# (Visual Studio, WPF) как отказоустойчивое приложение под многодневные эксперименты.

Архитектурно это универсальная платформа, не привязанная ни к конкретному оборудованию, ни к составу отходов. Слоёв три: сбор данных (порты COM, протоколы TCP/UDP, скрипты Python), анализ и моделирование (математическое ядро определяет характер реакции и прогнозирует её развитие), визуализация с выдачей рекомендаций по изменению напряжения.

Математическая модель и её теоретическое обоснование

Центральной научной задачей стало другое: научить систему автоматически распознавать цепную природу реакции «мокрого» сжигания по косвенным данным, без строгой кинетической модели под каждый состав отходов.

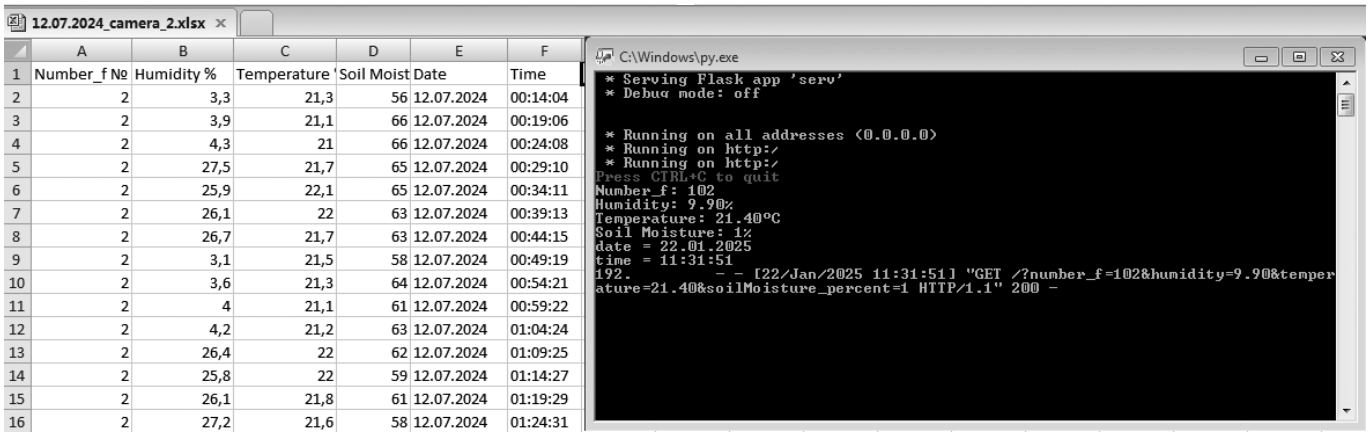
В основу анализа положена автокаталитическая модель цепной реакции, обоснованная в трудах Н.Н. Семёнова, Н.М. Эмануэля и их последователей. Для неразветвлённой цепной реакции концентрация активных центров и пропорциональный ей ток через реакционную среду подчиняются сигмоидному (S-образному) закону, а описывает его логистическое уравнение:

$$I(t) = I_{min} + \frac{I_{max} - I_{min}}{1 + e^{-k(t-t_0)}}$$

Где I_{min} — начальный ток (до индукции), I_{max} — предельный ток, соответствующий завершению реакции, k — эффективная константа скорости, а t_0 — временная координата точки перегиба, совпадающей с максимумом скорости.

Идентификация параметров модели (I_{min}, I_{max}, k, t_0) идёт в реальном времени методом наименьших квадратов после линеаризации. Уравнение приводят к линейному виду $y = a + b \cdot t$ путём перехода к логарифмической шкале: $\ln((I_{max} - I)/(I - I_{min})) = -k(t - t_0)$. Качество подгонки оценивается коэффициентом детерминации R^2. Пороговое значение $R^2 \geq 0{,}8$ установлено экспериментально как достаточное для надёжного вывода о цепном характере реакции. Преимущество тут существенное: подход не зависит от абсолютных значений параметров. А значит, одинаково хорошо работает с реакцией на любом типе органических отходов, будь то метаболиты человека, растительная биомасса или иные углеродсодержащие субстраты.

Кроме подтверждения цепной природы, модель позволяет вычислить предсказанный максимум скоро-



12.07.2024_camera_2.xlsx

	A	B	C	D	E	F
1	Number_f №	Humidity %	Temperature '	Soil Moist	Date	Time
2	2	3,3	21,3	56	12.07.2024	00:14:04
3	2	3,9	21,1	66	12.07.2024	00:19:06
4	2	4,3	21	66	12.07.2024	00:24:08
5	2	27,5	21,7	65	12.07.2024	00:29:10
6	2	25,9	22,1	65	12.07.2024	00:34:11
7	2	26,1	22	63	12.07.2024	00:39:13
8	2	26,7	21,7	63	12.07.2024	00:44:15
9	2	3,1	21,5	58	12.07.2024	00:49:19
10	2	3,6	21,3	64	12.07.2024	00:54:21
11	2	4	21,1	61	12.07.2024	00:59:22
12	2	4,2	21,2	63	12.07.2024	01:04:24
13	2	26,4	22	62	12.07.2024	01:09:25
14	2	25,8	22	59	12.07.2024	01:14:27
15	2	26,1	21,8	61	12.07.2024	01:19:29
16	2	27,2	21,6	58	12.07.2024	01:24:31

Рис. 2. ПО Микроклимат

сти реакции $V_{max} = k \cdot (I_{max} - I_{min})/4$. Эта величина служит опорной точкой для определения безопасного момента переключения управляющего напряжения.

Детектирование изломов и сегментация процесса

В реальных экспериментах оператор меняет напряжение по ходу реакции, не допуская перехода во взрывную фазу. Динамика тока от этого резко меняется, и единая сигмоидальная модель весь ряд описывать перестаёт.

Поэтому в комплекс встроен статистический детектор изломов. Он отслеживает первую производную тока dI/dt в скользящем окне, вычисляет среднее и σ и проверяет, не вышла ли производная за интервал среднее ± 3σ; флуктуации отсекает настраиваемый порог значимости.

При статистически значимом скачке производной фиксируется «точка излома»: она делит ряд на сегменты, то есть на фазы эксперимента (индукция, автоускорение, замедление). Для каждого сегмента строится своя автокаталитическая модель, и процесс удаётся анализировать поэтапно.

Прогнозирование момента переключения и проверка технологических ограничений

Когда модель сегмента построена и предсказанный максимум скорости вычислен, процессом можно управлять: время переработки минимизируется при полной безопасности. Напряжение переключают с высокого (обычно 70 В) на пониженное (30 В) до пика скорости, но после того, как активных центров накопится достаточно для устойчивого продолжения реакции.

Количественным критерием служит порог в **75 % от предсказанного максимума скорости**, найденный эмпирически и подтверждённый литературными данными: реакция ещё не вошла во взрывную фазу, но запас активных радикалов у неё уже достаточен, чтобы завершиться при пониженном энерговкладе.

Рекомендация о переключении не выдаётся механически. Комплекс дополнительно проверяет **технологические ограничения**, заданные оператором: для любого параметра (температура, давление, концентрация) указываются минимально и/или максимально допустимые значения. Рекомендация появляется лишь при двух условиях сразу: критическая скорость тока достигнута и все параметры держатся в заданных пределах.

Универсальность и адаптируемость программного комплекса

Принципиально комплекс отличается от узкоспециализированных решений тем, что работает с любым типом цепных реакций окисления. Ключевые алгоритмы опираются на форму временного ряда, а не на абсолютные значения параметров: при замене отходов меняются лишь значения I_{min}, I_{max} и константы k, а пересчитывает их комплекс автоматически.

Так система превращается в универсальный инструмент исследования кинетики окислительных процессов, пригодный для любой лаборатории независимо от реактора и реагентов.

Особого внимания заслуживает подсистема подключения источников данных. Коммерческие SCADA-пакеты держат драйверы под каждый тип устройств, здесь же применён подход с **унифицированным строковым протоколом**. Любое устройство, передающее данные в формате имя_параметра/значение/единица_измерения, подключается без программирования. Написаны драйверы для устройств через последовательный порт (Arduino, ротаметры ASAIR AMS2106, газоанализатор Гамма-100, Modbus-совместимые приборы), внешних скриптов Python, TCP-серверов и клиентов, а также UDP-серверов (газоанализатор MonolitXL).

Добавить оборудование просто. Достаточно конфигурационной записи в графическом интерфейсе (COM-порт, IP-адрес, путь к скрипту), после чего данные вливаются в общий поток и становятся доступны для анализа и архивирования.

Пользовательский интерфейс и опыт оператора

Интерфейс проектировался так, чтобы оператор быстро оценивал состояние реакции. Главное окно разделено на три зоны.

Слева список параметров от всех источников; каждый показан карточкой с текущим значением, единицей измерения и кнопками добавления графика, анализа цепной реакции и работы с производными.

Центр занимает панель графиков с полем рекомендаций и цветовой индикацией: в реальном времени видны фаза реакции, прогнозное время до завершения, статус условий и рекомендация по переключению. Цветовое кодирование (зелёный, оранжевый, красный) ускоряет оценку ситуации.

Помимо фактической кривой параметра на графиках отображаются прогнозная линия по модели и зона неопределённости прогноза; точки излома отмечены пунктирными линиями с всплывающей статистикой сегмента.

Все события пишутся в лог-файл с временными метками, что обеспечивает воспроизводимость экспериментов и аудит.

Ретроспективный анализ и работа с историческими данными

Есть и ретроспективный анализ завершённых экспериментов: при загрузке CSV-файла система разбивает ряд на сегменты, строит для каждого автокаталитическую модель и формирует сводный отчёт с параметрами (k, I_{min}, I_{max}, R^2) и расчётным оптимальным временем переключения.

При отработке методики на новых составах это дорогого стоит: по данным десятков экспериментов исследователь быстро получает количественные оценки для корректировки протокола, а экспорт отчётов документирует каждый опыт.

Система производных и вычисляемых параметров

Аналитические возможности расширяет подсистема вычисляемых параметров: новый параметр задают функцией от существующих, и он пересчитывается при обновлении любого аргумента.

Реализована и запись первой и второй производных любого параметра. Вычисляются они при поступлении значения и доступны наравне с исходными данными; запись включается выборочно.

Результаты тестирования и верификация модели

Работоспособность комплекса и адекватность моделей проверялись на серии данных реальных опытов «мокрого» сжигания: временных рядах силы тока продолжительностью от полутора до четырёх часов при переработке стандартной смеси метаболитов человека.

Тестирование подтвердило, что автокаталитическая модель устойчиво опознаёт цепную природу реакции на стадии автоускорения. Коэффициент детерминации R^2 для сегментов естественного развития реакции до вмешательства оператора стабильно превышал 0,8, достигая 0,95–0,97. Детектор изломов исправно ловил моменты переключения на фоне шумовых флуктуаций амплитудой менее 1 А (примерно 5–8 % диапазона изменения тока).

Момент переключения система прогнозировала на 30–90 секунд раньше оператора и при соблюдении всех технологических ограничений; расчётное сокращение времени реакции составило 10–25 % в зависимости от эксперимента, что согласуется с оценками логистической модели.

Итог такой. Создан программный комплекс: он сводит воедино автоматический мониторинг, математическое моделирование и интеллектуальный анализ данных, чтобы управлять «мокрым» сжиганием органических отходов. Автокаталитическая модель, описываемая логистическим уравнением, надёжно опознаёт цепную природу реакции по временному ряду тока независимо от абсолютных значений параметров.

Технически реализована универсальная шина подключения разнородного оборудования: датчики, газоанализаторы и внешние скрипты интегрируются без дополнительного программирования. Испытания подтвердили сокращение продолжительности реакции на 10–25 % при полном контроле над процессом.

Достигнутый уровень автоматизации важен и для устойчивости самого химического процесса. Цепные реакции окисления в жидкой фазе склонны к резкому самоускорению, а вернуть их в штатный режим после выхода за границы трудно. Запас времени мал. Непрерывный анализ и прогнозирование дают возможность остановить процесс, пока управляющее воздействие ещё способно предотвратить взрывную фазу.

Разработанный комплекс годится не только для замкнутых систем жизнеобеспечения космического или полярного назначения. Он применим в любой лабораторной или опытно-промышленной установке с цепными реакциями окисления, где нужен автоматизированный контроль с интеллектуальной поддержкой решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Интерфакс Образование [Электронный ресурс]. // Режим доступа: URL: https://academia.interfax.ru/ru/news/articles/2570 (дата обращения: 15.12.2024).
2. Citation: Liu H., Yao Z., and Liu H. Human lunar base: «Lunar Palace 1» team of Beihang University unveils China's «Lunar Palace» plan. The Innovation Volume 5, Issue 2, 100592, 2024.
3. Nitta K., Otsubo K., Ashida A. Integration test project of CEEF — A test bed for closed ecological life support systems Advances in Space Research Volume 26, Issue 2, 2000, p. 335–338.
4. Марцулевич Н.А., Борисов В.З. Надежность химико-технологических систем // Учебное пособие. — СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2003. — 149 с.
5. Дегерменджи А.Г., Тихомиров А.А. Создание искусственных замкнутых экосистем земного и космического назначения: Вестник Российской академии наук. 2014. Т. 84. № 3. С. 233.
6. Ардуино технологии [Электронный ресурс]. // Режим доступа: URL: https://arduino-tex.ru/news/173/vvedenie-v-esp-now-besprovodnaya-svyaz-na--esp8266.html (дата обращения: 15.12.2024).

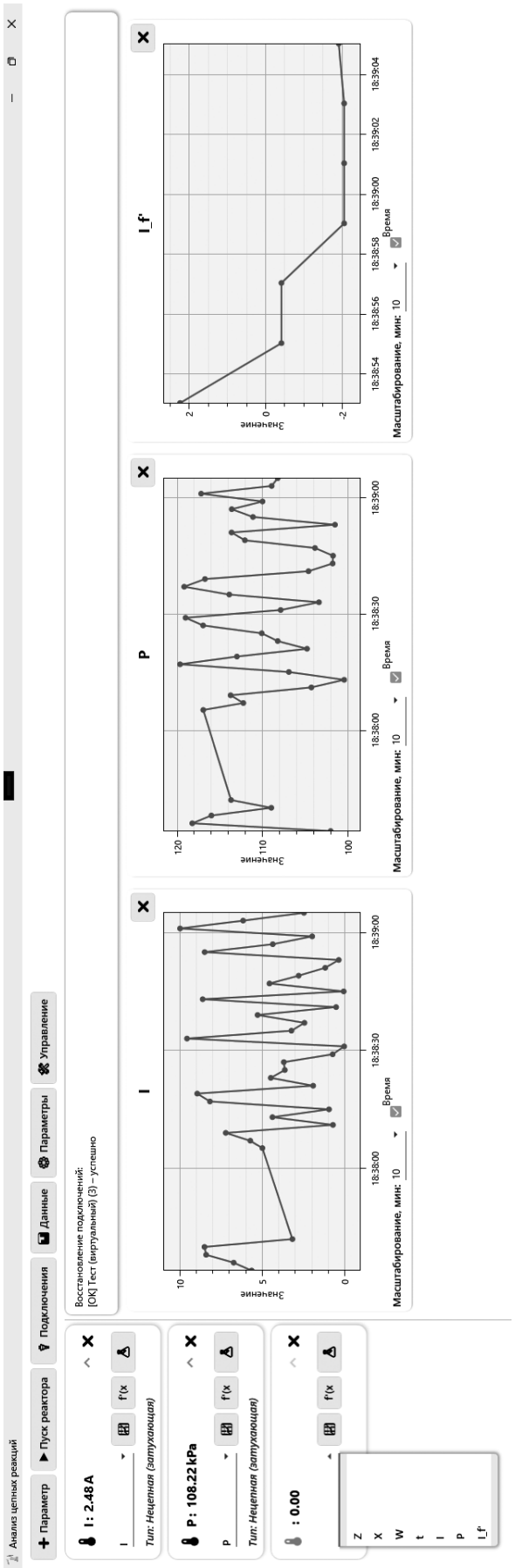


Рис. 3. ПО Анализ цепных реакций

7. Ariat technology [Электронный ресурс]. // Режим доступа: URL: https://www.ariat-tech.ru/blog/esp32-vs-stm32-which-microcontroller-is-better-for-you.html (дата обращения: 15.12.2024).
8. Dmitry's notes [Электронный ресурс]. // Режим доступа: URL: https://dmitrysnotes.ru/obzor-odnoplatnogo-kompyutera-raspberry-pi-zero-w (дата обращения: 15.12.2024).
9. Ebyteiot [Электронный ресурс]. // Режим доступа: URL: https://ebyteiot.com/ru/blogs/ebyte-iot-blog/lora-wireless-technology-communication-principles-and-advantages-and-disadvantages (дата обращения: 15.12.2024).
10. NEKTA [Электронный ресурс]. // Режим доступа: URL: https://nekta.tech/obzor-zigbee-i-primenenie-v-iot/ (дата обращения: 15.12.2024).
11. Morozov Ye.A., Trifonov S.V., Ushakov S.A., Anishchenko O.V., Tikhomirov A.A. Feasibility of incorporating all products of human waste processing into material cycling in the BTLSS, Life Sciences in Space Research, 2018, 18, p. 29–34.
12. Trifonov S.V., Kudenko Y.A., Tikhomirov A.A. Prospects for using a full-scale installation for wet combustion of organic wastes in closed life support systems, Life Sciences in Space Research, 2015, 7, p. 15–21.
13. Семенов Н.Н. Цепные реакции / Н.Н. Семенов — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Наука, 1986. — 535 с.
14. Шамб У. Перекись водорода / У. Шамб, Ч. Сеттерфилд, Р. Вентворс — М.: Издательство иностранной литературы, 1958. — 579 с.
15. Эммануэль Н.М. Цепные реакции окисления углеводородов в жидкой фазе / Н.М. Эммануэль, Е.Т. Денисов, З.К. Майзус — М.: Наука, 1965. — 376 с.

© Шмелев Олег Сергеевич (shmelyo.oleg@yandex.ru); Бутаков Виталий Алексеевич (k-s-a_k-s-a@mail.ru);
Трифонов Сергей Викторович (trifonov_sergei@inbox.ru); Александрова Александра Евгеньевна (sasaaleksandrova010@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.47

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА РЕАЛИЗАЦИИ АТАКИ НА КВАНТОВУЮ КРИПТОГРАФИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ В ШИРОКОПОЛОСНОМ СПЕКТРЕ

RESEARCH ON A METHOD OF IMPLEMENTING AN ATTACK ON A QUANTUM CRYPTOGRAPHIC SYSTEM IN THE BROADBAND SPECTRUM

M. Shulga
D. Fedorchuk
A. Spevakov

Summary. A developed laboratory stand for conducting an attack on a quantum system in the broadband spectrum, measurement techniques, and an analysis of scientific results are presented. Problem statement: creation of a low-cost laboratory stand and methodological guidelines for injecting radiation into fiber-optic components, both active and passive, and analyzing the stability of various optical circuits of quantum cryptographic protocols. Methods: experimental measurements of optical components using broadband radiation, which determines the attenuation coefficient of the test element in the selected wavelength range; the proposed method for measuring optical components, which is implemented using a developed laboratory bench. Results: It is established that the attenuation coefficients of the found bandwidths for a certain set of optical components are lower than the coefficient of the operating wavelength of 1550 nm, which can lead to a security threat. Practical significance: The necessity of verification of quantum cryptographic systems in the broadband spectrum is shown. Discussion: The novelty lies in the fact that for the first time a low-cost experimental stand for conducting an attack in the broadband spectrum has been presented.

Keywords: light injection, KKS VRK, KRK, broadband radiation, laboratory stand.

Шульга Максим Ильич
Аспирант, Московский технический университет связи и информатики
Федорчук Дмитрий Александрович
ФГАОУ ВО Московский политехнический университет
Спеваков Александр Геннадьевич
Кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО Московский политехнический университет
Aspev@yandex.ru

Аннотация. Представлен разработанный лабораторный стенд для проведения атаки на квантовую систему в широкополосном спектре, методики измерений, а также проведен анализ научных результатов. Постановка задачи: создание бюджетного лабораторного стенда и методических указаний к нему, для инжекции излучения в волоконно-оптические компоненты, как активные, так и пассивные, и проведения анализа устойчивости различных оптических схем квантового криптографического протоколов. Методы: экспериментальные измерения оптических компонентов с помощью широкополосного излучения, по которому определяется коэффициент ослабления тестируемого элемента на выбранном диапазоне длин волн; предлагаемый метод измерения оптических компонентов, реализуемый с помощью разработанного лабораторного стенда. Результаты: установлено, что коэффициенты ослабления найденных полос пропускания при определенном наборе оптических компонентов ниже коэффициента рабочей длины волны 1550 нм, что может привести к угрозе безопасности. Практическая значимость: показана необходимость проведения проверки квантовых криптографических систем в широкополосном спектре. Обсуждение: новизна заключается в том, что впервые представлен бюджетный экспериментальный стенд для проведения атаки в широкополосном спектре.

Ключевые слова: инжекция света, ККС ВРК, КРК, широкополосное излучение, лабораторный стенд.

Введение

Технология квантовых коммуникаций реализует одну из важных функций информационной безопасности — формирование симметричных ключей шифрования с использованием принципов квантовой механики [1]. Это возможно благодаря технологии квантового распределения ключей (КРК) [2]. Квантовые криптографические системы выработки и распределения ключа могут быть уязвимы к различным атакам, например, «Лазерное повреждение» [3], «Переизлучение детектора» [4], «После строба детектора» [5], «Ослепление детектора» [6], а также атака «Троянский конь» [7]. Данная атака направлена на использование инжекции света из квантового канала с целью получения параметров системы [8], таких как поляризация [9], значения изменения фазы [10] и др. В большинстве оптических схем [11] инжектируемое излучение, доходя до необходимых нарушителю для атаки элементов, проходит также через различные активные и пассивные оптические компоненты [12], служащие как для защиты системы КРК [13], так и для работы квантовых криптографических протоколов [14]. Для защиты системы КРК используются такие элементы, как оптический изолятор [15], DWDM фильтры [16]. Для работы большинства квантовых криптографический протоколов используются оптические аттенюаторы [17].

В статье мы производим разбор атаки на квантовую криптографическую систему с использованием разработанного лабораторного стенда для изучения широкополосного излучения и влияния его на пассивные и активные элементы оптических схем, а также представлена методика для проведения исследований в области атак на разные реализации систем КРК. Данное исследование является ценным в области изучения влияния широкополосного излучения на волоконно-оптические компоненты, как противодействие атакам с инжекцией света.

Постановка задачи

Разработка лабораторного стенда для проведения атаки в широкополосном спектре является актуальной задачей. В наше время насчитывается множество атак, которые может совершить нарушитель для нарушения конфиденциальности информации в квантовых системах [3–7]. В настоящей работе в качестве основной цели решалась задача разработки экспериментального стенда, который является бюджетным решением в области инжекции света.

Материалы и методы

Для проведения атаки по инжекции света, необходимо определить длину волны отличную от номинальной, для незаметности нарушителя в системе. Для определения длины волны используется атака широкополосным излучением. После проведения данной атаки у нарушителя есть спектральный диапазон, по которому он определяет уязвимость системы на других спектрах. Комплекс данных атак называется комбинированной атакой «Троянский конь» [18].

Для оценки способа реализации атаки на квантовую криптографическую систему был разработан экспериментальный стенд и методика проведения измерений.

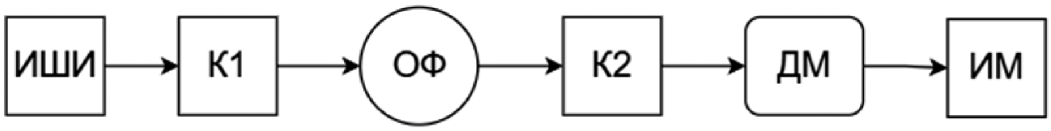
На первом шаге необходимо провести юстировку коллиматоров К1 и К2 для определения эталонных параметров оптического излучения, схема юстировочного стенда представлена на рис. 1. Необходимо включить источник широкополосного излучения и регулировать местоположение коллиматоров в пространстве путем их наклона до появления необходимого или максимально возможного значения на измерителе мощности.

На втором шаге зафиксировав положение коллиматоров проводим сборку экспериментального стенда, представленного на рис. 2. Настраиваем анализатор спектра к рабочим параметрам.

На третьем шаге осуществляем снятие значений входного излучения и чувствительности анализатора спектра, выполняем измерения на тестируемых компонентах с фиксацией полученных данных в табличном формате.

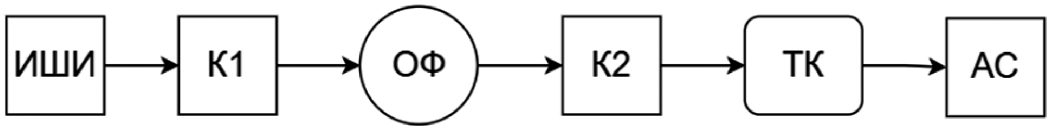
На четвертом шаге производим анализ полученных результатов.

Для получения спектрального диапазона источника широкополосного излучения (ИШИ) необходимо убедиться, что излучение будет достаточным для анализатора спектра и не превышает его пороговые значения. Так как выход из ИШИ имеет многомодовую структуру трубчатого волокна, необходимо его адаптировать под одномодовое волокно. Для этого используются коллиматоры [19]. Также, чтобы отсечь ненужные гармоники



ИШИ - источник широкополосного излучения
К1, К2 - коллиматоры
ОФ - оптический фильтр
ДМ - датчик мощности
ИМ - измеритель мощности

Рис. 1. Схема юстировочного стенда



ИШИ - источник широкополосного излучения
К1, К2 - коллиматоры
ОФ - оптический фильтр
ТК - тестируемый компонент
АС - анализатор спектра

Рис. 2. Схема экспериментального стенда

используются оптические фильтры [20]. Для получения результата нам необходимо подключить источник к коллиматору, после поставить интерференционный фильтр с длиной волны 925 нм (925S), для работы в ближней инфракрасной области спектра, далее из второго коллиматора вывести волокно в измеритель мощности. Провести юстировку на максимальной мощности источника, для точности настройки. Далее, не меняя параметров юстировки уменьшить мощность до диапазона в пределах порогового значения, для перехода в рабочий режим измерений. Вместо измерителя мощности подключаем анализатор спектра и настраиваем шаг измерений на 0.04 нм, диапазон измерений от 925 нм до 1600 нм. Включить источник излучения и включить анализатор спектра на запись. После получения снимка источника выключить его и перед анализатором спектра поставить тестируемый образец. Провести измерения на каждом выходе. Проанализировать результат.

Для проведения исследования были выбраны оптические компоненты, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Исследованные оптические компоненты

Наименование	Кол-во	Производитель	Модель
Оптический изолятор	1	AC Photonics	Изолятор 1460–1610 нм, 500 мВт
Фиксированный аттенюатор	1	OPNETI	30dB
DWDM фильтр 36 канал	1	AC Photonics	DWDM-1*2-200G-1557.36-0-FC/APC*3-4.0*18-1.5m

Результаты и их обсуждение

В ходе эксперимента были получены значения чувствительности анализатора спектра и входного излучения, представленные на рис. 3. Чувствительность анализатора спектра — нижняя граница измерений, а значения входного излучения — верхняя граница.

На рис. 4 представлены результаты широкополосного излучения DWDM-фильтра 36 канал. На графике продемонстрированы значения коэффициента ослабления на диапазоне длин волн (925–1600 нм). На длинах волн с 925 нм по 1383,13 нм отмечаются сниженные коэффициенты изоляции, а на длине волны 1294,65 нм данный показатель составил 20,73 дБ. С 1383,13 нм отмечается резкий рост коэффициента изоляции до 1600 нм коэффициент ослабления, кроме небольшой полосы длин волн. Из приведенных результатов следует, что DWDM-фильтр закрывает определенный участок спектра, а именно с 1383,13 нм по 1600 нм с окном пропускания на 1550 нм, а также на длинах волн меньше 1383,13 нм.

На рис. 5 представлены результаты широкополосного излучения оптического аттенюатора.

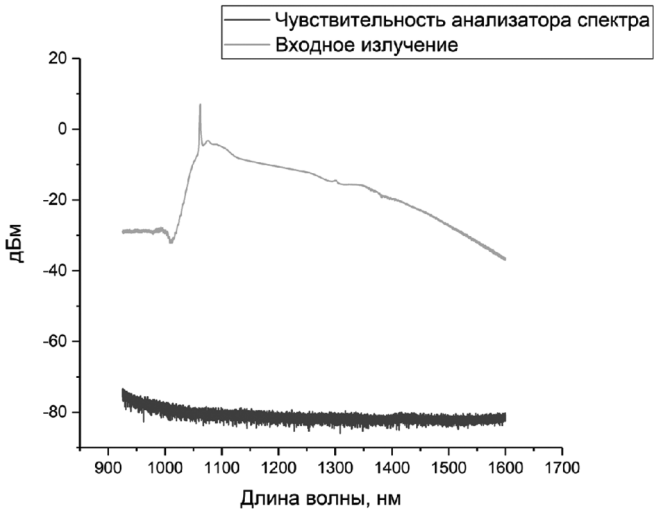


Рис. 3. Значение входного излучения и чувствительность анализатора спектра

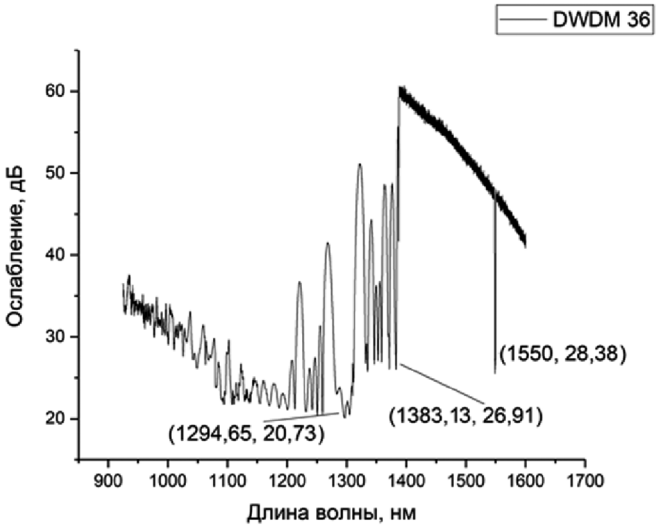


Рис. 4. Коэффициент ослабления DWDM-фильтра 36 канал

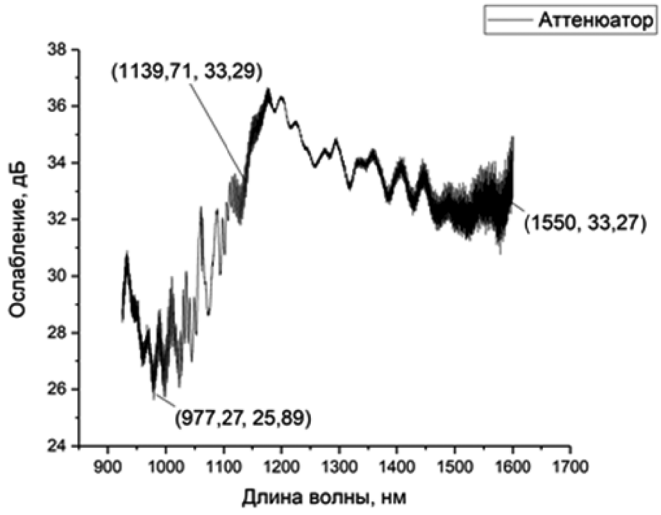


Рис. 5. Ослабление оптического аттенюатора

На графике продемонстрированы значения коэффициента ослабления на диапазоне длин волн (925–1600 нм). На рабочей длине волны 1550 нм коэффициент изоляции составил 33,27 дБ.

Установлено, что на длине волны 977,27 нм коэффициент изоляции равен 25,89 дБ. Исходя из графика на длинах волн с 925 нм по 1139 нм отмечается коэффициент изоляции ниже коэффициента на рабочей длине волны. Из приведенных результатов следует, что оптический аттенюатор имеет не идентичный коэффициент изоляции в диапазоне длин волн с 925 нм по 1600 нм и на некоторых длинах волн (не рабочих) данный показатель может быть ниже.

На рис. 6 представлены результаты широкополосного излучения оптического изолятора.

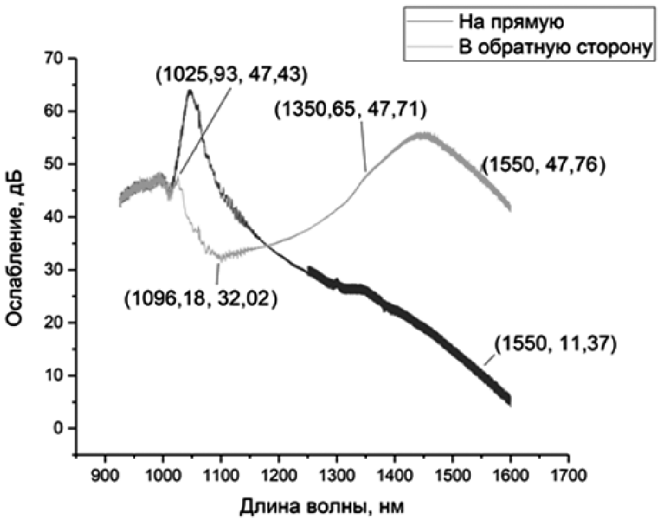


Рис. 6. Ослабление оптического изолятора

На графике продемонстрированы значения коэффициента ослабления на диапазоне длин волн (925–1600 нм). На длинах волн от 1025,93 нм до 1350,65 нм коэффициент изоляции ниже номинальных значений. Минимальное значение коэффициента изоляции равно 32,02 дБ на длине волны 1096,18 нм. На длине волны 1550 нм коэффициент изоляции составил 47,76 дБ. Из приведенных результатов следует, что оптический изолятор имеет не идентичный коэффициент изоляции в диапазоне длин волн с 925 нм по 1600 нм и на некоторых длинах волн (не рабочих) данный показатель может быть ниже.

На Рисунке 7 приведен общий коэффициент ослабления испытанных элементов.

Схема подключения которого представлена, как: атенюатор подключен к выходу «com» dwdm-фильтра, от dwdm-фильтра «c36» подключен на вход изолятора в сторону канала.

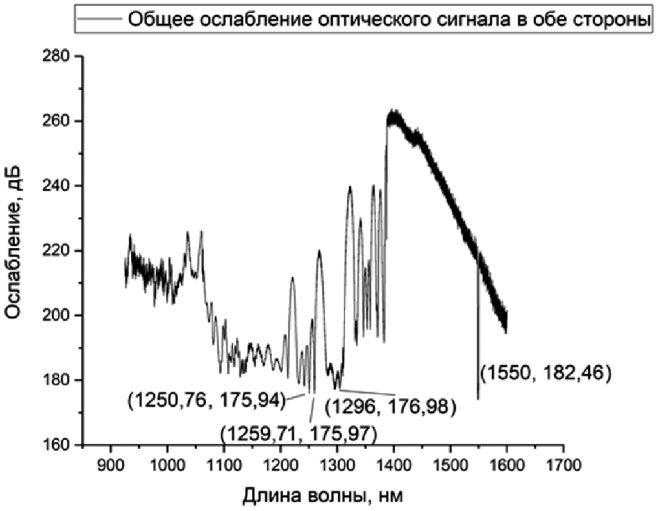


Рис. 7. Общий коэффициент ослабления

На рабочей длине волны 1550 нм коэффициент ослабления равен 182,46 дБ, но также исходя из графика на некоторых длинах волн отличных от рабочей имеются полосы пропускания. На длинах волн 1250,76 нм, 1259,71 нм, 1296,98 нм, коэффициенты ослабления составили 175,94 дБ, 175,97 дБ, 176,98 дБ соответственно, что говорит нам о возможности проведения атаки «Троянский конь» на этих длинах волн.

Заключение

Коэффициенты ослабления найденных полос пропускания при моем наборе оптических компонентов ниже коэффициента рабочей длины волны 1550 нм, что может привести к угрозе безопасности. Нарушитель при совершении атаки «Троянский конь» будет иметь большую вероятность успешной атаки при ее совершении на длинах волн со сниженным коэффициентом изоляции, чем на длинах волн, где данный коэффициент довольно высок.

Для безопасности систем рекомендуется проводить данное испытание для обнаружения полос пропускания и последующего закрытия их другими оптическими компонентами.

В заключении исследования была продемонстрирована исследовательская оптическая схема, позволяющая изучить характеристики оптических компонентов в широком диапазоне длин волн. Проведён анализ полученных результатов, итогом которого стала рекомендация проведения подобных исследований в рамках защиты от угроз направленных на использования побочных спектральных диапазонов, что могут привести к реализации атаки «Троянский Конь».

ЛИТЕРАТУРА

1. Zapatero V., van Leent T., Arnon-Friedman R. et al. Advances in device-independent quantum key distribution. npj Quantum Inf 9, 10 (2023). https://doi.org/10.1038/s41534-023-00684-x.
2. Diamanti E., Lo H.K., Qi B. et al. Practical challenges in quantum key distribution. npj Quantum Inf 2, 16025 (2016). https://doi.org/10.1038/npjqi.2016.25.
3. Ponosova Anastasiya and Ruzhitskaya, Daria and Chaiwongkhot, Poompong and Egorov, Vladimir and Makarov, Vadim and Huang, Anqi. Et al. Protecting Fiber-Optic Quantum Key Distribution Sources against Light-Injection Attacks. PRX Quantum 3, 040307 (2022). https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.3.040307.
4. A.K. Singh, N. Sharma, V.P. Singh, and A. Prabhakar, «Backflash Attack on Coherent One-Way Quantum Key Distribution,» in IEEE Photonics Journal, vol. 17, no. 2, pp. 1–6, April 2025, Art no. 7600206, doi: 10.1109/JPHOT.2025.3557214.
5. Koehler-Sidki A. and Dynes J.F. and Martinez A. and Lucamarini, M. and Roberts, G.L. and Sharpe, A.W. and Yuan, Z.L. and Shields, A.J. Intrinsic Mitigation of the After-Gate Attack in Quantum Key Distribution through Fast-Gated Delayed Detection. Phys. Rev. Applied 12, 024050 (2019). https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.12.024050.
6. Wen-Bo Liu, Yu-Shuo Lu, Yao Fu, Si-Cheng Huang, Ze-Jie Yin, Kun Jiang, Hua-Lei Yin, and Zeng-Bing Chen. Source-independent quantum random number generator against tailored detector blinding attacks. Optics Express. Vol. 31, Issue 7, pp. 11292–11307 (2023). https://doi.org/10.1364/OE.481832.
7. Sajeed S., Minshull C., Jain N. et al. Invisible Trojan-horse attack. Sci Rep 7, 8403 (2017). https://doi.org/10.1038/s41598-017-08279.
8. Molotkov S.N. Trojan Horse Attacks, Decoy State Method, and Side Channels of Information Leakage in Quantum Cryptography. J. Exp. Theor. Phys. 130, 809–832 (2020). https://doi.org/10.1134/S1063776120050064.
9. С.М. Кынев, А.Е. Иванова, В.И. Егоров, А.В. Глейм, А.В. Рупасов, С.А. Чивилихин. Математическое описание поляризационных искажений сигнала в системах квантовой криптографии. Наносистемы: физика, химия, математика, 2012, 3 (3), С. 92–98.
10. Nitin Jain, Elena Anisimova, Imran Khan, Vadim Makarov, Christoph Marquardt, and Gerd Leuchs. Trojan-horse attacks threaten the security of practical quantum cryptography. New Journal of Physics, Volume 16, December (2014). DOI 10.1088/1367-2630/16/12/123030.
11. P. Sharma, A. Agrawal, V. Bhatia, S. Prakash, and A.K. Mishra, «Quantum Key Distribution Secured Optical Networks: A Survey,» in IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 2, pp. 2049–2083, 2021, doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3106659.
12. Han Liying and Li, Yang and Tan, Hao, and Zhang, Weiyang and Cai, Wenqi and Yin, Juan and Ren, Jigang and Xu, Feihu and Liao, Shengkai and Peng, Chengzhi. Effect of light injection on the security of practical quantum key distribution. Phys. Rev. Applied 20, 044013 (2023). https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.20.044013.
13. Tao Wang et al High key rate continuous-variable quantum key distribution using telecom optical components. New J. Phys. 26 023002 (2024). DOI 10.1088/1367-2630/ad1b7e.
14. Portmann Christopher and Renner, Renato. Security in quantum cryptography. Rev. Mod. Phys. 94, 025008 (2022). https://doi.org/10.1103/RevModPhys.94.025008.
15. Dixon A.R., Dynes J.F., Lucamarini M. et al. Quantum key distribution with hacking countermeasures and long-term field trial. Sci Rep 7, 1978 (2017). https://doi.org/10.1038/s41598-017-01884-0.
16. Н.В. Рудавин, В.Ю. Ящук, А.А. Феимов, Р.В. Ожегов, Р.А. Шаховой, "Система синхронизации для устройств квантового распределения ключей", ЖТФ, 96:2 (2026), 341–356
17. Huang Anqi and Li, Ruoping and Egorov, Vladimir and Tchouragoulov, Serguei and Kumar, Krtin and Makarov, Vadim. Laser-Damage Attack Against Optical Attenuators in Quantum Key Distribution. Phys. Rev. Applied 13, 034017 (2020). https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.13.034017.
18. С.Н. Молотков. Trojan-horse-атаки, decoy state-метод и побочные каналы утечки информации в квантовой криптографии. ЖЭТФ, 2020, том 157, вып.6, стр. 963–990. DOI: 10.31857/S0044451020060012.
19. Ю.С. Жидик, А.А. Шейнбергер, М.В. Степаненко, П.Е. Троян. Разработка и изготовление коллимирующей волоконной сферической микролинзы для системы вывода излучения из радиофотонных компонент в оптическое волокно. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. Том 24 № 6 (2024). doi: 10.17586/2226–1494-2024-24-6-871-879.
20. Shahram Eslamian, Mohammad Razaghi. Design and analysis of tunable optical filter based on silicon-on-insulator photonic crystal for visible light communication. Volume 291 (2023). https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.171311.

© Шульга Максим Ильич; Федорчук Дмитрий Александрович;
Спеваков Александр Геннадьевич (Aspev@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.49

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИБЕРУГРОЗ В ВУЗОВСКИХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ИГР: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

MODELING CYBER THREATS IN UNIVERSITY NETWORKS BASED ON GAME THEORY: AN ANALYTICAL REVIEW

O. Yakovleva
Yu. Mindlin
I. Verezubova

Summary. The article provides an analytical review of the application of game-theoretic models for the analysis and prediction of cyber threats in the network infrastructure of higher education institutions. The features of university networks as targets of cyberattacks are considered: user heterogeneity, open access policies, and limited budgets for information security. The main classes of game-theoretic models are analyzed, and their applicability for modeling the «attacker-defender» interaction in the university context is evaluated.

Keywords: game theory, information security, cybersecurity, university network, threat modeling, and resource allocation for protection.

Яковлева Ольга Анатольевна
Кандидат с/х наук, доцент,
Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии имени К.И. Скрябина
yakovleffo@yandex.ru
Миндлин Юрий Борисович
Кандидат экономических наук, доцент,
Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии имени К.И. Скрябина
mindliny@mail.ru
Верезубова Ирина Николаевна
Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии имени К.И. Скрябина
i.verez@yandex.ru

Аннотация. В статье представлен аналитический обзор применения теоретико-игровых моделей для анализа и прогнозирования киберугроз в сетевой инфраструктуре высших учебных заведений. Рассматриваются особенности вузовских сетей как объектов кибератак: гетерогенность пользователей, политика открытого доступа, ограниченность бюджетов на информационную безопасность. Проанализированы основные классы теоретико-игровых моделей, оценена их применимость для моделирования взаимодействия «атакующий — защитник» в вузовском контексте.

Ключевые слова: теория игр, информационная безопасность, кибербезопасность, вузовская сеть, моделирование угроз, распределение ресурсов защиты.

Введение

Сетевая инфраструктура современного вуза представляет собой сложную распределённую систему, объединяющую тысячи рабочих станций, серверы с учебными и административными приложениями, электронные библиотеки, системы управления обучением (LMS), электронные деканаты и научно-исследовательские кластеры. Специфика вузовской сети заключается в нескольких факторах, отличающих её от корпоративной среды.

Во-первых, гетерогенность пользователей: студенты, преподаватели, административный персонал, приглашённые исследователи имеют различные уровни цифровой грамотности и различные потребности в доступе к ресурсам. Во-вторых, политика открытости: академическая традиция предполагает максимально широкий доступ к информационным ресурсам, что противоречит принципу минимальных привилегий, лежащему в основе корпоративной информационной безопасности. В-третьих, ограниченность бюджетов: расходы на информационную безопасность в российских государственных вузах существенно уступают расходам коммерческих организаций сопоставимого масштаба. Наконец, ценность данных: вузы обрабатывают персональные данные десятков тысяч обучающихся, результаты научных исследований, финансовую информацию — объекты, привлекательные для различных категорий злоумышленников [1, 2, 3].

По данным Национального координационного центра по компьютерным инцидентам (НКЦКИ), в 2022–2023 годах фиксировался рост числа кибератак на российские образовательные организации, включая DDoS-атаки, фишинговые кампании и попытки внедрения программ-вымогателей. Вузы оказались одной из наиболее уязвимых категорий организаций.

В условиях ограниченных ресурсов ключевым вопросом становится рациональное распределение средств защиты: какие узлы сети защищать в первую очередь,

какие меры наиболее эффективны против конкретных типов угроз, как действовать в условиях неопределённости относительно намерений и возможностей атакующего. Именно для решения этих задач привлекается аппарат теории игр — математической дисциплины, изучающей стратегическое взаимодействие рациональных агентов с конфликтующими интересами [4].

Материалы и методы

Обзор основан на анализе публикаций в области теоретико-игрового моделирования информационной безопасности, отобранных из баз данных Scopus, Web of Science и РИНЦ за период 2015–2024 годов. Дополнительно привлечены нормативные документы ФСТЭК России, ФСБ России и Минобрнауки России, регламентирующие информационную безопасность в образовательных организациях. Метод — классификационный анализ моделей с оценкой их адекватности специфике вузовской сетевой среды.

Результаты

Для построения адекватных моделей необходимо определить типологию актуальных угроз. На основе анализа инцидентов и рекомендаций НКЦКИ и ФСТЭК России можно выделить следующие категории:

— DDoS-атаки — направлены на отказ в обслуживании web-ресурсов вуза (сайт, LMS, портал приёмной комиссии). Особенно интенсивны в периоды приёмных кампаний.
— Фишинг — социально-инженерные атаки, нацеленные на получение учётных данных пользователей. Студенты и сотрудники вузов являются удобной мишенью ввиду массового использования корпоративной электронной почты.
— Программы-вымогатели — шифрование данных с требованием выкупа. Критичны для вузов, поскольку потеря административных и учебных данных может парализовать деятельность организации.
— Несанкционированный доступ к данным — целенаправленная или оппортунистическая эксплуатация уязвимостей для получения доступа к персональным данным, результатам исследований, финансовой информации.
— Внутренние угрозы — действия авторизованных пользователей (студентов, сотрудников), превышающих свои полномочия, в том числе несанкционированное изменение оценок в электронных системах [5, 6, 7].

Теоретико-игровые модели кибербезопасности

Двухсторонние статические игры — это простейшая модель, которая представляет взаимодействие атакующего (A) и защитника (D) как одновременную игру в нормальной форме. Каждый игрок выбирает стратегию: атакующий — вектор атаки (например, DDoS vs. фишинг), защитник — распределение бюджета защиты между контрмерами (система обнаружения вторжений vs. обучение персонала). Результатом является платёжная матрица, определяющая выигрыш каждого игрока при каждой комбинации стратегий. Решением игры является равновесие Нэша — комбинация стратегий, при которой ни один из игроков не может улучшить свой результат, изменив стратегию в одностороннем порядке [8].

Достоинство модели — аналитическая простота. Ограничение — допущение одновременности ходов, что не всегда соответствует реальности: защитник обычно устанавливает защиту до атаки.

Более реалистичная модель, в которой один игрок (лидер, как правило — защитник) принимает решение первым, а другой (последователь — атакующий) наблюдает действия лидера и выбирает оптимальную ответную стратегию. Решением является равновесие Штакельберга, в котором лидер учитывает рациональную реакцию последователя при выборе своей стратегии.

Применительно к вузовской сети: администратор безопасности (защитник) размещает средства защиты (межсетевые экраны, системы обнаружения вторжений, антивирусные решения) в различных сегментах сети, после чего атакующий выбирает наиболее уязвимый вектор. Модель Штакельберга позволяет найти оптимальное распределение ресурсов защиты, минимизирующее максимальный ущерб при рациональном поведении атакующего [9].

В условиях неполной информации — когда защитник не знает точно тип, возможности и намерения, атакующего — используются байесовские игры. Защитник формирует вероятностное распределение (prior) над возможными типами атакующего (начинающий хакер, организованная группа, инсайдер) и выбирает стратегию, максимизирующую ожидаемый выигрыш. Решением является байесовское равновесие Нэша. Для вузов данная модель особенно релевантна, поскольку спектр потенциальных атакующих чрезвычайно широк: от студента, пытающегося изменить свою оценку, до профессиональной хакерской группировки, действующей по заказу.

Реальное взаимодействие атакующего и защитника — это не однократное событие, а многоэтапный процесс: атакующий проводит разведку, защитник обнаруживает аномалии, атакующий адаптирует стратегию и т.д. Стохастические игры моделируют это взаимодействие как последовательность состояний сети, переходы между которыми определяются действиями обоих игроков и случайными факторами.

Марковские игры — частный случай стохастических игр, в которых будущее состояние зависит только от текущего состояния и действий игроков. Они позволяют моделировать сценарии многоступенчатых атак (например: фишинг → компрометация учётной записи → горизонтальное перемещение по сети → доступ к серверу с данными) [10].

Российские вузы обязаны соблюдать требования ФСТЭК России к защите информационных систем персональных данных (приказ ФСТЭК России от 18.02.2013 № 21), а также требования к защите государственных информационных систем (приказ от 11.02.2013 № 17), если информационные системы вуза квалифицированы как ГИС. Модель угроз, разрабатываемая в соответствии с методикой ФСТЭК (утверждена 05.02.2021), предполагает определение потенциальных нарушителей, актуальных угроз и механизмов защиты. Теоретико-игровой подход может дополнить формальную методику ФСТЭК, обеспечив количественную оценку оптимальности выбранных мер защиты [11].

Среди отечественных средств защиты, актуальных для вузовских сетей: системы обнаружения вторжений (IDS) от компании Positive Technologies (продукт PT Network Attack Discovery), средства защиты от DDoS-атак «Касперский DDoS-защита» от «Лаборатории Касперского», SIEM-системы MaxPatrol SIEM (Positive Technologies), межсетевые экраны «Континент» от компании «Код Безопасности». Теоретико-игровые модели могут использоваться для обоснования выбора и конфигурирования этих средств.

Структура игрового взаимодействия в вузовской сети

Для практического применения теории игр необходимо формализовать участников, их стратегии и функции выигрыша. Схема, представленная на рис. 1 иллюстрирует основные элементы игровой модели кибербезопасности применительно к вузу.

Схема отражает ключевые элементы любой игровой модели кибербезопасности. Особенностью вузовского

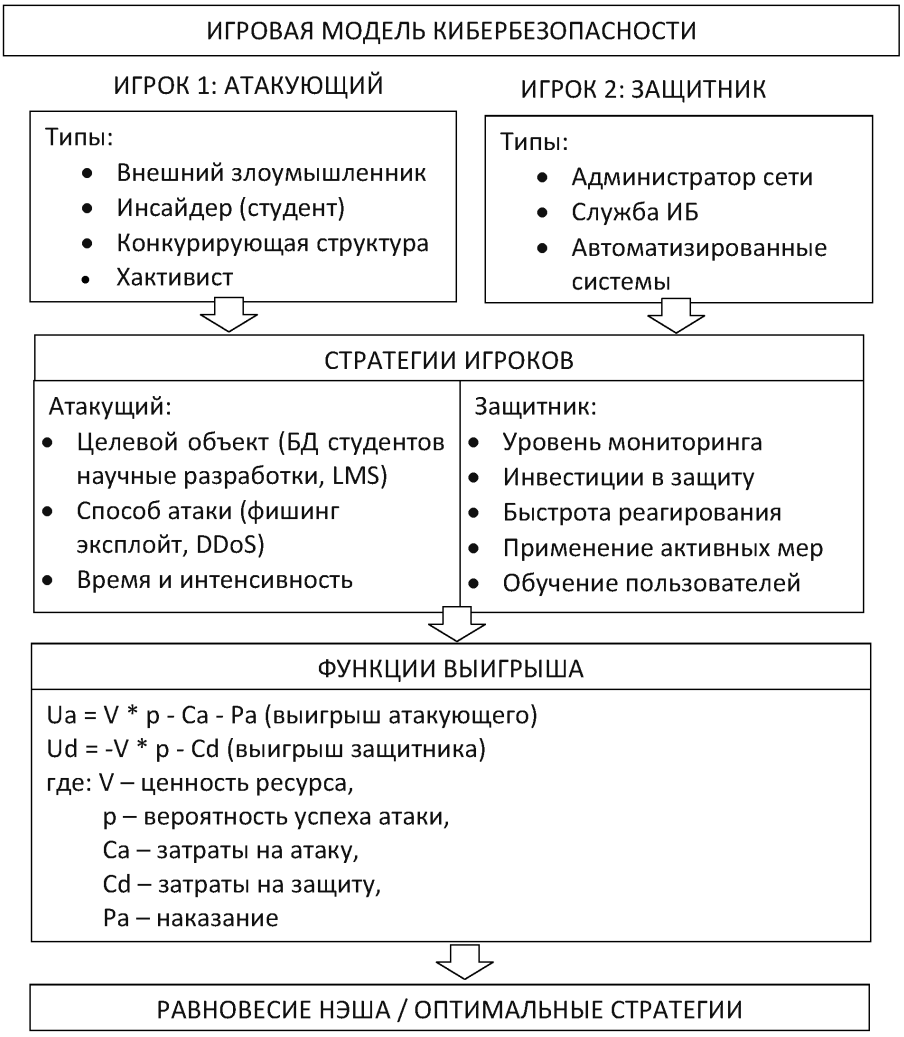


Рис. 1. Игровая модель взаимодействия «атакующий — защитник» в вузовской сети

Источник: составлено авторами

контекста является специфика функций выигрыша: для защитника важны не только прямые потери от атаки, но и репутационные риски (доверие студентов и абитуриентов), а для атакующего — дополнительные издержки, связанные с правовыми последствиями.

Применение теории игр позволяет оценить эффективность различных стратегий защиты. В таблице 1 представлен сравнительный анализ стратегий с учётом специфики вузовских сетей.

Специфические факторы вузовской среды в игровых моделях

На основе обзора выделены факторы, которые должны учитываться при построении игровых моделей кибербезопасности для вузов.

Сезонность активности пользователей и, соответственно, уязвимость сети сильно варьируются в зависимости от учебного периода (сессия, каникулы, набор абитуриентов). Это может быть формализовано как циклические изменения в функциях выигрыша или вероятностях успеха атак [12].

В отличие от коммерческих организаций, где служба ИБ обладает централизованными полномочиями, в вузе решения по безопасности часто принимаются на уровне факультетов и лабораторий. Это порождает кооперативные и многоуровневые игровые модели.

Студенты, как временные пользователи, могут иметь доступ к ресурсам, о которых администраторы имеют неполное представление. Это требует использования байесовых игр с априорными распределениями типов пользователей [13, 14].

Для вуза критическими могут быть не только финансовые данные, но и интеллектуальная собственность (результаты научных исследований), персональные данные студентов, а также доступность образовательных платформ (простои недопустимы в период сессии).

Теоретико-игровой подход к моделированию киберугроз обладает рядом преимуществ: формализует интуитивные представления о противостоянии «атакующий — защитник», позволяет количественно обосновать распределение бюджета безопасности, учитывает рациональность противника (в отличие от вероятностных моделей, предполагающих случайность атак) [15, 16].

Вместе с тем практическое внедрение сталкивается с трудностями. Во-первых, определение платёжных функций — количественная оценка ущерба от атаки и стоимости защитных мер — требует экспертных оценок, которые субъективны. Во-вторых, допущение полной рациональности обоих игроков может быть нереалистичным: не все атакующие действуют оптимально, как и не все администраторы безопасности. В-третьих, вычислительная сложность многостадийных стохастических игр возрастает экспоненциально с ростом числа

Таблица 1.

Сравнительный анализ стратегий защиты вузовских сетей

Стратегия защиты	Описание	Преимущества	Ограничения	Эффективность в вузовской среде
Пассивная защита	Использование стандартных средств защиты (фаерволлы, антивирусы) без активного мониторинга и реагирования	Низкие операционные затраты, простота управления	Не учитывает адаптивность атак, реагирует постфактум	Низкая — вузы часто становятся целями сложных целевых атак
Реактивная защита	Обнаружение и блокирование атак после их начала (IDS/IPS, SIEM)	Позволяет прервать развивающиеся атаки	Требует квалифицированного персонала, возможны ложные срабатывания	Средняя — эффективна для известных типов атак, но не предотвращает новые
Проактивная защита с прогнозированием	Использование игровых моделей для предсказания наиболее вероятных сценариев атак и упреждающей настройки защиты	Позволяет оптимизировать распределение ресурсов, снижает вероятность успеха атаки	Высокие требования к квалификации аналитиков, сложность формализации	Высокая — особенно актуальна при ограниченных бюджетах, характерных для вузов
Гибридная (адаптивная) защита	Комбинация автоматизированных систем и человеческого анализа с динамической настройкой параметров	Сочетает скорость автоматизации и гибкость экспертной оценки	Сложность координации, необходимость обучения персонала	Высокая — оптимальна для вузов с их разнородной инфраструктурой
Стратегия с обучением пользователей	Вложения в повышение цифровой грамотности студентов и сотрудников	Снижает уязвимость от социальной инженерии, улучшает общую культуру безопасности	Эффект проявляется не сразу, требует постоянных усилий	Высокая — критически важна для вузов, где человеческий фактор — главный риск

Источник: составлено авторами

состояний сети, что ограничивает масштабируемость моделей [17, 18].

Перспективным направлением является комбинирование теоретико-игровых моделей с обучением с подкреплением, при котором стратегии защитника формируются адаптивно на основе наблюдаемых действий атакующего, без необходимости полного аналитического решения игры. Кроме того, интеграция теоретико-игровых методов с графами атак, описывающими возможные пути компрометации вузовской сети, позволяет учитывать топологическую структуру инфраструктуры.

Заключение

Теория игр предоставляет строгий математический аппарат для моделирования стратегического взаимодействия атакующих и защитников в вузовских сетях. Игры Штакельберга и байесовские игры наиболее адекватны специфике вузовской информационной безопасности, характеризующейся асимметрией информации и последовательностью принятия решений. Практическое применение требует тщательной параметризации моделей и интеграции с существующими процессами управления информационной безопасностью, регламентированными ФСТЭК России.

Для российских вузов рекомендуется рассматривать теоретико-игровые модели не как самостоятельные системы принятия решений, а как аналитический инструмент поддержки при разработке моделей угроз, распределении бюджетов информационной безопасности и оценке эффективности внедрённых средств защиты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Донцов Д.Ю. Применение методов тематического моделирования для идентификации групп интернет-ресурсов с целью снижения риска киберугроз / Д.Ю. Донцов, С.В. Исаев // Сибирский аэрокосмический журнал. — 2022. — Т. 23, № 2. — С. 148–155.
2. Бучаев М.А. Оценка уровня информационной безопасности государства с учётом актуальных киберугроз на основе имитационного моделирования / М.А. Бучаев // Новеллы права, образования, экономики и управления: Сборник научных трудов по материалам X международной научно-практической конференции, Гатчина, 22 ноября 2024 года. — Гатчина: Издательство ГГУ, 2025. — С. 168–173.
3. Верезубова Н.А. Навык дифференцирования достоверности интернет-ресурсов и их авторитетности как основа формирования культуры кибербезопасности у обучающихся / Н.А. Верезубова, И.В. Кутликова, О.А. Кишкинова // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Гуманитарные науки. — 2025. — № 12. — С. 94–99.
4. Верезубова Н.А. Формирование компетенций работы с Big Data и основ кибербезопасности в современном образовательном пространстве / Н.А. Верезубова, И.Н. Верезубова // Современная наука: вопросы прикладных исследований: Материалы VIII Международной научно-практической конференции, Москва, 17–18 марта 2026 года. — Москва: Московский институт экономики, политики и права, 2026. — С. 75–79.
5. Система моделирования киберугроз и управления инцидентами ИБ в ИТ-инфраструктурах (киберполигон Purple Ground) / В.Н. Богданов, А.П. Вихлянцев, П.С. Вихлянцев [и др.] // Защита информации. Инсайд. — 2023. — № 3(111). — С. 57–65.
6. Малышев А.И. Разработка метода генерации стратегий защиты компьютерной сети на основе теории игр. [Электронный ресурс] — Режим доступа: https://dspace.ncfu.ru/handle/123456789/31035 (дата обращения: 24.05.2026).
7. Максимов А.В. Обеспечение информационной безопасности с помощью теории игр // Материалы VIII Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». [Электронный ресурс] — Режим доступа: URL: https://scienceforum.ru/2016/article/2016018758 (дата обращения: 24.05.2026)
8. Аманбердиев Э., Муминов С., Оразмаммедова С., Раззаков Р. Теория игр в кибербезопасности // Символ науки. 2024. №3–1-2. [Электронный ресурс] — Режим доступа: URL: https://cyberleninka.ru/article/n/teoriya-igr-v-kiberbezopasnosti (дата обращения: 24.05.2026).
9. Подход к выбору оптимальной стратегии защиты от DDoS-атак на основе применения теории игр / И.В. Котенко, И.Б. Саенко, Ю.И. Синещук, Д.Н. Саратов // Правовая информатика. — 2025. — № 3. — С. 27–36. — DOI 10.24412/1994–1404-2025-3-00-03.
10. Мироненков В.Б. Применение теории игр в управлении проектами в области цифровой трансформации / В.Б. Мироненков // Современные методы и технологии реализации цифровых инноваций в бизнесе: Материалы II Межвузовской научно-практической конференции, Москва, 19 декабря 2024 года. — Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Русайнс», 2025. — С. 262–266.
11. Кучер В.А. Математическое моделирование процессов управления информационной безопасностью автоматизированных систем на основе методов теории игр / В.А. Кучер, Е.С. Тарасов // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». — 2016. — № 16. — С. 244–255.
12. Эркаева Н., Нурыллаев А., Ораздурдыева М., Оденепесова А. Киберугрозы в образовательных учреждениях: защита данных студентов и преподавателей // Наука и мировоззрение. 2025. №38. [Электронный ресурс] — Режим доступа: URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kiberugrozy-v-obrazovatelnyh-uchrezhdeniyah-zaschita-dannyh-studentov-i-prepodavateley (дата обращения: 24.06.2026).
13. Аманбердиев Э., Муминов С., Оразмаммедова С., Раззаков Р. Теория игр в кибербезопасности // Символ науки. 2024. №3–1-2. [Электронный ресурс] — Режим доступа: URL: https://cyberleninka.ru/article/n/teoriya-igr-v-kiberbezopasnosti (дата обращения: 25.05.2026).
14. Ерболулы А.Р. Обеспечение безопасного завтра: выводы из анализа ведущих кибератак и их влияния на защиту информации / А.Р. Ерболулы, К.Б. Тусупова // Вестник университета Шакарима. Серия технические науки. — 2024. — № 3(15). — С. 5–15.
15. Овезмырадова Г.П. Моделирование киберугроз в телекоммуникационных системах / Г.П. Овезмырадова, О.К. Атаджанова // Наука через призму времени. — 2026. — № 3(108). — С. 108–110.

16. Колокольцев М.А. Выбор варианта системы информационной безопасности на основе теории игр / М.А. Колокольцев, У.А. Михалева // Телекоммуникации. — 2020. — № 12. — С. 30–31.
17. Маслова А.К. Моделирование атаки на алгоритм квантового распределения ключей на основе теории игр / А.К. Маслова, Е.В. Сазанова // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. — 2025. — Т. 2. — С. 870–874.
18. Яковлева О.А. Потенциальные инциденты нарушения кибербезопасности сквозь призму этических принципов работы с информацией / О.А. Яковлева, Н.А. Верезубова, О.А. Кишкинова // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2025. — № 11. — С. 144–148.

© Яковлева Ольга Анатольевна (yakovleffo@yandex.ru); Миндлин Юрий Борисович (mindliny@mail.ru);
Верезубова Ирина Николаевна (i.verez@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.50

АДАПТАЦИЯ МЕТОДОВ ЦИФРОНАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЙ В АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБАХ

ADAPTATION OF COMPUTATIONAL-EXPERIMENTAL METHODS FOR OPTIMIZING AERODYNAMIC TESTS IN THE WIND TUNNELS

V. Yakushev

Summary. The paper defines the computational-experimental method for aerodynamic testing. It presents a structural diagram of the computational-experimental method for providing tests on aerodynamic models. The sequence of operations and their content are specified for evaluating the characteristics of the tested models in the wind tunnels. The paper describes statistical modelling processes and defines the criteria for assessing the reliability of their results. It provides a definition of factor analysis and explains its impact on shaping the plan for aerodynamic test experiments. The advantages of the computational-experimental method of aerodynamic testing over conventional full-scale testing are highlighted.

Keywords: computational-experimental method, hologram, mathematical models, aircraft, statistical modelling, wind tunnel.

Якушев Вячеслав Анатольевич
Кандидат технических наук, Федеральное Автономное Учреждение Центральный Аэрогидродинамический Институт имени профессора Н.Е. Жуковского
YVyacheslavA@yandex.ru

Аннотация. В статье дано определение цифро-натурному методу аэродинамических испытаний. Представлена структурная схема цифро-натурного метода проведений испытаний аэродинамических моделей. Определен порядок операций и их содержание при оценке характеристик испытываемых моделей в аэродинамических трубах. Представлены процессы статистического моделирования с определением критериев достоверности его результатов. Дано определение факторного анализа и его влияния на формирование плана выполнения аэродинамических испытательных экспериментов. Представлены преимущества цифро-натурного метода аэродинамических испытаний по сравнению с классическими натурными испытаниями.

Ключевые слова: цифро-натурный метод, голограмма, математические модели, летательный аппарат, статистическое моделирование, аэродинамическая труба.

Цифро-натурный метод испытаний аэродинамических характеристик моделей является методом проведения аэродинамических экспериментов и по своим результатам (достоверности) соответствует натурным испытаниям в пределах обеспеченных условий испытаний. Этот метод испытаний применим как для любого летательного аппарата, так и для отдельных систем комплекса.

Существо цифро-натурного метода испытаний определяется, прежде всего, методикой проведения аэродинамического эксперимента. В процессе весового аэродинамического эксперимента в каждом пуске регистрируется вся или необходимая часть реализаций информационных сигналов, данных и сигналов управления (голограмм) в объеме, требуемом для получения необходимой статистики (представительной выборки) при оценке заданных тактика технических характеристик (ТТХ).

Термин «голограмма» дословно переводится как «полная запись», т.е. регистрация всей информации. Регистрируются голограммы данных и сигналов управления на выходе соответствующих функциональных модулей. Различные голограммы могут записываться с помощью одного регистратора.

Получение необходимой статистики в одном натурном эксперименте (пуске) обеспечивается условиями проведения аэродинамического эксперимента: режимами работы испытываемого оборудования и регистрации голограммы, методическим и экспериментальным обеспечением. Автоматизированная обработка голограммы, полученной в пуске аэродинамического эксперимента, с помощью цифровых моделей процессоров или самих процессоров выполняется в лабораторных условиях. Производится автоматизированная оценка статистических характеристик моделей с помощью расчетных методов в соответствии со специально разрабатываемым ПО. Отладка ПО моделирования аэродинамических процессов, режимов и системы взаимосвязи выполняется по голограммам входных сигналов и данных, полученных в натурном аэродинамическом эксперименте.

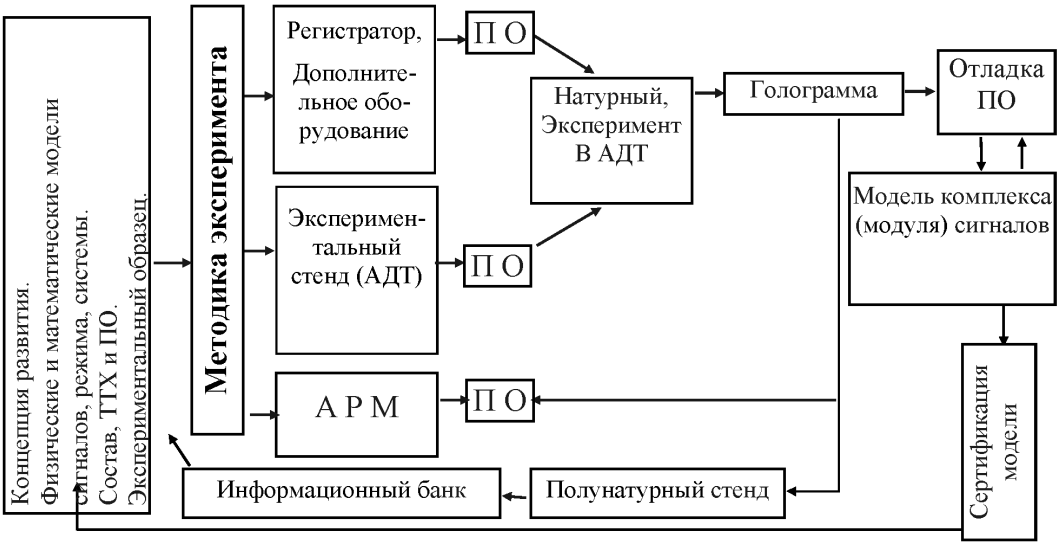


Рис. 1. Структура цифро-натурного метода испытаний аэродинамических моделей

По результатам пусков натурных экспериментов производится сертификация моделей сигналов, режимов системы взаимосвязи и условий функционирования для последующего цифрового и полунатурного моделирования при испытаниях тех режимов моделей, которые невозможно провести в натурных условиях аэродинамических труб (АДТ) по требованиям безопасности, экологии, в условиях боевых повреждений, на запредельных режимах и т.п.

Полученные результаты испытаний и сертифицированные модели заносятся в информационный банк развития и заполняется «электронный паспорт» конкретной модели.

Такая методика испытаний позволяет существенно (в 5...10 раз) уменьшить число натурных аэродинамических экспериментов при сохранении достоверности результатов, так как статистическую оценку ТТХ моделей можно получить в одном аэродинамическом эксперименте в АДТ и даже за один пуск.

На основании опыта предыдущего этапа создания и испытаний летательного аппарата, концепции развития и требований по ТТХ формируются модели (физические и математические) режимов и системы, их программное обеспечение, а также создается макетный (экспериментальный) образец. Эти исходные данные служат для разработки методики проведения аэродинамических экспериментов, главной проблемой при этом является обеспечение получения полных статистических данных об оцениваемых ТТХ за несколько экспериментов (в пределе за один эксперимент (пуск)). В результате формируются требования к регистратору голограмм, экспериментальному оборудованию, автоматизированному рабочему месту (АРМ) испытателя и программному обеспечению испытаний. План натурного (стендового) эксперимента определяет порядок его проведения и получения записи голограмм. Затем голограммы используются для оценки ТТХ с помощью АРМ и (или) полунатурного стенда, а также для отладки программного обеспечения и сертификации модели системы. Полученные результаты заносятся в информационный банк данных.

В соответствии с технологической структурой цифро-натурного метода испытаний Рис. 1 задается порядок операций и их содержание при оценке характеристик моделей. Согласно этой схеме, процесс оценки характеристик включает в себя ряд операций.

Таким образом, цифро-натурный метод испытаний моделей ЛА позволяет сохранить достоинства натурно-модельного метода и устранить его принципиальные



Рис. 2. Технологическая структура испытаний аэродинамических моделей цифро-натурным методом

ограничения и обеспечивает требуемое увеличение эффективности испытаний, снижение числа натурных аэродинамических экспериментов, сроков и стоимости испытаний при одновременном увеличении достоверности оценок ТТХ [1].

1. Методическая подготовка. В процессе методической подготовки разрабатывается (уточняется) критерий оценки характеристик модели ЛА, определяется факторное пространство и условия проведения экспериментов, анализируются особенности функционирования самого ЛА в различных условиях, уточняется перечень сигналов, подлежащих регистрации, а также определяются условия, в которых характеристики входных сигналов остаются неизменными. В процессе методической подготовки используется априорная информация, полученная на всех предыдущих этапах создания ЛА, и учитывается опыт испытаний моделей ЛА других типов.
2. Предварительное моделирование. На этом этапе определяются ожидаемые значения оцениваемых характеристик в различных условиях. В ходе предварительного моделирования применяются математические модели ЛА и модели сигналов систем, разработанные на этапах формирования научно-технического задела, эскизного и технического проектирования и уточненные на этапе проектирования модели ЛА. Под моделью ЛА понимается совокупность моделей ее элементов (блоков, модулей, алгоритмов управления).
3. Факторный анализ. В ходе факторного анализа оценивается степень влияния различных факторов на значения оцениваемых характеристик. Исходя из степени влияния этих факторов, определяется минимально необходимый набор влияющих факторов и функциональная зависимость оцениваемых характеристик от уровней этих факторов. С учетом этих факторов формируется план выполнения аэродинамических испытательных экспериментов, который определяет условия, в которых выполняются натурные эксперименты $i \in I_{\Pi}$ и проводится набор статистики, а также условия, в которых оценки характеристик определяются методом интерполяции $i \notin I_{\Pi}$. На основе плана испытаний составляется программа аэродинамических испытаний.
4. Натурные испытания [2]. Основным назначением натурных аэродинамических экспериментов является:

- оценка функционирования ЛА в целом в реальных условиях его применения $i \in I_{\Pi}$, где $I_{\text{п}}$ — область условий, в которых проводятся натурные эксперименты;
- получение требуемого объема наблюдений при оценке характеристик, требующих набора статистики;
- запись голограмм сигналов и данных;

5. Первичная обработка информации. Эта операция включает в себя:

- ввод информации, зарегистрированной в ходе проведения натурных экспериментов на сторонних системах сбора, в общий банк данных;
- преобразование зарегистрированной информации по уровням данных от кодов аналога цифрового преобразователя (АЦП) до физических параметров;
- оценку качества информационных файлов и устранение сбоев информации;
- экспресс-анализ, на основании которого принимается решение о зачетности натурных аэродинамических экспериментов;
- оценку характеристик и режимов, не требующих набора статистики и вторичной обработки;
- подготовку данных для вторичной обработки и последующего моделирования.

6. Вторичная обработка информации. Эта операция включает в себя функциональные преобразования данных, зарегистрированных в ходе натурных аэродинамических экспериментов, оценку статистических характеристик входных сигналов. Оцениваются плотность вероятности и ее параметры, корреляционные моменты и корреляционные функции флуктуационной и систематической составляющих сигналов. Точность оценок определяется длительностью записанных голограмм (количеством выборок), так как дисперсии этих оценок определяются выражениями:

$D\left[\widehat{m}_x\right] = \sigma_x^2 \,/\, n_x$ — дисперсия оценки математического ожидания;

$D\left[\hat{\sigma}_x^2\right] = 2\sigma_x^4 \,/\, \left(n_x - 1\right)$ — дисперсия оценки дисперсии;

$D\left[\hat{k}_x(n)\right] = \dfrac{2}{n_x}\sum_{k-M}^{M} K_x^2(k)$— дисперсия оценки корреляционной функции, где отрезок (2M+1) оценочных значений корреляционной функции перекрывает область, в которой эта функция имеет достаточно большую амплитуду.

7. Формирование моделей входных сигналов. Способ формирования моделей входных сигналов зависит от вида применяемого моделирования. При цифронатурном моделировании для формирования моделей сигналов используются различные имитаторы высокочастотного сигнала. Статистические характеристики таких сигналов определяются на основании анализа выходных сигналов реальных систем управления и сбора информации.

8. Цифровое моделирование. Проводится с целью идентификации комплексной системы (ЛА и модель АДТ) и ее математической модели. На вход математической модели комплексной системы подается голограмма входных сигналов и данных, записанная в ходе натурного аэродинамического эксперимента. В случае идентичности комплексной системы и ее модели выходные сигналы, записанные в ходе натурного эксперимента, и полученные при моделировании, совпадают. При несовпадении сигналов проводится корректировка модели комплексной системы. После корректировки проводится повторное моделирование с теми же входными воздействиями. Эта процедура повторяется до совпадения выходных сигналов и наблюдений оцениваемой характеристики, полученных в натурном аэродинамическом эксперименте и цифровом моделировании.
9. Статистическое моделирование. Предназначено для набора необходимого количества реализаций, обеспечивающего получение оценок параметров плотности распределения $(\widehat{m}_{ni}(k),\ \widehat{\sigma}_{ni}(k))$ n-й характеристики в i-х условиях $i \in I_{\Pi}$. При статистическом моделировании на вход модели комплексной системы подаются модели входных сигналов. В качестве истинного значения измеряемых параметров $\Delta X(t)$ используется информация внешних систем сбора, а статистические характеристики моделей погрешностей $(\Delta X(t),\ \mathrm{E}_x(t))$ равны оценкам соответствующих характеристик реальных сигналов.
10. Оценка параметров плотности распределения характеристик комплексной системы. При синтезе алгоритмов оценки применена гауссовская аппроксимация законов распределения характеристик комплексной системы. В соответствии с синтезированными алгоритмами нахождение оптимальных оценок $(\widehat{m}_{ni}(k),\ \widehat{\sigma}_{ni}(k))$ по критерию максимума функции правдоподобия осуществляется по принципу уточнения оценки на (k-1)-м шаге по результатам k-го моделирования. Достоинством последовательного оценивания является возможность своевременного прекращения модельных экспериментов при достижении заданной точности оценок параметров плотности распределения характеристик комплексной системы.
11. Интерполяция оценок параметров плотности распределения характеристик комплексной системы. Необходимость интерполяции обусловлена тем, что натурные аэродинамические эксперименты и статистическое моделирование проводятся лишь в ограниченных условиях $i \in I_{\Pi}$. Синтезированный алгоритм интерполяции позволяет определить оценки параметров распределения $(\widehat{m}_{ni}^{*},\ \widehat{\sigma}_{ni}^{*})$ во всех точках $i \in I$. При этом точность оценок в точках $i \in I_{\Pi}$ возрастает. Точность интерполированных оценок возрастает с увеличением точности оценки функциональной зависимости оцениваемых параметров от изменения условий применения комплексной системы.
12. Оценка достоверности результатов моделирования. Оценка достоверности производится в два этапа. На первом этапе по критерию исключения резко выделяющихся наблюдений с помощью правила Томпсона [3] оценивается достоверность отдельно для каждых условий $i \in I_{\Pi}$. На втором этапе оценивается достоверность моделирования совместно для всех условий $i \in I_{\Pi}$ по критерию Колмогорова-Смирнова [4]. Применение двух этапов оценки достоверности обусловлено малым количеством натурных аэродинамических экспериментов (по одному эксперименту в каждой точке $i \in I_{\Pi}$, как правило, $I_{\Pi} \leq 16$), обеспечивая при этом высокую надежность оценок характеристик комплексной системы.
13. Определение соответствия полученных оценок характеристик комплексной системы требованиям тактика технического задания (ТТЗ) и оценка частного показателя эффективности. Характеристики, имеющие стохастический характер, в ТТЗ задаются, как правило, в виде математического ожидания, среднеквадратического отклонения, квантилей различного порядка. При определении соответствия требованиям ТТЗ находятся интервальные оценки этих параметров, либо толерантные интервалы, которые и сравниваются с требованиями ТТЗ. В случае несоответствия характеристик требованиям ТТЗ производится отладка аппаратуры либо ПО комплексной системы. На завершающем этапе по завершению программы испытаний определяется интервальная оценка частного показателя эффективности, который позволяет получить объективную сравнительную оценку испытываемого ЛА по отношению к другим ЛА аналогичного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безуглов А.А., Гаврилов К.Ю. Оценка достоверности статистического моделирования параметров метеорологических явлений при цифронатурных испытаниях радиолокационных комплексов // Труды МАИ. 2025. № 143. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=185646
2. Исаев С.А., Детков А.Н., Безуглов А.А. Цифро-натурный метод оценки характеристик метеорологических радиолокационных комплексов ближней аэродромной зоны // журнал «Автоматизация и современные технологии», 2018, т. 72, № 3, с. 116 URL: https://istina.msu.ru/publications/article/239203995
3. Шуленин В.П. Дополнительные главы математической статистики. — Томск: Изд-во НТЛ, 2018. — 515 с.
4. Мицель А.А. Прикладная математическая статистика. — Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. 2019. — 113 с.

© Якушев Вячеслав Анатольевич (YVyacheslavA@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.02

ПЕКТИНОВЫЕ ПОРОШКИ ЯБЛОЧНОГО И ЦИТРУСОВОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ КАК СРЕДСТВО ЛОКАЛЬНОГО ГЕМОСТАЗА ПРИ ПОВРЕЖДЕНИЯХ ПАРЕНХИМАТОЗНЫХ ОРГАНОВ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

PECTIN POWDERS OF APPLE AND CITRUS ORIGIN AS A MEANS OF LOCAL HEMOSTASIS IN INJURIES OF PARENCHYMAL ORGANS: EXPERIMENTAL AND MORPHOLOGICAL SUBSTANTIATION

D. Berdysh

Summary. Injuries to parenchymal organs remain one of the most challenging issues in surgery due to the high vascularization of tissues, the tendency to diffuse bleeding, and the limitations of traditional hemostasis methods. The aim of the study is to substantiate the effectiveness of highly purified medical apple and citrus pectin powders as local hemostatic agents experimentally and morphologically in modeling parenchymal bleeding.

Keywords: pectin, local hemostasis, parenchymal bleeding, liver, kidney, morphology, repair, thermocoagulation, hemostatic sponge, laboratory animals.

Бердыш Денис Сергеевич
Преподаватель, ФГБОУ ВО Майкопский государственный технологический университет
drberdysh@bk.ru

Аннотация. Повреждения паренхиматозных органов остаются одной из наиболее сложных задач хирургии вследствие высокой васкуляризации тканей, склонности к диффузному кровотечению и ограничений традиционных методов гемостаза. Цель исследования — экспериментально и морфологически обосновать эффективность порошков высокоочищенного медицинского яблочного и цитрусового пектина в качестве локальных гемостатиков при моделировании паренхиматозного кровотечения.

Ключевые слова: пектин, локальный гемостаз, паренхиматозное кровотечение, печень, почка, морфология, репарация, термокоагуляция, гемостатическая губка, лабораторные животные.

Пектины — это природные полисахариды, которые содержатся в клеточных стенках растений (преимущественно в яблоках, цитрусовых, сахарной свёкле). В медицине интерес к пектинам обусловлен их уникальными физико-химическими и биологическими свойствами: способностью к гелеобразованию, высокой сорбционной активностью, пребиотическим, противовоспалительным и антиоксидантным эффектами. Благодаря низкой токсичности и хорошей переносимости пектины активно исследуются и применяются в различных областях клинической практики [1,2].

Пектины способствуют снижению уровня холестерина за счёт связывания желчных кислот в кишечнике и стимуляции их выведения. Это приводит к усиленному использованию холестерина печенью для синтеза новых желчных кислот и, как следствие, к снижению его концентрации в крови. Также пектины замедляют всасывание глюкозы, что полезно при сахарном диабете 2 типа и метаболическом синдроме [3,4].

В онкологии пектины исследуются как средства защиты здоровых тканей при химио- и лучевой терапии. Их способность связывать свободные радикалы и снижать окислительный стресс, а также защищать слизистую ЖКТ от токсического действия препаратов делает их ценным компонентом сопроводительной терапии. Кроме того, некоторые модифицированные пектины демонстрируют противоопухолевую активность в экспериментальных моделях [5,6].

Пектиновые гели, порошки, плёнки применяются в лечении ран и ожогов. Они создают влажную среду, способствующую заживлению, обладают гемостатическим и антисептическим действием, ускоряют эпителизацию. В дерматологии пектиновые составы используют для лечения трофических язв и хронических ран [7]. В фармацевтике пектины служат вспомогательными веществами: их используют как загустители, стабилизаторы, связующие агенты в таблетках, а также для создания матриц с контролируемым высвобождением лекарственных средств [8].

Современные исследования сосредоточены на модификации структуры пектинов для усиления их био-

логической активности, создании комбинированных препаратов и разработке новых лекарственных форм (наночастицы, гидрогели). Особый интерес представляет изучение влияния пектинов на микробиом и иммунную систему, а также применение пектиновых порошков в качестве гемостатического средства [9,10].

Эксперимент выполнен на 330 лабораторных крысах линии Wistar. В условиях in vivo моделировали паренхиматозное кровотечение из печени и почек с сопоставлением пектиновых порошков с ушиванием раны, гемостатической губкой и термокоагуляцией. Гемостатическую эффективность оценивали по времени наступления гемостаза и величине кровопотери; морфологическую динамику репаративных процессов исследовали гистологически в сроки 3, 7 и 14 суток (печень), и 7, 14 и 21 суток (почка).

Установлено статистически значимое сокращение времени гемостаза и уменьшение кровопотери при применении яблочного и цитрусового пектина по сравнению с гемостатической губкой. Морфологически применение пектинов сопровождалось более благоприятным профилем тканевой реакции: преобладанием макрофагального звена при низкой выраженности экссудативного компонента, ускоренной организацией репаративной ткани и более ранним восстановлением органоспецифической архитектоники по сравнению с термокоагуляцией и гемостатической губкой. Полученные данные подтверждают перспективность пектинов как локальных гемостатиков с дополнительным репаративным потенциалом и обосновывают необходимость дальнейшей стандартизации дозирования и протоколов применения в эксперименте.

Цель исследования: Оценить гемостатическую эффективность порошков высокоочищенного медицинского яблочного и цитрусового пектина при экспериментальном повреждении печени и почек у лабораторных животных и морфологически охарактеризовать динамику репаративных процессов в сравнении с ушиванием, гемостатической губкой и термокоагуляцией.

Материалы и методы

Исследование выполнено как комплексная экспериментально-морфологическая работа, ориентированная на одновременную оценку функциональной эффективности локального гемостаза и «биологической цены» вмешательства в виде тканевой реакции и динамики репарации. Экспериментальную часть проводили на 330 лабораторных крысах линии Wistar независимо от пола. Содержание животных, подготовка к вмешательствам и анестезиологическое обеспечение осуществлялись в соответствии с действующими нормативно-этическими требованиями, регламентирующими проведение исследований на лабораторных животных, что позволяло минимизировать влияние неконтролируемых факторов (стресс, вариабельность глубины наркоза, инфекционные осложнения) на показатели гемостаза и морфологические исходы.

Экспериментальный дизайн включал серии in vivo с моделированием паренхиматозного кровотечения на двух органных моделях, отличающихся особенностями васкуляризации и репаративного ответа. В печёночной модели формировали стандартизированное тангенциальное повреждение/секторальную резекцию, сопровождавшуюся капиллярно-паренхиматозным кровотечением. В почечной модели выполняли резекцию полюса без повреждения лоханки с созданием кровоточащей раневой поверхности, что позволяло воспроизвести клинически значимую ситуацию паренхиматозного кровотечения при сохранении сопоставимости условий между группами. Для оценки эффективности и сопоставления с применяемыми в практике подходами использовали несколько способов гемостаза: ушивание раны рассматривали как контрольный (референсный) вариант механического гемостаза; гемостатическую губку и термокоагуляцию включали в качестве групп сравнения как распространённые методы локальной остановки кровотечения, различающиеся механизмом действия и выраженностью тканевого повреждения; порошки яблочного и цитрусового пектина применяли в опытных группах как исследуемые локальные гемостатики.

Оперативные вмешательства выполняли под комбинированным наркозом с достижением хирургической стадии, что обеспечивало воспроизводимость операционного этапа и сопоставимость физиологических условий гемостаза. Количественные параметры эффективности фиксировали в стандартизированном формате: время кровотечения/время наступления гемостаза регистрировали секундомером, а объём кровопотери определяли методом взвешивания по принятой методике. Такой подход позволял получать сравнимые показатели как внутри отдельной серии, так и при межсерийном сопоставлении, минимизируя влияние субъективных факторов регистрации.

Морфологическая часть исследования была построена по принципу динамического наблюдения, поскольку оценка локального гемостаза в паренхиматозных органах принципиально не ограничивается фактом остановки кровотечения и требует понимания характера воспалительного ответа, степени альтерации и темпов восстановления тканевой структуры. Забор органов проводили после эвтаназии животных в сроки, отражающие ключевые фазы репарации: для печени — на 3, 7 и 14 сутки, для почек — на 7, 14 и 21 сутки. Полученные образцы подвергали стандартной гистологической обработке с окраской гематоксилином и эозином, и по-

следующей микроскопической оценкой выраженности воспалительной реакции, степени деструкции (альтерации) паренхимы, активности фибробластной пролиферации, формирования соединительнотканного каркаса/капсулы и восстановления органоспецифической архитектоники. Тем самым морфологический блок выступал не вспомогательным, а доказательственным компонентом, позволяющим интерпретировать функциональные показатели гемостаза через призму качества заживления и потенциальных рисков отсроченных тканевых изменений.

Статистическую обработку результатов выполняли методами вариационной статистики в программе Statistica. Рассчитывали описательные показатели, а межгрупповые различия оценивали при уровне значимости $p < 0,05$ с использованием параметрических либо непараметрических критериев в зависимости от характера распределения данных, что обеспечивало корректность выводов как для количественных показателей гемостаза, так и для сопоставления результатов между сериями и группами.

Результаты

В печёночной модели применение пектиновых порошков сопровождалось выраженным снижением времени гемостаза и кровопотери по сравнению с гемостатической губкой. При численности 60 наблюдений на группу время остановки кровотечения при гемостатической губке составило **67,3±0,3 с**, тогда как при использовании яблочного и цитрусового пектина — **28,9±0,2 с**. Кровопотеря при губке составила **23,9±0,2 мг**, при применении яблочного и цитрусового пектина — **9,1±0,1 мг**. Различий между яблочным и цитрусовым пектином по указанным параметрам в данной модели не выявлено.

Морфологическая динамика печени при применении пектинов характеризовалась ранней макрофагальной реакцией с фагоцитозом частиц материала и минимальной экссудативной компонентой на ранних сроках. К 7-м суткам отмечались активная фибробластная пролиферация и формирование коллагенового каркаса репарации, а к 14-м суткам — восстановление долькового строения и формирование капсулы печени при практически полной резорбции частиц пектина. В группе гемостатической губки воспалительный компонент сохранялся более длительно, наблюдались признаки нарушения микроциркуляции и более медленная организация репаративного слоя.

В почечной модели применение пектинов обеспечивало быстрый локальный гемостаз и сопровождалось более щадящими морфологическими изменениями по сравнению с термокоагуляцией и гемостатической губкой. На 7-е сутки в группе термокоагуляции доминировали явления тканевого детрита, инфильтрации и альтерации канальцевого и клубочкового аппарата, а также отёка межклеточного вещества. На фоне гемостатической губки сохранялись признаки отёка, лакунарных кровоизлияний и умеренной деструкции. При применении пектинов тканевая организация паренхимы сохранялась в большей степени, выраженность альтерации была минимальной; к 14–21 суткам морфологическая картина приближалась к интактной, воспалительные изменения отсутствовали либо были минимальны.

Обсуждение

Совокупность данных подтверждает выраженный гемостатический потенциал высокоочищенных пектиновых порошков яблочного и цитрусового происхождения при моделировании паренхиматозного кровотечения у лабораторных животных. Преимущество по времени гемостаза и величине кровопотери в печёночной модели по сравнению с гемостатической губкой имеет практическое значение, поскольку отражает не только ускорение прекращения кровотечения, но и снижение суммарной кровопотери в условиях стандартизированного повреждения.

Ключевой особенностью является морфологически более благоприятная «цена» гемостаза при использовании пектинов. В отличие от термокоагуляции, где гемостаз достигается за счёт коагуляционного повреждения ткани с последующей более длительной репарацией, применение пектинов сопровождалось ограниченной экссудацией, преобладанием макрофагального звена и более ранней организацией репаративной ткани. По сравнению с гемостатической губкой отмечалась меньшая длительность воспалительного компонента и более быстрое восстановление органоспецифической архитектоники, что особенно отчётливо проявлялось в почечной модели.

Сопоставимость яблочного и цитрусового пектина по базовым показателям гемостаза в печёночной модели указывает на близость их функциональных характеристик в рамках применённых протоколов, что повышает воспроизводимость подхода и снижает вероятность «партийного» эффекта. Дальнейшее развитие направления требует стандартизации дозирования (масса материала/площадь раны), техники нанесения и унификации критериев морфологической оценки для расширения сопоставимости результатов между сериями и лабораториями.

Заключение

В эксперименте на лабораторных животных показано, что порошки высокоочищенного яблочного и цитру-

сового пектина являются эффективными локальными гемостатиками при моделировании кровотечения из печени и почек. Их применение обеспечивает сокращение времени гемостаза и уменьшение кровопотери, а также ассоциировано с более благоприятной морфологической динамикой репарации по сравнению с термокоагуляцией и гемостатической губкой. Полученные результаты обосновывают перспективность дальнейшей экспериментальной стандартизации протоколов применения пектиновых порошков как средств локального гемостаза.

Выводы

1. Применение яблочного и цитрусового пектина у лабораторных животных обеспечивает статистически значимое сокращение времени кровотечения и уменьшение кровопотери при моделировании паренхиматозного кровотечения печени: **28,9±0,2 с** и **9,1±0,2 мг** против **67,3±0,1 с** и **23,9±0,15 мг** при использовании гемостатической губки ($p<0,05$). Различий между яблочным и цитрусовым пектином по этим параметрам не выявлено.
2. Морфологически при применении пектинов в печени отмечается раннее доминирование макрофагальной реакции с фагоцитозом частиц материала при низкой выраженности экссудативного компонента и более ранняя организация репаративной ткани с восстановлением дольковой структуры и формированием капсулы к 14-м суткам.
3. В почечной модели применение пектинов сопровождается более щадящими морфологическими изменениями и более быстрым восстановлением тканевой архитектоники по сравнению с термокоагуляцией и гемостатической губкой; к 14–21 суткам морфологическая картина приближается к интактной при минимальных признаках воспаления.
4. Сравнительный анализ показывает, что термокоагуляция обеспечивает гемостаз ценой выраженного коагуляционного повреждения и более длительной альтерации ткани, тогда как пектиновые порошки позволяют достигать гемостатического эффекта при более благоприятном профиле репарации.
5. Полученные экспериментально-морфологические данные обосновывают перспективность пектиновых порошков как локальных гемостатиков и необходимость дальнейшей стандартизации дозирования и протоколов нанесения в рамках экспериментальных моделей паренхиматозного кровотечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хавкин А.И., Николайчук К.М., Шпайнер Е.В. и др. Противовоспалительное действие высоко- и низкометилэтерифицированных яблочных пектинов in vivo и in vitro // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. — 2021. — № 3. — С. 119–133.
2. Марков П.А., Волкова М.В., Хасаншина З.Р. и др. Влияние структурных особенностей пектинов на их взаимодействие с кишечной микробиотой и иммунным барьером // Вопросы питания. — 2020. — Т. 89, № 5. — С. 45–54.
3. Бердыш Д.С., Хакуй Э.С., Беслангурова З.А. и др. Применение пектинов в медицинской практике: обзор современных данных // Международный научно-исследовательский журнал. — 2022. — № 4 (118). — С. 23–31.
4. Попов С.В., Мартинсон Е.А. Сорбционные свойства пектинов и их применение в детоксикации организма // Токсикологический вестник. — 2019. — № 6. — С. 12–18.
5. Николаев В.А., Семёнова А.А. Пектины как компоненты энтеросорбентов: механизмы действия и клиническая эффективность // Фармация и фармакология. — 2021. — Т. 9, № 2. — С. 88–97.
6. Козлова Л.И., Фёдоров И.Н. Использование пектиновых гелей в лечении ран и ожогов // Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова. — 2020. — № 7. — С. 65–70.
7. Смирнова Т.В., Петров К.Ю. Влияние пектинов на липидный и углеводный обмен: перспективы применения в кардиологии и эндокринологии // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. — 2021. — Т. 20, № 3. — С. 102–110.
8. Гуревич К.Г., Соколова Н.А. Пектины в сопроводительной терапии онкологических больных: защита слизистых и снижение токсичности лечения // Онкология. Журнал им. П.А. Герцена. — 2022. — Т. 11, № 1. — С. 55–62.
9. Иванов А.П., Кузнецова М.В. Фармацевтические аспекты применения пектинов: от вспомогательных веществ к активным компонентам // Химико-фармацевтический журнал. — 2020. — Т. 54, № 8. — С. 3–10.
10. WHO Guidelines on the use of natural polysaccharides in medicine and nutrition. — Geneva: World Health Organization, 2018. — 45 p.

© Бердыш Денис Сергеевич (drberdysh@bk.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.06

ПУТИ ПОСТАНОВКИ ДИАГНОЗА СИНДРОМА МУНЬЕ-КУНА

DIAGNOSIS OF MOUNIER-KUHN SYNDROME

I. Vvedenskaya
A. Dzyubaylo
D. Kazennov
V. Vvedensky
E. Sharapova

Summary. Mounier-Kuhn syndrome is a rare respiratory pathology of unknown etiology. Atrophy and elastolysis of the fibrocartilaginous membrane of the airways develop and tracheobronchomegaly, numerous saccular diverticula and bronchiectasis are formed. In the clinic, the syndrome is manifested by frequent recurrent respiratory infections. There are no more than 400 patients with tracheobronchomegaly in the world. In most cases, pathognomonic symptoms are absent and patients are diagnosed with chronic obstructive pulmonary disease or idiopathic fibrosing alveolitis and even pulmonary tuberculosis, for which patients receive treatment. Based on a number of criteria and measurements, computed tomography and fibrobronchoscopy allow for the effective diagnosis of this syndrome. The treatment methods used today are symptomatic. The presented clinical case provides an understanding of the choice of diagnostic algorithm in patients with frequently recurring respiratory infections, introduces other symptoms and new methods of treating this pathology according to literature data.

Keywords: tracheobronchomegaly, bronchiectasis, recurrent respiratory infections, computed tomography, fiberoptic bronchoscopy.

Введенская Ирина Петровна
кандидат медицинских наук, ФГБОУ ВО Самарский государственный медицинский университет
wasily10@mail.ru
Дзюбайло Анна Владимировна
доктор медицинских наук, ФГБОУ ВО Самарский государственный медицинский университет
a.v.dzyubajlo@samsmu.ru
Казеннов Дмитрий Александрович
ЧОО ВО Медицинский университет «Реавиз»
reaviz.doctor@mail.ru
Введенский Василий Юрьевич
ГБУЗ СО Отрадненская городская больница
wasily10@mail.ru
Шарапова Елена Вячеславовна
ГБУЗ СО «Борская ЦРБ»
elen.sharapovaa@yandex.ru

Аннотация. Синдром Мунье-Куна — редкая патология дыхательных путей неизвестной этиологии вследствие атрофии и эластолиза фиброзно-хрящевой оболочки воздухоносных путей с формированием трахеобронхомегалии, многочисленных мешковидных дивертикулов и бронхоэктазов, сопровождающаяся частыми рецидивирующими респираторными инфекциями. В мире насчитывается не более 400 пацеинтов с трахеобронхомегалией. В подавляющем числе случаев при отсутствии патогномоничных симптомов заболевание изначально диагностируется как хроническая обструктивная болезнь или идиопатический фиброзирующий альвеолит или туберкулез легких в связи с которыми пациенты получают лечение. Компьютерная томография и фибробронхоскопия на основании ряда критериев и измерений позволяют эффективно выявлять этот синдром. Применяемые на сегодняшний день способы лечения являются симптоматическими. Приведенный клинический случай дает понимание выбора диагностического алгоритма у пациентов с часто рецидивирующими респираторными инфекциями, знакомит с другими симптомами и новыми методами лечения данной патологии по данным литературы.

Ключевые слова: трахеобронхомегалия, бронхоэктазы, рецидивирующие респираторные инфекции, компьютерная томография, фибробронхоскопия.

Введение

Синдром Мунье-Куна представляет собой крайне редкое заболевание, в основе которого лежат структурные изменения дыхательных путей вследствие атрофии и эластолиза фиброзно-хрящевой оболочки воздухоносных путей с формированием трахеобронхомегалии, многочисленных мешковидных дивертикулов и бронхоэктазов. Такие изменения становятся причиной неэффективного мукоцилиарного клиренса, проявляющегося в клинике частыми рецидивирующими инфекциями нижних дыхательных путей.

Впервые клиника данного синдрома была описана в 1932 году, хотя более ранние наблюдения датированы 1897 годом, когда впервые были описаны характерные морфологические изменения, выявленные у умерших вследствие прогрессирующей дыхательной недостаточности и асфиксии. В мире описано 365 клинических случаев синдрома Мунье-Куна. Не исключено, что, его распространенность в популяции составляет 0,4–1,6 %

и выше, в связи с совершенствованием методов лучевой диагностики [1].

Наиболее часто синдром развивается у мужчин. Манифест заболевания обычно приходится на возраст 20–40 лет, при этом описаны его случаи у лиц 1,5–2 и 86 лет. Сначала заболевание протекает без симптомов, затем присоединяются единичные или множественные симптомы, обусловленные тяжелой дыхательной недостаточностью. Клинический интерес к синдрому Муньe-Куна, прежде всего, связан с длительным анамнезом рецидивирующих респираторных инфекций, различными алгоритмами и методами диагностики, результаты которых интерпретируются в пользу хронической обструктивной болезни легких или идиопатического фиброзирующего альвеолита или бронхиальной астмы или туберкулеза легких [2]. В связи с этим, пациентам назначают различные схемы терапии, эффективность которых уменьшается на фоне прогрессирующих структурных изменений дыхательных путей [3]. Прогноз заболевания остается неблагоприятным. В статье представлен многолетний путь диагностики синдрома Мунье-Куна у взрослого пациента с часто рецидивирующими респираторными инфекциями.

Клинический случай

Пациент М., 60 лет поступил в пульмонологическое отделение ГБУЗ СОКБ имени. В.Д. Середавина (г. Самара) с жалобами на сильную одышку, возникающую во время незначительной физической нагрузки или в покое при нахождении во влажном помещении; затруднения на вдохе; кашель со скудной мокротой или периодически с обильным отхождением слизисто-гнойной мокроты; постоянную слабость; незначительное повышение температуры; потерю веса за последний год на 15 кг.

Считает себя больным с 30 летнего возраста, когда впервые при плановой крупнокадровой флюорографии (ККФ) были обнаружены изменения в легких, соответствующие рентгенологической картине диссеминированного туберкулеза легких. Пациент был направлен в профильное лечебно-профилактическое учреждение Противотуберкулёзный диспансер, в котором выполнили открытую биопсию S1 верхушечного сегмента, S3 переднего сегмента в верхней доле и S4 латерального сегмента правого лёгкого. Патоморфологическое исследование позволило выявить гомогенную картину изменений за счет нарушения архитектоники легочной ткани, утолщения альвеолярных перегородок с аккумуляцией макрофагов в просвете альвеол, полей фиброза. Такая морфологическая картина была интерпретирована в пользу идиопатического фиброзирующего альвеолита легких. Назначено лечение пеницилламином и спиронолактоном, купренилом. Для получения второго мнения материал биопсии был направлен в НИИ интерстициальных и орфанных заболеваний Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета имени академии И.П. Павлова, патоморфологами которого диагноз был подтвержден. Обострения заболевания возникали по 9–10 раз в год, лечился амбулаторно. В 53 года пациент отметил значительное ухудшение состояния: стали беспокоить усиление одышки при незначительной физической нагрузке, удушающий кашель со слизисто-гнойной мокротой, повышенная (в пределах субфебрильной) температура в связи с чем был госпитализирован в отделение пульмонологии СОКБ им. В.Д. Середавина. По результатам обследования был поставлен клинический диагноз: Хроническая обструктивная болезнь легких (ХОБЛ). Дыхательная недостаточность II стадии. Проведенное консервативное лечение позволило незначительно улучшить состояние. Повторно госпитализировался и проходил лечение каждые 2 года. Диагноз при последующих госпитализациях: Идиопатический фиброзирующий альвеолит.

Пациент отмечал наличие аналогичных, но в более легкой степени, симптомов у отца и родного брата, но ни один из них по этому поводу обследования и лечения не проходили. Сопутствующие заболевания: артериальная гипертензия. Перенесённые операции и травмы пациент отрицает. Вакцинация проведена согласно национальному календарю профилактических прививок.

При осмотре пациент астеничного телосложения, общее состояние удовлетворительное, сознание ясное, кожные покровы бледно-розовые, влажные, эластичные. Основные группы лимфатических узлов не увеличены. Сатурация кислорода, определенная прибором, составила 92 %. Температура тела — 37,4 °С.

При аускультации в лёгких жёсткое дыхание, по всем лёгочным полям прослушивались сухие хрипы, напоминающие «треск целлофана» (хрипы «velcro»), в нижних отделах легких крепитация. Частота дыхательных движений — 26 в минуту. Тоны сердца приглушены, ритм правильный. Пульс удовлетворительного наполнения и напряжения, 92 удара в минуту. Артериальное давление — 130/80 мм рт. ст.

По данным лабораторных методов исследования на момент госпитализации в общем анализе крови: эритроциты — $5{,}4\times10^{12}$/л; гемоглобин 165 г/л; лейкоциты $9{,}2\times10^{9}$/л; сегментоядерные лейкоциты — 60 %, лимфоциты 34 %, моноциты 6 %; СОЭ 42 мм/ч; эозинофилы — 0 %; базофилы — 0 %; тромбоциты — 280×10^{9}/л.

Концентрация циркулирующих иммунных комплексов (ЦИК), определенных методом ИФА составила 0,045 Ед/мл (норма 0,5—100 Ед/мл).

По данным рентгенографического исследования органов грудной клетки в двух проекциях обнаружены

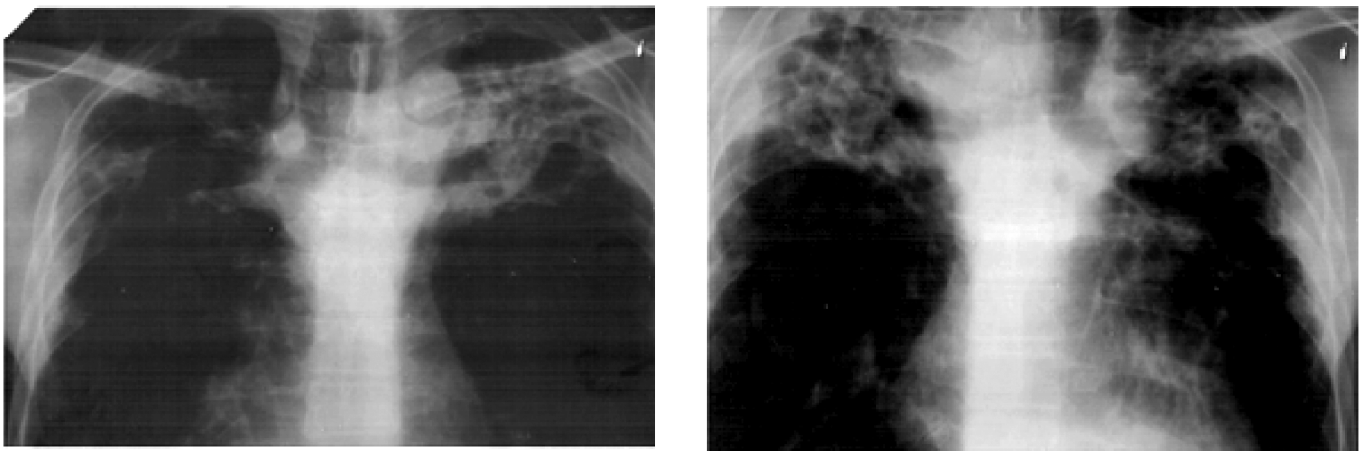
в верхних отделах обоих легких грубые фиброзные изменения с наличием множественных разнокалиберных полостей в виде кист; в средних отделах — на фоне фиброзно уплотненной легочной ткани эмфизематозные изменения. Диаметр трахеи не измеряли, но визуально превышал поперечный размер тел грудных позвонков. Лёгочный рисунок деформирован за счёт пневмосклероза. Корни лёгкого бесструктурные, уплотнены, расширены. Паракостальные синусы выполнены грубыми спайками, нельзя исключить наличие выпота в синусах. Диафрагма не контурировалась. Органы средостения: тень сердца расширена в поперечном направлении (Рис. 1 а,б).

Учитывая неравномерное расширение просветов трахеи и главных бронхов, рентгенологические признаки бронхоэктатичесих и пневмофиброзных изменений в средней доле правого и нижней доли левого легких для более детальной визуализации патологических структур была выполнена компьютерная томография (КТ) органов грудной клетки. На полученных сериях компьютерных томограмм на всем протяжении бронхиального дерева были выявлены множественные бронхоэктазы различной формы и размеров. В бронхах верхних отделов легких — веретенообразные и мешотчатые со средним диаметром 35мм, в нижних отделах — аналогичных размеров цилиндрические структуры. Стенки главных бронхов диффузно утолщены, расширены с волнисто-фестончатыми краями. Бронхоэктазы окружены зонами низко пневматизированной легочной ткани за счет ее пневмофиброза с уменьшением объёма поражённых отделов лёгких (пневмоцирроз) преимущественно в верхних отделах и в меньшей степени — в нижних отделах. Просветы бронхоэктазов свободны. Трахея и главные бронхи расширены. Диаметр трахеи составил 32 мм; левого и правого бронха — по 24 мм. На выдохе отмечена подвижность стенок трахеи с уменьшением просвета до 70 % от исходных значений. По всем легочным полям множественные мелкие центролобулярные очаговые образования с жидкостным компонентом, по типу «дерева с почками» — являющиеся рентгенологическим признаком инфекционного бронхиолита. Лёгочные артерии резко расширены. Лимфатические узлы не увеличены. Плевра утолщена за счёт шварт.

При исследовании функции внешнего дыхания получены следующие значения: частота дыхания (ЧД) — 26 в минуту; форсированная жизненная емкость легких (ФЖЕЛ) — 1,8 л; дыхательный объем (ДО) — 0,45 л; минутный объем дыхания (МОД) — 11,7 л/мин; резервный объем вдоха (РОвд) — 0,9 л; объем форсированного выдоха за 1 секунду ($ОФВ_1$) — 1,2 л; должная ЖЕЛ (ДЖЕЛ) — 4,0 л; остаточный объем легких (ООЛ) — 3,2 л; общая емкость легких (ОЕЛ) — 6,5 л; индекс Тиффно — 66 %.

Полученные изменения свидетельствовали о резком снижении ЖЕЛ и значительных нарушениях проходимости дыхательных путей. Соотношение изменений МОС начала и второй половины ФЖЕЛ указывает на наличие стеноза внегрудных отделов дыхательных путей.

Изменения, выявленные при помощи рентгенографии и КТ, а также функциональные изменения по данным ФВД согласовывались с результатами выполненной пациенту М. фибробронхоскопии, во время которой обнаружены: значительное расширение и истончение стенок трахеи с формированием очагов фибро-хондромаляции по типу «зубьев пилы». Аналогичным образом претерпели изменения стенки главных бронхов. Слизистая трахеи с признаками атрофии, диффузно гиперемирована. Анатомия сегментарных бронхов сохранена, слизистая оболочка диффузно гиперемирована. В просвете большей части сегментарных бронхов в небольшом количестве содержался слизисто-гнойный секрет. На выдохе отмечено сужение просвета расширенной трахеи в переднезаднем направлении, не более, чем на 1/2 диаметра ее



а б

Рис. 1. Рентгенограмма легких пациента М. Прямая проекция. Неспецифический цирроз верхних долей обоих лёгких. Пневмосклероз. Эмфизема. Вторичный поликистоз верхних долей лёгких

просвета. Таким образом, по данным фибробронхоскопии наблюдаемые изменения соответствовали двустороннему атрофическому диффузному катаральному бронхиту 1–2 степени (Лукомский Г.И., 1982), дыхательной дистонии 1 степени (J. Lemoine, 1949).

В ходе эхокардиографии получены следующие данные: левый желудочек: КДР — 4,1 см, КСР — 2,5, ДО — 74 мл, СО — 23, УО — 51 мл, ФИ — 69 %, ФУ — 38 %, толщина задней стенки в диастолу — 10 мм, экскурсия задней стенки — 1,0 мм. Локальных зон гипо— и акинезии не выявлено. МЖП — 0,8 см, экскурсия движения — 0,5 см. Правый желудочек: диастолический размер 4,1 см. Трикуспидальный клапан не изменён. Систолический градиент давления 26 мм рт. ст. Митральный клапан: диастолическое расхождение створок 2,5 см. E/A 1,0. Левое предсердие: 3,9 см. Правое предсердие: 4,8 см. Аорта: кольцо аортального клапана 2,3 см, восходящий отдел аорты 3,5 см, створки не изменены. Лёгочная артерия: фиброзное кольцо 2,8 см. Расчётное систолическое давление 36 мм рт. ст. При ЦДК регургитация на МК и ТК небольшим объёмом. Заключение: дилатация правых отделов сердца. Относительная недостаточность МК и ТК 1 ст. Незначительное расширение восходящего отдела аорты и ствола лёгочной артерии (дисплазия соединительной ткани).

На основании жалоб, анамнеза болезни и результатов лабораторных и дополнительных методов исследования у пациента М. был впервые выявлен синдром Мунье-Куна. С момента появления первых симптомов и до постановки диагноза прошло около 30 лет.

В условиях стационарного лечения пациенту назначена симптоматическая терапия секретомоторными и муколитическими средствами, антибиотиками, бронходилататорами, глюкокортикостероидами системного действия.

Проводимое лечение не позволило существенно улучшить состояние пациента; после относительной стабилизации он был выписан под амбулаторное наблюдение пульмонолога с рекомендациями по базисной муколитической терапии и вакцинопрофилактике респираторных инфекций.

Обсуждение

Синдром Мунье-Куна — редкая патология, этиология которой остается предметом обсуждения. По одной из гипотез заболевание является врожденным, наследуется аутосомно-рецессивно, поскольку описаны случаи синдрома среди братьев и сестер. Но, в настоящее время не были обнаружены гены, ответственные за его развитие. Согласно другой гипотезе, трахеобронхомегалия является исключительно приобретенным заболеванием, поскольку, чаще встречается у взрослых и носит спорадический характер. Развитию приобретенной трахеобронхомегалии способствует неонатальная баротравма или длительное воздействие различных раздражителей на слизистую оболочку трахеобронхиального дерева [4]. Существуют предположения, что системные аутоиммунные заболевания нередко приводят к развитию вторичной трахеомегалии.

В зависимости от возможных этиологических причин, приводящих к развитию патологии, предложено деление на подгруппы: 1А тип — дети, у которых трахеомегалилия развилась после перенесенной фетоскопической окклюзии трахеи; 1В тип — дети, после длительной интубации; 2А тип — взрослые на фоне рецидивирующих легочных инфекций; 2В тип — взрослые на фоне легочного фиброза; 3 тип — взрослые на фоне внелегочного эластолиза; 4 тип — взрослые без явных предрасполагающих факторов [5]. Предложенная классификация лишь систематизирует описанные в литературе случаи и не имеет практической значимости. Следует подчеркнуть, что наибольшее количество клинических наблюдений пациентов отнесено к четвертому типу.

Отсутствие четкого понимания этиологии и неспецифические жалобы, предъявляемые пациентами, в связи с рецидивирующими инфекциями дыхательных путей вызывают определенные сложности в диагностике синдрома Мунье-Куна [6]. Поскольку у большинства пациентов манифест заболевания сопровождается сухим или влажным с гнойной мокротой кашлем и различной степенью выраженности одышкой и лишь изредка кровохарканьем и приходится на молодой возраст 20–40 лет, то эти пациенты либо не обращаются за медицинской помощью, прибегая к самостоятельному лечению, либо обращаются к врачам-терапевтам первичного звена. Объем проводимого при этом инструментального, лабораторного и дополнительных методов исследования является не достаточным для установления истинных причин трахеобронхомегалии [7]. Среди симптомов в литературе также упоминается прогрессирующая осиплость голоса, вызванная параличом голосовых связок, возможно вследствие изменений в черпаловидных и перстневидном хрящах гортани или гастроэзофагеальная рефлюксная болезнь.

При осмотре пациентов с трахеобронхомегалией часто выявляется утолщение кистевых фаланг, а при аускультации жесткое дыхание и свистящие хрипы. Может быть выявлен полипоз слизистой носа и пазух, двусторонний птоз, эпикантус, микрогнатия и избыток кожи верхней губы. Учитывая характер жалоб и рецидивирующее течение, синдром может быть интерпретирован как хроническая обструктивная болезнь легких, что и имело место у пациента М.

Лучевые методы являются наиболее информативными при диагностике синдрома Мунье-Куна. Однако при рентгенографии органов грудной клетки начальные очаговые изменения в легочной ткани могут быть интерпретированы как туберкулез, в связи с чем, пациенты направляются в профильные ЛПУ с целью диагностики и последующего лечения, даже при отсутствии выявления возбудителя. У пациента М. для исключения возможного поражения туберкулезом легких была выполнена открытая биопсия, результаты которой, оцененные двумя патоморфологами, были расценены как идиопатический фиброзирующий альвеолит. Синдром Мунье-Куна может быть выявлен по данным рентгенографии органов грудной клетки в прямой проекции, в тех случаях, когда размер трахеи превышает ширину тел грудных позвонков.

Золотым стандартом диагностики трахеобронхомегалии является компьютерная томография [8]. Для этого на полученных томограммах на 2 см выше дуги аорты необходимо определить поперечный и сагитальный размер трахеи, а также измерить ширину просвета левого и правого главных бронхов. Поперечный размер трахеи у мужчин должен быть более 25 мм, а сагиттальный — более 27 мм, при этом возможно сочетанное или изолированное увеличение диаметра правого и левого главного бронха более 18 и 21 мм соответственно. Для женщин определяемые размеры структур должны быть более 21, 23, 17,4 и 19,8 мм соответственно. Возможно определение трахеобронхомегалии по увеличению площади поперечного сечения трахеи, которая превышает 371 мм^2 у мужчин и 299 мм^2 у женщин. Исследуя структуру трахеобронхиального дерева по данным КТ выделяют 3 типа изменений, характерные для синдрома Мунье-Куна. При I типе наблюдается небольшое симметричное расширение трахеи и/или главных бронхов; при II типе расширение трахеи и дивертикулы выражены и прослеживаются отчетливо; при III типе дивертикулярные и мешковидные структуры распространяются на дистальные бронхи [9]. У наблюдаемого пациента имел место III тип изменений дыхательных путей.

Результаты оценки ФВД у пациента М. показали наличие стеноза внегрудных отделов дыхательных путей. По данным клинических наблюдений, приведенных в литературе у пациентов с трахеобронхомегалией, показатели функций внешнего дыхания могут оставаться в пределах нормы; возможны признаки обструкции дыхательных путей с повышением остаточной емкости легких. Коллапс трахеи может быть обнаружен при динамической КТ [10]. В данном клиническом наблюдении, экспираторный коллапс трахеи и характерные морфологические изменения дыхательных путей были выявлены при фибробронхоскопии. Следует отметить, что экспиратоный коллапс вследствие трахеобронхомаляции может быть достоверно распознан, при сокращении просвета трахеи и главных бронхов на выдохе, более, чем на половину их диаметра, что было выявлено у пациента М., но в меньшей степени.

Учитывая значительные необратимые изменения со стороны дыхательных путей и легочной ткани, пациенту М. было назначено симптоматическое лечение.

По данным литературы при синдроме Мунье-Куна назначают муколитические препараты, в сочетании с методами физиотерапии. Для снижения частоты рецидивирующих инфекций дыхательных путей применяют вакцинацию от пневмококковой инфекции и гриппа. Обнадеживающие результаты демонстрируют способы неинвазивной непрерывной вентиляции легких с положительным давлением (8–10 мм рт. ст) в дыхательных путях, что позволяет предупреждать их коллапс и снижает частоту рецидивирующих респираторных инфекций. Получен первый положительный опыт стентирования дыхательных путей или трахеобронхопластики. Для уплотнения стенок дыхательных путей возможно выполнение эндоскопической лазерной коагуляции задней стенки трахеи на уровне подслизистой оболочки. Также, были предприняты попытки двусторонней трансплантации легких у пациентов с трахеобронхомегалией, которые на текущий момент закончились летальным исходом пациентов [11, 12].

Заключение

Таким образом, синдром Мунье-Куна остается не только крайне редко встречающимся, но и малоизученным заболеванием. Частые рецидивирующие инфекции дыхательных путей в анамнезе пациента могут свидетельствовать о наличии данного синдрома. КТ с измерением диаметра трахеи и главных бронхов остается золотым стандартом диагностики. Фибробронхоскопия позволяет оценить выраженность структурных изменений дыхательных путей и выявить признаки их коллапса. Учитывая, что вторичная трахеомегалия имеет место при синдромах Элерса-Данлоса, Марфана и Cutis laxa, следует проводить тщательную дифференциальную диагностику для исключения этих причин трахеобронхомегалии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Satia I., Dua B., Singh N., Killian K., O'Byrne P.M. Tracheobronchomegaly, cough and recurrent chest infection: Mounier-Kuhn syndrome. ERJ Open Res. 2020 Jun 29;6(2):00138-2020. doi: 10.1183/23120541.00138-2020.
2. Li S., Dong L., Zhi L. Tracheobronchomegaly: A rare but easily misdiagnosed disease. Asian J Surg. 2023 Nov;46(11):5314–5315. doi: 10.1016/j.asjsur.2023.07.073.
3. O'Bryan C.J., Espinosa R., Chittivelu S., Wrenn V. Recurrent Lower Respiratory Tract Infections Due to Mounier-Kuhn Syndrome. Cureus. 2021 Jun 4;13(6):e15437. doi: 10.7759/cureus.15437.
4. Krustins E., Kravale Z., Buls A. Mounier-Kuhn syndrome or congenital tracheobronchomegaly: a literature review. Respir Med. 2013 Dec;107(12):1822–8. doi: 10.1016/j.rmed.2013.08.042.
5. Payandeh J., McGillivray B., McCauley G., Wilcox P., Swiston J.R., Lehman A. A Clinical Classification Scheme for Tracheobronchomegaly (Mounier-Kuhn Syndrome). Lung. 2015 Oct;193(5):815–22. doi: 10.1007/s00408-015-9757-z. PMID: 26189148.
6. Srivali N., De Giacomi F. Mounier-Kuhn Syndrome: A Rare Cause of Recurrent Chest Infection. Arch Bronconeumol. 2021 Oct;57(10):655. doi: 10.1016/j.arbr.2020.12.011.
7. Волкова Л.И. и др. Болезни органов дыхания: учебное пособие [по дисциплине «Внутренние болезни» для студентов, обучающихся по специальностям «Лечебное дело», «Педиатрия»]. — 2023.
8. Афтаева Е.В., Казакова С.С., Крылова Е.А., Плетнева И.А. Компьютерная томография в диагностике синдрома Мунье-Куна // Наука молодых — Eruditio Juvenium. — 2021. — Т. 9. — № 2. — С. 267–271.
9. Rjimati M., Serraj M., Elbiaze M., Benjelloun M.C., Amara B. Mounier-Kuhn syndrome (Tracheobronchomegaly): Radiological diagnosis. Radiol Case Rep. 2021 Jul 7;16(9):2546–2550. doi: 10.1016/j.radcr.2021.06.021.
10. Zaghba N., Laklaai Z., Chaanoun K., Benjelloun H., Yassine N. Mounier-Kuhn syndrome: a typical case including CT and bronchoscopic imaging. Oxf Med Case Reports. 2023 Nov 28;2023(11):omad123. doi: 10.1093/omcr/omad123.
11. Bismuth J., Habert P., Boyer A., Palot A. Évaluation par tomodensitométrie thoracique d'un traitement de la trachéobronchomalacie par pression positive continue dans le cadre d'un syndrome de Mounier–Kuhn [Evaluation with chest CT scan of CPAP as a treatment for tracheobronchomalacia in the frame of a Mounier-Kuhn syndrome]. Rev Mal Respir. 2020 Nov;37(9):748–751. French. doi: 10.1016/j.rmr.2020.06.014.
12. Dutau H., Maldonado F., Breen D.P., Colchen A. Endoscopic successful management of tracheobronchomalacia with laser: apropos of a Mounier-Kuhn syndrome. Eur J Cardiothorac Surg. 2011 Jun;39(6):e186–8. doi: 10.1016/j.ejcts.2011.01.074.

© Введенская Ирина Петровна (wasily10@mail.ru); Дзюбайло Анна Владимировна (a.v.dzyubajlo@samsmu.ru);
Казеннов Дмитрий Александрович (reaviz.doctor@mail.ru); Введенский Василий Юрьевич (wasily10@mail.ru);
Шарапова Елена Вячеславовна (elen.sharapovaa@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.11

КЛИНИЧЕСКИЙ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ «СКОЛЬЗЯЩЕГО» ЛОСКУТА ПО В.А. ВИССАРИОНОВУ

CLINICAL EXPERIENCE OF USING THE «SLIDING» FLAP ACCORDING TO V.A. VISSARIONOV

A. Gromov
M. Lunev
D. Petrash
K. Yazikova

Summary. The article presents a clinical case of surgical correction of secondary deformation of the nose and upper lip in a 14-year-old patient after previously performed cheilorhinoplasty for unilateral cleft upper lip. The article describes the use of the Vissarionov sliding flap technique, the technical aspects of the surgery, the dynamics of the postoperative period, and the achieved functional and aesthetic results. The article demonstrates the effectiveness of using this technique in adolescents with scar-related deformities of the nasal wing.

Keywords: «sliding» flap, aesthetic rehabilitation, congenital deformity, nasal defect, maxillofacial surgery.

Громов Александр Леонидович
доктор медицинских наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Курский государственный медицинский университет
gromov.alexandr2011@yandex.ru
Лунев Михаил Анатольевич
кандидат медицинских наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Курский государственный медицинский университет
misha-dok@yandex.ru
Петраш Денис Александрович
кандидат медицинских наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Курский государственный медицинский университет
PetrashDA@kursksmu.net
Язикова Кристина Сергеевна
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Курский государственный медицинский университет
yazikovaks@kursksmu.net

Аннотация. В статье представлен клинический случай хирургической коррекции вторичной деформации носа и верхней губы у пациентки 14 лет после ранее выполненной хейлоринопластики по поводу односторонней расщелины верхней губы. Описана тактика применения скользящего лоскута по В.А. Виссарионову, технические особенности операции, динамика послеоперационного периода и достигнутые функционально-эстетические результаты. Показана целесообразность использования данной методики в подростковом возрасте при рубцово-обусловленных деформациях крыла носа.

Ключевые слова: «скользящий» лоскут, эстетическая реабилитация, врожденная деформация, дефект носа, челюстно-лицевая хирургия.

Актуальность

Методика «скользящего лоскута», разработанная В.А. Виссарионовым совместно с И.А. Козиным (1981), занимает значимое место в реконструктивной хирургии деформаций носа и верхней губы после коррекции односторонней врождённой расщелины. Её внедрение стало ответом на потребность в более физиологичном и стабильном устранении асимметрии кожно-хрящевого отдела носа, которая нередко сохраняется, либо формируется вторично после первичной хейлопластики. Ключевой особенностью метода является использование комбинированного лоскута, включающего слизисто-хрящевой фрагмент большого крыльного хряща (медиальную ножку, арку, часть латеральной ножки) и полоску рубцово-изменённой кожи верхней губы. За счёт мобилизации тканей лоскут смещается («скользит») по внутренней поверхности крыла носа, одновременно решая две задачи: коррекцию уплощения и асимметрии крыла носа и восполнение дефекта выстилки преддверия полости носа. Такой двойной эффект повышает функционально-эстетическую результативность

вмешательства и снижает потребность в дополнительных корригирующих операциях [1-5].

Цель исследования — продемонстрировать эффективность скользящего лоскута по В.А. Виссарионову при коррекции вторичной деформации носа, описать ключевые этапы операции и оценить ближайшие результаты вмешательства.

Клиническое наблюдение

Пациентка К., 14 лет, обратилась с жалобами на выраженную асимметрию носа и деформацию крыла носа слева, обусловленную последствиями ранее перенесённой хейлоринопластики по поводу односторонней левосторонней расщелины верхней губы. При осмотре выявлено: уплощение крыла носа на стороне расщелины, смещение купола, расширение ноздри, рубцовое укорочение верхней губы и наличие плотного рубцового тяжа, переходящего с губы на основание крыла носа и деформирующего его контур (рисунок 1).



Рис. 1. Дооперационный вид

Носовое дыхание было сохранено, функциональные нарушения со стороны дыхательной системы отсутствовали. Хрящевой каркас носа был анатомически сохранён, однако его форма искажалась за счёт рубцовой тракции. Степень деформации соответствовала умеренной по общепринятым клиническим критериям оценки вторичных деформаций после хейлопластики. Возраст 14 лет рассматривался как оптимальный для выполнения точечной реконструктивной операции: основные зоны роста лицевого скелета ещё оставались активными, но уже допускали локальные хирургические манипуляции на мягких тканях и хрящах без высокого риска нарушения дальнейшего развития. При этом основной акцент делался на щадящем отношении к зонам роста хрящей и перегородки носа.

Для устранения деформации рассматривались следующие варианты: свободная кожная пластика, ротационный лоскут, Z-пластика и скользящий лоскут по В.А. Виссарионову. Свободная кожная пластика была отвергнута из-за риска несоответствия объема и плотности трансплантата, а также формирования дополнительного рубца в донорской зоне. Ротационный лоскут мог привести к избыточной деформации отдалённых участков лица, что нежелательно в эстетически значимой зоне. Z-пластика позволяла частично перераспределить рубцовые тяжи, но не решала проблему дефицита мягких тканей.

Скользящий лоскут по В.А. Виссарионову был выбран как наиболее оптимальный метод: он позволял использовать собственные ткани пациентки, расположенные в непосредственной близости от дефекта, и переместить их без натяжения, сохраняя адекватное кровоснабжение. Методика особенно эффективна при рубцовых деформациях, когда требуется не просто закрыть дефект, а перераспределить ткани и устранить тяжи, искажающие форму крыла носа.

Операция выполнялась под эндотрахеальным наркозом. Первым этапом проводилась разметка: линия разреза формировалась так, чтобы будущий рубец располагался вдоль естественных складок и границ анатомических зон, минимизируя его заметность. Скользящий лоскут выкраивался из рубцово-изменённых тканей верхней губы и прилегающих участков, с основанием, обращённым к преддверию носа — это обеспечивало сохранение питающей сосудистой ножки.

Ключевым моментом операции являлась бережная мобилизация лоскута: ткани отделялись от подлежащих структур с сохранением сосудистых пучков, питающих лоскут. Особое внимание уделялось работе в области перехода рубца на крыло носа: здесь выполнялось рассечение рубцовых тяжей, удерживающих крыло в деформированном положении. После достаточной мобилизации лоскут смещался в сторону крыла носа, восполняя дефицит тканей и придавая ему более анатомичную форму.

Фиксация лоскута осуществлялась тонкими нерассасывающимися швами, без избыточного натяжения. Края раны адаптировались послойно, чтобы избежать образования карманов и скопления экссудата. В носовые ходы устанавливались силиконовые формирователи для поддержания формы ноздри в раннем послеоперацион-

ном периоде (рисунок 2). На завершающем этапе накладывалась асептическая повязка.

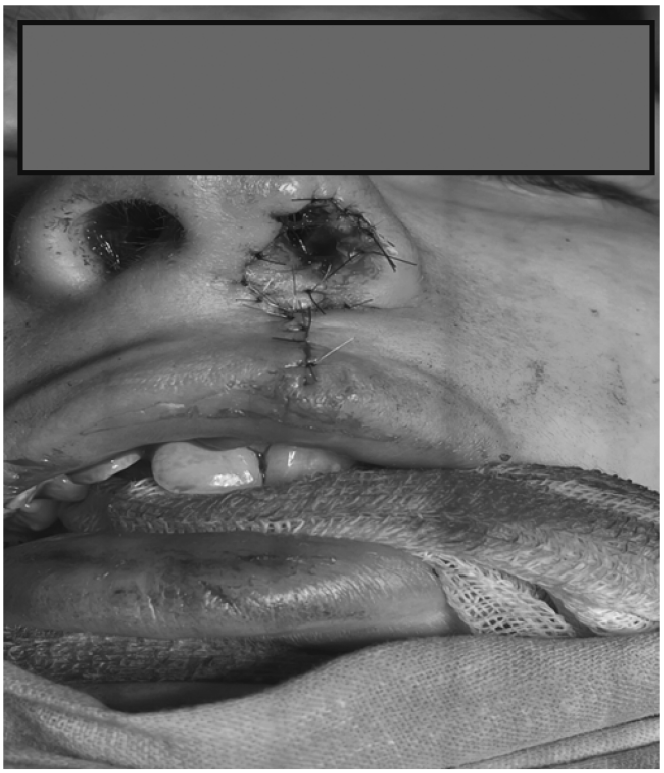


Рис. 2. Ранний послеоперационный период

Результаты и наблюдение

В первые сутки отмечалась умеренная отёчность и гиперемия в зоне операции, что соответствовало нормальной реакции тканей на хирургическую травму. Проводилась антибактериальная терапия, регулярная обработка швов и контроль состояния лоскута на предмет признаков ишемии. Тампоны из носовых ходов удалены на 3-и сутки, силиконовые формирователи оставлены до 10–14 дней для стабилизации формы крыла носа.

Швы сняты на 7-е сутки. Лоскут прижился полностью, признаков некроза или выраженной ишемии не наблюдалось. Через месяц после операции отёк значительно регрессировал, рубец стал менее выраженным, цвет и текстура пересаженных тканей практически не отличались от окружающих. Форма крыла носа улучшилась: уменьшилось уплощение, восстановилась симметрия купола, ноздря приобрела более анатомичную овальную форму (рисунок 3).

Через 6 месяцев при контрольном осмотре сохранялся стабильный результат: рубец оставался тонким и малозаметным, подвижность тканей не была нарушена, рецидива деформации не выявлено. Пациентка отметила



Рис. 3. Снятие швов, 7-е сутки после операции

значительное улучшение внешнего вида и повышение самооценки. Носовое дыхание оставалось свободным, функциональных нарушений не отмечалось.

Обсуждение

Представленный клинический случай подтверждает эффективность скользящего лоскута по В.А. Виссарионову в коррекции вторичных деформаций носа у пациентов подросткового возраста. Методика позволяет решать сразу несколько задач: устранять рубцовые тяжи, восполнять дефицит мягких тканей и моделировать форму крыла носа без масштабного вмешательства.

Заключение

Применение скользящего лоскута по В.А. Виссарионову в данном клиническом случае позволило добиться выраженного эстетического улучшения при минимальной инвазивности и хорошем функциональном результате. Возраст 14 лет является оптимальным для такого вмешательства: ткани достаточно зрелые для стабильного результата, но ещё сохраняют высокую регенераторную способность. Методика заслуживает внимания челюстно-лицевых хирургов как эффективный инструмент для коррекции вторичных деформаций после расщелины верхней губы, особенно в подростковом возрасте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виссарионов В.А., Козин И.А. Новый способ радикальной ринопластики // Материалы 7 съезда стоматологов. — М., 1981. — С. 304.
2. Виссарионов В.А. «Скользящий» лоскут в реконструктивной хирургии деформаций после хейлопластики по поводу односторонней врождённой расщелины верхней губы: автореф. дис. … канд. мед. наук. — М., 1982. — 25 с.
3. Виссарионов В.А. Использование «скользящего» лоскута при устранении деформаций концевого отдела носа, сопутствующих односторонним врождённым расщелинам верхней губы // Стоматология. — 1986. — Т. 65, № 4. — С. 55–58.
4. Виссарионов В.А. Реконструктивная хейлоринопластика в системе мероприятий по медицинской реабилитации больных с врождёнными расщелинами верхней губы: автореф. дис. … д-ра мед. наук. — М., 1989. — 40 с.
5. Виссарионов В.А., Карякина И.А. Комплексная реабилитация больных с деформациями носа после односторонней хейлопластики // Российская ринология. — 2005. — № 3. — С. 29–34.

© Громов Александр Леонидович (gromov.alexandr2011@yandex.ru); Лунев Михаил Анатольевич (misha-dok@yandex.ru);
Петраш Денис Александрович (PetrashDA@kursksmu.net); Язикова Кристина Сергеевна (yazikovaks@kursksmu.net)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.12

АЛГОРИТМ КЛИНИКО-ЛУЧЕВОЙ ОЦЕНКИ ПАЦИЕНТОВ С ПОДОЗРЕНИЕМ НА ОНКОЛОГИЧЕСКОЕ ЗАБОЛЕВАНИЕ НА ЭТАПЕ ПЕРВИЧНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ

THE ALGORITHM OF CLINICAL AND RADIOLOGICAL ASSESSMENT OF PATIENTS WITH SUSPECTED CANCER AT THE STAGE OF PRIMARY ROUTING

E. Zhikharev

Summary. The aim of the article is to develop an algorithm for clinical and radiological assessment of patients with suspected cancer at the stage of primary routing. The research materials included scientific publications on early diagnosis of malignant neoplasms, routing of oncology-profile patients, radiography, computed tomography, morphological verification, and the structure of the diagnostic pathway. The study resulted in criteria for distributing patients by level of oncological risk, a model of clinical and radiological assessment, the structure of a clinical and radiological report, and a summary of typical errors in primary assessment. The proposed algorithm reflects the practical position of a radiologist who works with radiography and computed tomography and participates in diagnostic clarification and patient management. The author's development consists in a methodology for a clinical and radiological report focused both on describing the identified changes and on choosing the nearest step in the primary routing of a patient with suspected cancer.

Keywords: clinical and radiological assessment, cancer suspicion, primary routing, radiologist, radiography, computed tomography, morphological verification, diagnostic risk.

Жихарев Егор Александрович
Врач-рентгенолог, Красногорская клиническая больница
zhiharev.egor@gmail.com

Аннотация. Цель статьи — разработать алгоритм клинико-лучевой оценки пациентов с подозрением на онкологическое заболевание на этапе первичной маршрутизации. Материалы исследования составили научные публикации по ранней диагностике злокачественных новообразований, маршрутизации пациентов онкологического профиля, рентгенографии, компьютерной томографии, морфологической верификации и структуре диагностического маршрута. Результатом исследования стали критерии распределения пациентов по уровню онкологического риска, модель клинико-лучевой оценки, структура клинико-лучевого заключения и обобщение типичных ошибок первичной оценки. Предлагаемый алгоритм отражает практическую позицию врача-рентгенолога, который работает с рентгенографией и компьютерной томографией и участвует в уточнении диагноза и ведении пациента. Авторская разработка состоит в методике клинико-лучевого заключения, ориентированного как на описание выявленных изменений, так и на выбор ближайшего шага первичной маршрутизации пациента с подозрением на онкологическое заболевание.

Ключевые слова: клинико-лучевая оценка, онкологическое заболевание, первичная маршрутизация, врач-рентгенолог, рентгенография, компьютерная томография, морфологическая верификация, диагностический риск.

Введение

Уровень мировой онкологической заболеваемости остаётся высоким. Согласно последним сопоставимым оценкам Международного агентства по изучению рака в 2022 г. было выявлено 19,9 млн новых случаев рака, от злокачественных новообразований умерли 9,7 млн человек, пятилетняя распространённость составила 53,5 млн случаев [15]. В Российской Федерации за 2024 г. было впервые выявлено 698,6 тыс. злокачественных новообразований, под диспансерным наблюдением находились 4,3 млн пациентов [3]. При столь высокой распространённости злокачественных новообразований возрастает значение первого обращения пациента, поскольку на данном этапе врачу нужно соотнести клинические признаки с данными рентгенографии или компьютерной томографии и обосновать ближайшее дообследование. В отечественных работах клинико-лучевая оценка и маршрутизация пациента онкологического профиля раскрываются с разных сторон. Лучевой симптом имеет значение в связи с клинической картиной, техникой исследования и вероятным заболеванием [5]. На уровне организации помощи показаны задержки между подозрением, консультацией онколога, обследованием, лечением и дальнейшим движением пациента после подтверждения злокачественного новообразования [2], [4]. Группы наследственного риска и качество общения с онкологическим больным расширяют клиническое понимание первичной маршрутизации, поскольку врачу нужно учитывать признаки заболевания, уровень риска, данные визуализации и ясное объяснение ближайшего медицинского действия [1], [6].

Практический опыт автора как врача-рентгенолога, работающего с рентгенографией и компьютерной томографией, позволяет рассматривать клинико-лучевую оценку как основание ближайшего медицинского действия, а именно: срочной консультации онколога, уточняющего лучевого исследования, направления к профильному специалисту, биопсии или повторной клинической оценки. Научная проблема исследования состоит в противоречии между высокой потребностью врача первичного звена и врача-рентгенолога в методике клинико-лучевого обоснования дальнейшего дообследования и недостаточной проработкой данной методики для пациентов с подозрением на онкологическое заболевание на этапе первичной маршрутизации. Цель статьи — разработать алгоритм клинико-лучевой оценки пациентов с подозрением на онкологическое заболевание на этапе первичной маршрутизации.

Материалы и методы

Материалы исследования составили научные публикации по ранней диагностике злокачественных новообразований, маршрутизации пациентов онкологического профиля, рентгенографии, компьютерной томографии, морфологической верификации и сведения о профессиональном опыте автора как врача-рентгенолога.

На первом этапе исследования выполнен анализ работ, раскрывающих клинические основания подозрения на онкологическое заболевание и роль диагностической визуализации в дальнейшем дообследовании пациента. Затем материалы были систематизированы по клиническим признакам, данным рентгенографии и компьютерной томографии, факторам онкологического риска и вариантам маршрута дообследования. Затем с учётом личного опыта автора в интерпретации диагностических изображений и участии в уточнении диагноза предложена структура клинико-лучевого заключения для выбора ближайшего медицинского действия. Результатом методической работы, основанной на личном профессиональном опыте, является авторский алгоритм клинико-лучевой оценки пациента с подозрением на онкологическое заболевание на этапе первичной маршрутизации.

Результаты и их обсуждение

Теоретические основания клинико-лучевой оценки пациентов с подозрением на онкологическое заболевание связаны с ранним распознаванием клинической ситуации на стадии до морфологического подтверждения. На этапе первичной маршрутизации врач соотносит жалобы, анамнез, данные осмотра, возраст, факторы риска и предшествующие заболевания с результатами рентгенографии или компьютерной томографии. Международные рекомендации по диагностической визуализации при подозрении на рак отражают зависимость выбора метода от клинического сценария — в случае подозрения на опухоль поджелудочной железы первым инструментальным шагом выступает компьютерная томография, при подозрении на поражение печени используются компьютерная томография, при подозрении на поражение печени применяются компьютерная томография или магнитно-резонансная томография с учётом задач оценки очага, сосудистого рисунка и распространённости процесса, при подозрении на лимфому значимой является компьютерная томография шеи, грудной клетки, живота и таза [11]. Следует подчеркнуть, что лучевой признак является клинически значимым после сопоставления с жалобами, данными осмотра, анамнезом, техникой исследования и предполагаемым диагнозом [5], [12].

В практическом отношении алгоритм клинико-лучевой оценки необходим для обоснования ближайшего медицинского действия после сопоставления клинических и лучевых данных. У пациентов с неспецифическими признаками подозрения на рак диагностический маршрут с ведущей ролью компьютерной томографии грудной клетки, живота и таза помогает выявлять опухоли лёгкого, поджелудочной железы, ободочной кишки, молочной железы и лимфомы, вместе с клинически значимыми неонкологическими состояниями и случайными изменениями [14]. В частности, систематический обзор данных о пациентах с неспецифическими симптомами указывает на частое сочетание снижения массы тела, утомляемости, боли, снижения аппетита, коморбидности и позднего выбора маршрута обследования [13]. В то же время первым доступным исследованием у пациента со стойкими респираторными жалобами остаётся рентгенография органов грудной клетки, однако нормальное изображение не снимает вопрос о дальнейшем обследовании [7–8]. Поэтому заключение врача-рентгенолога должно быть связано с ближайшим медицинским действием — уточняющей компьютерной томографией, направлением к онкологу, выбором участка биопсии или повторной клинической оценкой [10], [14].

На этапе первичной маршрутизации в качестве оснований ближайшего медицинского действия врач использует клинические признаки и данные диагностической визуализации. Стойкий кашель, одышка, кровохарканье, боль в грудной клетке, необъяснимое снижение массы тела, утомляемость, снижение аппетита, новая боль и отклонения лабораторных показателей оцениваются вместе с возрастом, анамнезом, наследственным риском и результатом осмотра [1], [7], [13], [14]. Рентгенография органов грудной клетки помогает врачу быстро уточнить основания дальнейшего обследования; после нормальной рентгенограммы врач продолжает обследование, если жалобы остаются стойкими и выявлены факторы риска [8], [12]. По данным компьютерной томографии

врач оценивает очаг поражения, объём образования, лимфаденопатию, распространённость процесса и возможность биопсии с минимальным риском [10], [11].

В таблице 1 показаны критерии распределения пациентов (табл. 1).

С учётом этих критериев алгоритм клинико-лучевой оценки пациента начинается с первичного осмотра, оценки жалоб, анамнеза, возраста, наследственного риска, стойкости симптомов и данных ранее выполненных обследований.

На данном этапе врач выделяет клинические основания подозрения на злокачественное новообразование: снижение массы тела, длительный кашель, кровохарканье, боль в грудной клетке, боль в животе, снижение аппетита, необъяснимую утомляемость, лимфаденопатию, изменения крови, повторные обращения с теми же жалобами [1], [7], [13], [14].

Затем врач сопоставляет клинические данные с результатами рентгенографии или компьютерной томографии. Стойкие респираторные жалобы и факторы риска после нормальной рентгенограммы органов грудной клетки служат основанием для компьютерной томографии или повторной клинической оценки [8], [12]. Компьютерная томография применяется для уточнения локализации, распространённости заболевания, состояния лимфатических узлов и выбора участка биопсии [10–11]. После сопоставления клинических и лучевых данных врач-рентгенолог формулирует заключение с указанием выявленных изменений, степени подозрения на злокачественное новообразование и ближайшего медицинского действия.

Практическая значимость данного этапа связана с тем, что заключение должно помогать врачу первичного звена выбрать дальнейший маршрут пациента — консультацию врача-онколога, направление в центр амбулаторной онкологической помощи, консультацию профильного специалиста, уточняющее лучевое исследование, морфологическую верификацию или повторную клиническую оценку при сохраняющихся жалобах [3–4], [11], [14]. Последовательность клинико-лучевой оценки пациента от первичного осмотра до выбора маршрута дообследования представлена ниже (рис. 1).

В разработанной модели заключение врача-рентгенолога выступает формой обоснования маршрута дообследования (табл. 2).

В его структуре важны клинический вопрос, область исследования, метод визуализации, описание выявленных изменений, оценка их соответствия жалобам и анамнезу, степень подозрения на злокачественное новообразование. Рентгенография органов грудной клетки помогает определить необходимость компьютерной томографии у пациента со стойкими респираторными жалобами, а компьютерная томография уточняет локализацию, размеры образования, состояние лимфатиче-

Таблица 1.

Критерии распределения пациентов с подозрением на онкологическое заболевание

Группа пациента	Клинические основания	Данные диагностической визуализации	Дополнительные основания риска
Неспецифическое подозрение на онкологическое заболевание	Снижение массы тела, утомляемость, снижение аппетита, новая боль	КТ органов грудной клетки, органов брюшной полости и малого таза	Отклонения анализов, повышение CA125, обоснованное подозрение врача
Подозрение на опухолевое поражение органов грудной клетки	Стойкий кашель, одышка, кровохарканье, боль в грудной клетке	Рентгенография органов грудной клетки, КТ органов грудной клетки	Возраст старше 50 лет, курение, повторные обращения
Подозрение на злокачественное новообразование органов брюшной полости	Боль в животе, снижение аппетита, снижение массы тела, признаки кровотечения	КТ, МРТ, КТ-колонография по клиническому сценарию	Лабораторные отклонения, подозрительное образование печени или ободочной кишки
Подозрение на лимфому или системное опухолевое заболевание	Лимфаденопатия, слабость, снижение массы тела, лихорадка	КТ шеи, грудной клетки, живота и таза	Изменения крови, увеличение лимфатических узлов
Наследственный онкологический риск	Ранний возраст заболевания, первично-множественные опухоли, семейный анамнез	Визуализация по предполагаемой локализации процесса	Патогенные мутации у пациента или родственников
Подозрение на распространённое злокачественное новообразование	Стойкие жалобы, ухудшение состояния, признаки поражения органа или системы	Объёмное образование, лимфаденопатия, признаки метастатического поражения	Необходимость морфологического подтверждения и оценки распространения заболевания

Источник: составлено автором на основе [1], [7-8], [10-14].

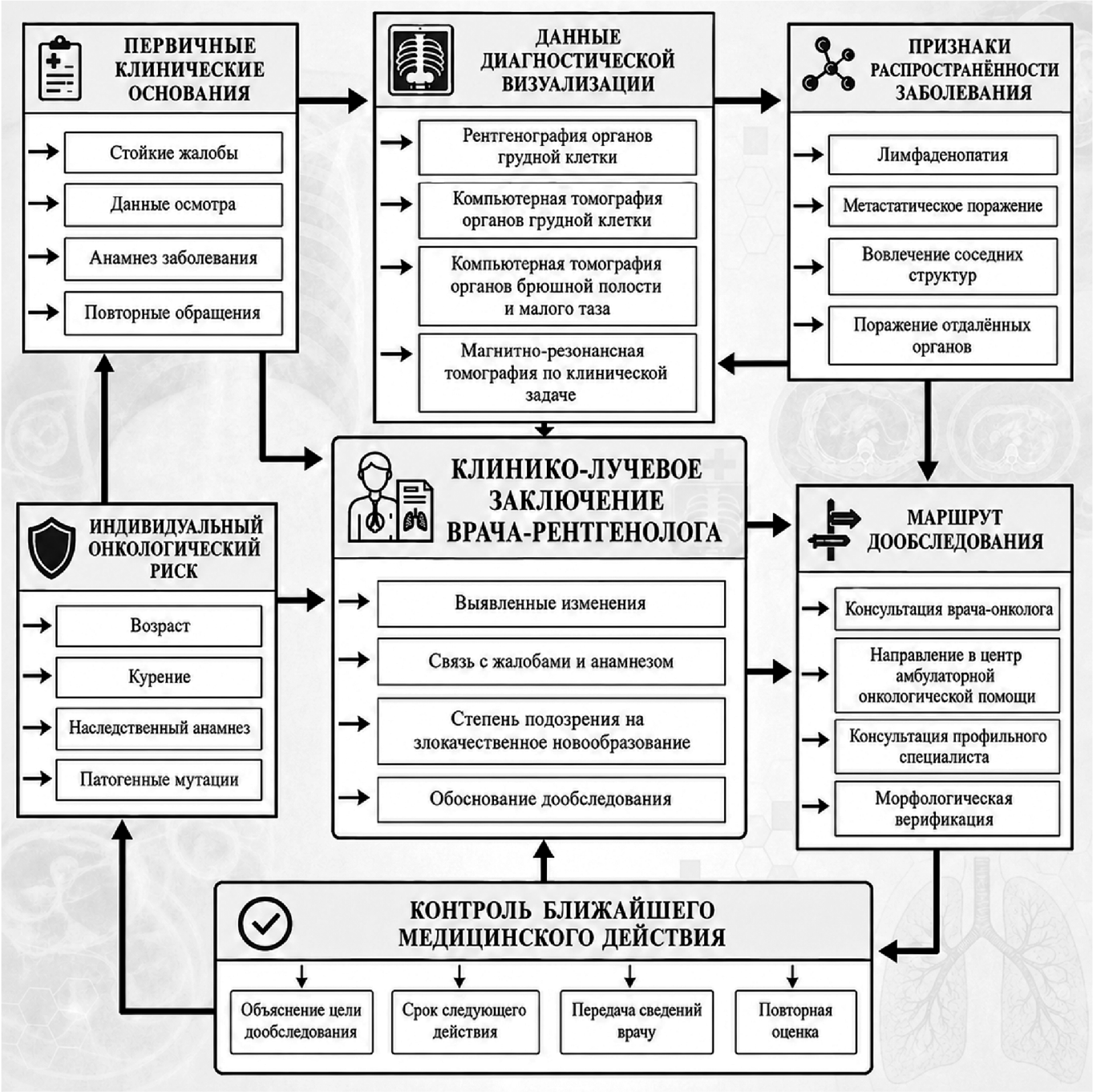


Рис. 1. Модель клинико-лучевой оценки пациента с подозрением на онкологическое заболевание на этапе первичной маршрутизации

Источник: составлено автором.

ских узлов и признаки распространённости заболевания [8], [10–12].

Заключение врача-рентгенолога в данной методике связано с ближайшим медицинским действием, так как оно помогает врачу первичного звена направить пациента на дообследование [9].

Маршрут дообследования в клинико-лучевом заключении должен быть выражен в форме однозначно интерпретируемого медицинского решения. В случае высокой степени подозрения на злокачественное новообразование обоснованы консультация врача-онколога, направление в центр амбулаторной онкологической помощи, морфологическая верификация или консультация профильного специалиста.

В случае неясных изменений и сохраняющихся жалоб обоснованы уточняющая компьютерная томография,

Таблица 2.
Структура клинико-лучевого заключения при подозрении на онкологическое заболевание

Элемент	Содержание элемента	Значение
Клинический вопрос	Повод к исследованию, предполагаемая локализация	Выбор области исследования и метода визуализации
Метод исследования	Рентгенография, компьютерная томография, магнитно-резонансная томография	Оценка достаточности лучевых данных для дальнейшего решения
Выявленные изменения	Очаговое поражение, объёмное образование, лимфаденопатия, множественные изменения	Определение степени подозрения на злокачественное новообразование
Соответствие клиническим данным	Жалобы, анамнез, данные осмотра, факторы риска	Обоснование срочности дальнейшего обследования
Распространённость заболевания	Лимфатические узлы, соседние структуры, метастатическое поражение, множественные очаги	Направление к врачу-онкологу или профильному специалисту
Участок морфологической верификации	Доступная зона биопсии, безопасность доступа, достаточность материала	Подготовка к морфологической диагностике и биомаркерному тестированию
Ближайшее медицинское действие	Уточняющее лучевое исследование, консультация врача-онколога, направление в центр амбулаторной онкологической помощи, биопсия	Оформление маршрута дообследования пациента

Источник: составлено автором на основе [8], [10-12], [14].

магнитно-резонансная томография по клинической задаче или повторная клиническая оценка [11], [14].

Значение структуры клинико-лучевого заключения состоит в том, что врач-рентгенолог описывает выявленные изменения и вместе с тем определяет ближайший шаг дообследования пациента в пределах своей профессиональной компетенции. Однако при этом очень важно не совершать типичные ошибки (табл. 3).

Практическое значение разработанного алгоритма состоит в том, что клинико-лучевая оценка пациента с подозрением на онкологическое заболевание приобретает форму понятной профессиональной методики, пригодной для работы врача-рентгенолога и врача первичного звена. Авторский деловой вклад связан с уточнением роли врача-рентгенолога в первичной маршрутизации — по результатам рентгенографии и компьютерной томографии он описывает выявленные изменения, оценивает степень подозрения на злокачественное новообразование и обосновывает ближайшее медицинское действие.

Применение клинико-лучевого заключения в первичной маршрутизации связано с риском неполной оценки жалоб, недооценки факторов онкологического риска, избыточного доверия к нормальной рентгенограмме и нечёткого указания дальнейшего дообследования.

В данном виде заключение становится инструментом раннего распознавания онкологического риска, сокращения неопределённости между первым обращением, визуализацией, консультацией врача-онколога, направлением в центр амбулаторной онкологической помощи и морфологической верификацией [2], [4], [11]. Новизна предложенного алгоритма заключается в том, что лучевое заключение рассматривается как часть маршрута дообследования пациента, включая указание на необходимость уточняющего исследования, консультации профильного специалиста, выбора участка биопсии или повторной клинической оценки. В профилактическом направлении онкологической помощи алгоритм полезен за счёт более раннего выделения пациентов с наследственным риском, стойкими неспецифическими жалобами, подозрительными изменениями по данным визуализации и высоким риском позднего обращения [1], [13–14]. Для медицины как отрасли значение предложенного алгоритма состоит в повышении согласованности действий между первичным звеном, лучевой диагностикой и онкологической службой, что помогает уменьшить задержки обследования, повысить ясность медицинского решения для пациента и усилить персональную ответственность специалиста за обоснование следующего этапа помощи [3], [10].

Заключение

В статье разработан алгоритм клинико-лучевой оценки пациентов с подозрением на онкологическое заболевание на этапе первичной маршрутизации. Основные результаты статьи представлены в трёх ключевых аспектах. Во-первых, выделены клинические группы пациентов с подозрением на онкологическое заболевание и показано, какие сочетания жалоб, факторов риска и результатов визуализации служат основанием для дальнейшего дообследования. Во-вторых, предложена модель, в которой клинико-лучевое заключение врача-рентгенолога занимает центральное место между первичной оценкой пациента и выбором ближайшего медицинского действия. В-третьих, раскрыта структура заключения и обозначены типичные ошибки первичной клинико-лучевой оценки, что позволяет снизить диагностический риск на этапе направления пациента к врачу-онкологу, профильному специалисту или на морфологическую верификацию.

Таблица 3.

Типичные ошибки первичной клинико-лучевой оценки и действия врача для снижения диагностического риска

Ошибка	Диагностический риск	Действие врача для снижения риска	Обоснованный маршрут дообследования
Оценка рентгенограммы органов грудной клетки вне связи с жалобами	Позднее выявление рака лёгкого	Сопоставление с жалобами и факторами риска	КТ органов грудной клетки или повторная оценка
Недооценка стойких неспецифических жалоб	Длительное обследование вне онкологического маршрута	Указание значимых сочетаний симптомов	КТ органов грудной клетки, органов брюшной полости и малого таза; профильная консультация
Общее описание выявленных изменений	Неясное основание дальнейшего медицинского решения	Уточнение локализации, размеров и лимфатических узлов	Уточняющее исследование, консультация онколога или морфологическая верификация
Недооценка индивидуального онкологического риска	Занижение значимости умеренных лучевых изменений	Учёт возраста, курения и наследственного анамнеза	Консультация онколога, врача-генетика или индивидуальный план обследования
Неясное указание места биопсии	Повторное вмешательство и недостаточный материал для диагноза	Определение доступного места биопсии	Биопсия, морфологическая диагностика, биомаркерное тестирование
Отсутствие ближайшего медицинского действия в заключении	Задержка между визуализацией, консультацией и подтверждением диагноза	Указание ближайшего шага	ЦАОП, консультация онколога или повторная оценка

Источник: составлено автором на основе [1–2], [4], [7–8], [10–14].

Авторский деловой вклад в развитие методического обеспечения первичной маршрутизации пациентов онкологического профиля состоит в разработке методики, основанной на практической позиции врача-рентгенолога, работающего с рентгенографией и компьютерной томографией и участвующего в уточнении диагноза и ведении пациента. Новизна предложенного алгоритма заключается в том, что клинико-лучевое заключение рассматривается как инструмент выбора ближайшего шага первичной маршрутизации пациента онкологического профиля. В профилактическом направлении онкологической помощи данный алгоритм имеет значение благодаря более раннему выделению пациентов с наследственным риском, стойкими неспецифическими жалобами, подозрительными изменениями по данным визуализации и вероятностью позднего обращения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бяхова М.М. и др. Медико-организационные подходы к обследованию пациентов с наследственными онкологическими синдромами и их родственников // Здравоохранение Российской Федерации. — 2023. — Т. 67. — № 6. — С. 487–493.
2. Минаева А.К. и др. Схема маршрутизации пациентов со злокачественными новообразованиями в частной медицинской организации // Вестник современной клинической медицины. — 2024. — Т. 17. — № 6. — С. 43–48.
3. Состояние онкологической помощи населению России в 2024 году. — Москва: МНИОИ им. П.А. Герцена — филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2025. — 275 с.
4. Хайлова Ж.В. и др. Совершенствование модели маршрутизации пациентов с онкологическими заболеваниями на разных этапах оказания медицинской помощи // Профилактическая медицина. — 2024. — Т. 27. — № 12. — С. 7–15.
5. Ходош Э.М., Ефремова О.А., Хорошун Д.А. Симптом «матового стекла»: клинико-лучевая параллель // Актуальные проблемы медицины. — 2014. — Т. 27. — № 18 (189). — С. 11–23.
6. Шляпников С.Е. Оценка комплаентности онкологических больных на этапах логовосстановительной терапии // Вопросы онкологии. — 2023. — Т. 69. — № 3S. — С. 536–537.
7. Balata H. et al. Early diagnosis and lung cancer screening // Clinical Oncology. — 2022. — Vol. 34. — No. 11. — P. 708–715.
8. Bhartia B.S.K. et al. A prospective cohort evaluation of the sensitivity and specificity of the chest X-ray for the detection of lung cancer in symptomatic adults // European Journal of Radiology. — 2021. — Vol. 144. — P. 1–8.
9. Damhus C.S., Brodersen J.B., Nielsen G.L. Diagnostic flow for all patients referred with non-specific symptoms of cancer to a diagnostic centre in Denmark: A descriptive study // European Journal of General Practice. — 2024. — Vol. 30. — No. 1. — P. 1–11.
10. Fox A.H. et al. Acquiring tissue for advanced lung cancer diagnosis and comprehensive biomarker testing: A National Lung Cancer Roundtable best-practice guide // CA: a cancer journal for clinicians. — 2023. — Vol. 73. — No. 4. — P. 358–375.

11. Hamel C. et al. Canadian Association of Radiologists Cancer Diagnostic Imaging Referral Guideline // Canadian Association of Radiologists Journal. — 2025. — Vol. 76. — No. 3. — P. 427–434.
12. Hamel C. et al. Canadian Association of Radiologists thoracic imaging referral guideline // Canadian Association of Radiologists Journal. — 2024. — Vol. 75. — No. 2. — P. 296–303.
13. Jensen E. et al. The pathway and characteristics of patients with non-specific symptoms of cancer: a systematic review // BMC Cancer. — 2022. — Vol. 22. — No. 1. — P. 1–25.
14. Smith C.F. et al. Patient characteristics, serious disease diagnoses, and incidental findings in individuals with non-specific symptoms referred to the Suspected CANcer (SCAN) Pathway: a prospective cohort study in England // The Lancet Primary Care. — 2025. — Vol. 1. — No. 3. — P. 1–12.
15. Global cancer observatory // International Agency for Research on Cancer. World Health Organization. — URL: https://gco.iarc.who.int/media/globocan/factsheets/populations/900-world-fact-sheet.pdf (дата обращения: 02.06.2026).

© Жихарев Егор Александрович (zhiharev.egor@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.15

ВЛИЯНИЕ ДЕФИЦИТА МЕЛАТОНИНА НА НЕЙРОЭНДОКРИННУЮ РЕГУЛЯЦИЮ И ИСХОДЫ ВРТ У ЖЕНЩИН СТАРШЕГО РЕПРОДУКТИВНОГО ВОЗРАСТА С ИДИОПАТИЧЕСКИМ БЕСПЛОДИЕМ

THE IMPACT OF MELATONIN DEFICIENCY ON NEUROENDOCRINE REGULATION AND ART OUTCOMES IN WOMEN OF ADVANCED REPRODUCTIVE AGE WITH IDIOPATHIC INFERTILITY

A. Ichmelyan
A. Bogdasarov
L. Davidyan
R. Bogdasarova
D. Oleynikova

Summary. Despite advances in assisted reproductive technologies, the effectiveness of IVF in women of advanced reproductive age with idiopathic infertility and a history of failed attempts remains low. Growing evidence points to the role of melatonin in regulating circadian rhythms, neuroendocrine function, and reproduction. However, systematic studies evaluating the impact of melatonin deficiency specifically on ART outcomes in this cohort are lacking. The present study addresses this gap, substantiating the clinical significance of measuring melatonin as a prognostic marker.

To evaluate the impact of melatonin (MT) deficiency on neuroendocrine regulation and outcomes of assisted reproductive technology (ART) programs in women of advanced reproductive age with idiopathic infertility and a history of unsuccessful IVF attempts.

This prospective comparative study included 239 women aged 35–45 years. The main group consisted of 115 patients with MT deficiency (nocturnal MT <40 pg/mL), and the comparison group included 124 women with normal MT (≥40 pg/mL). Methods: HPLC-MS for salivary MT, ELISA for MT in follicular fluid, chemiluminescent immunoassay for hormones, and real-time PCR for the MTNR1B gene. Statistics: Mann–Whitney U test, χ^2 test, Spearman's correlation.

Median nocturnal MT in the main group was 14 [11–17] pg/mL versus 47 [43–51] pg/mL in the control group ($p<0.0001$). The C>T mutation of the MTNR1B gene was identified in 25.2 % of patients in the main group. Negative correlations were found between nocturnal MT and waist circumference ($r_s=–0.161$; $p=0.027$), insulin resistance syndrome ($r_s=–0.254$; $p=0.005$), liver pathology ($r_s=–0.246$; $p=0.007$), and inflammatory diseases of the cervix ($r_s=–0.246$; $p=0.007$). Hypercortisolemia in the main group: morning cortisol 8.6 [7.9–9.1] vs. 4.5 [3.8–5.2] nmol/L ($p<0.0001$). No correlation was found between nocturnal MT and cortisol at 22–24 h ($r_s=0.069$; $p=0.464$). The cortisol/DHEA-S ratio in the main group was 5.0 [5.0–5.0] vs. 3.6 [3.15–4.01] in the control group ($p<0.0001$). Free T4 levels in the main group were 15.4

Ичмелян Альберт Мисакович
Кандидат медицинских наук, доцент,
ГОУ ВПО Ульяновский государственный университет
ichmelyan@rambler.ru
Богдасаров Азат Юрьевич
Доктор медицинских наук, профессор,
ГОУ ВПО Ульяновский государственный университет
azat-01@mail.ru
Давидян Лиана Юрьевна
Доктор медицинских наук, профессор,
ГОУ ВПО Ульяновский государственный университет
Богдасарова Регина Азатовна
Аспирант,
ГОУ ВПО Ульяновский государственный университет
bogdasarovar@bk.ru
Олейникова Диана Валерьевна
Кандидат медицинских наук, старший преподаватель,
ГОУ ВПО Ульяновский государственный университет
cgkb79@mail.ru

Аннотация. *Актуальность*. Несмотря на развитие вспомогательных репродуктивных технологий, эффективность ЭКО у женщин старшего репродуктивного возраста с идиопатическим бесплодием и неудачными попытками в анамнезе остаётся низкой. Всё больше данных свидетельствует о роли мелатонина в регуляции циркадных ритмов, нейроэндокринной функции и репродукции, однако системных исследований, оценивающих влияние именно дефицита мелатонина на исходы ВРТ в этой когорте, недостаточно. Настоящее исследование восполняет этот пробел, обосновывая клиническую значимость определения мелатонина как прогностического маркёра.

Цель исследования — оценить влияние дефицита мелатонина (МТ) на нейроэндокринную регуляцию и исходы программ вспомогательных репродуктивных технологий (ВРТ) у женщин старшего репродуктивного возраста с идиопатическим бесплодием и неудачными попытками ЭКО в анамнезе.

Проспективное сравнительное исследование включило 239 женщин 35–45 лет. Основная группа — 115 пациенток с дефицитом МТ (ночной МТ <40 пг/мл), группа сравнения — 124 женщины с нормальным МТ (≥40 пг/мл). *Методы*: ВЭЖХ-МС для МТ в слюне, ELISA для МТ в фолликулярной жидкости, хемилюминесцентный иммуноанализ для гормонов, ПЦР-РВ для гена MTNR1B. Статистика: U-критерий Манна-Уитни, χ^2, корреляция Спирмена.

Медиана ночного МТ в основной группе составила 14 [11–17] пг/мл против 47 [43–51] пг/мл в контроле ($p<0,0001$). Мутация C> T гена MTNR1B выявлена у 25,2 % пациенток основной группы. Установлены отрицательные корреляции между ночным МТ и окружностью живота ($r_s=–0,161$; $p=0,027$), синдромом инсулинорезистентности ($r_s=–0,254$; $p=0,005$), патологией печени ($r_s=–0,246$; $p=0,007$), воспалительными заболеваниями шейки матки ($r_s=–0,246$; $p=0,007$). Гиперкортизолемия в основной группе: утренний кор-

[12.7–19.6] pmol/L vs. 19.6 [12.85–21.7] pmol/L (p=0.016). Estradiol was higher in the main group: 62.8 [57.5–67.3] vs. 58.9 [55.4–61.4] pg/mL (p=0.0002).
MT deficiency is associated with desynchronosis of the hypothalamic-pituitary-adrenal axis, hypercortisolemia, and metabolic disturbances, which justifies the determination of MT as a diagnostic tool in idiopathic infertility.

Keywords: melatonin, idiopathic infertility, IVF, circadian rhythms, desynchronosis, cortisol, advanced reproductive age, MTNR1B.

тизол 8,6 [7,9–9,1] против 4,5 [3,8–5,2] нмоль/л (p <0,0001). Корреляция между МТ ночь и кортизолом 22–24 ч отсутствовала (r_s=0,069; p=0,464). Соотношение кортизол/ДГЭА-С в основной группе составило 5,0 [5,0–5,0] против 3,6 [3,15–4,01] в контроле (p <0,0001). Уровень Т4св. в основной группе составил 15,4 [12,7–19,6] пмоль/л против 19,6 [12,85–21,7] пмоль/л (p=0,016). Эстрадиол в основной группе был выше: 62,8 [57,5–67,3] против 58,9 [55,4–61,4] пг/мл (p=0,0002).
Таким образом дефицит МТ ассоциирован с десинхронозом оси гипоталамус-гипофиз-надпочечники, гиперкортизолемией и метаболическими нарушениями, что обосновывает определение МТ как диагностического инструмента при идиопатическом бесплодии.

Ключевые слова: мелатонин, идиопатическое бесплодие, ЭКО, циркадные ритмы, десинхроноз, кортизол, старший репродуктивный возраст, MTNR1B.

Бесплодие остаётся одной из актуальных проблем современной репродуктивной медицины, затрагивая, по данным Всемирной организации здравоохранения, до 15 % супружеских пар репродуктивного возраста [1, 2]. Особую категорию пациенток представляют женщины с идиопатическим бесплодием, у которых стандартное обследование, включающее оценку овуляции, проходимости маточных труб и состояния эндометрия, не выявляет видимых причин нарушения репродуктивной функции. В структуре женского бесплодия доля необъяснимых форм достигает 10–30 %, причём с увеличением возраста пациенток частота данной патологии возрастает до 35–40 % у женщин старше 38 лет [3, 4].

В последние годы всё большее внимание исследователей привлекает роль мелатонина (МТ) — ключевого регулятора циркадных ритмов — в функционировании репродуктивной системы [5, 6]. Мелатонин, индоламин, преимущественно синтезируемый эпифизом из триптофана, участвует не только в синхронизации биологических ритмов с циклом свет-темнота, но и обладает выраженными антиоксидантными, противовоспалительными и иммуномодулирующими свойствами, модулирует активность гипоталамо-гипофизарно-гонадной оси и влияет на стероидогенез в яичниках [7, 8]. В фолликулярной жидкости концентрация мелатонина в 3–5 раз выше, чем в сыворотке крови, что указывает на его локальную паракринную роль в ооцитогенезе [9].

Исследования последних лет свидетельствуют о том, что дефицит мелатонина, может быть, одной из ключевых причин нарушения ооцитогенеза и снижения качества эмбрионов из-за повышенного оксидативного стресса в фолликулярном микроокружении [10, 11]. Установлена связь между низким уровнем мелатонина и нарушениями психологической адаптации у женщин с бесплодием, что усугубляет течение заболевания и снижает эффективность лечения [12]. Кроме того, мелатонин участвует в регуляции секреции гонадотропин-рилизинг-гормона (ГнРГ), лютеинизирующего гормона (ЛГ) и фолликулостимулирующего гормона (ФСГ), а также модулирует чувствительность яичников к гонадотропинам [13].

Особую значимость изучение уровня мелатонина приобретает у пациенток старшего репродуктивного возраста (35–45 лет) с неудачными попытками ЭКО в анамнезе. У данной категории женщин стандартные протоколы стимуляции овуляции не всегда эффективны, а частота наступления беременности после переноса эмбрионов не превышает 25–30 % [14]. Выявление дефицита мелатонина как потенциально корригируемого фактора, не диагностируемого стандартным обследованием, открывает возможность персонализированной подготовки к следующему протоколу ЭКО, включения мелатонина в прегравидарную подготовку и улучшения исходов лечения [15].

Цель исследования — оценить влияние дефицита мелатонина на функционирование репродуктивной системы и исходы программ ВРТ у женщин старшего репродуктивного возраста с идиопатическим бесплодием и неудачными попытками ЭКО в анамнезе.

Проводилось проспективное сравнительное открытое исследование в параллельных группах. Базы: ООО «Первое слово» (Краснодар) и ООО МК «Мой доктор» (Ульяновск). Период: январь 2019 — декабрь 2024 гг.

Критерии включения: возраст 35–45 лет; идиопатическое бесплодие; АМГ ≥1,0 нг/мл; антральные фолликулы ≥5; ≥1 неудачная попытка ЭКО/ИКСИ; информированное согласие.

Критерии исключения: трубно-перитонеальное бесплодие; эндометриоз III–IV ст.; онкозаболевания; приём МТ или кортикостероидов за 3 месяца; сахарный диабет 1 типа; аутоиммунные заболевания в стадии обострения; хронические соматические/эндокринные заболевания, требующие системной терапии.

Формирование групп: основная группа — 115 женщин с дефицитом МТ (ночной МТ в слюне <40 пг/мл); группа сравнения — 124 женщины с нормальным МТ (ночной МТ ≥40 пг/мл).

Определяли:

- МТ в слюне: ВЭЖХ-МС, забор в 6 точках (07:00, 11:00, 15:00, 19:00, 23:00, 03:00).
- МТ в фолликулярной жидкости: ELISA.
- Гормоны крови: твёрдофазный хемилюминесцентный иммуноанализ (ФСГ, ЛГ, пролактин, ТТГ, Т3св., Т4св., АТ-ТПО, Е2, П, АМГ, кортизол, ДГЭА, ДГЭА-С).
- Кортизол в слюне: забор в 4 точках (7–9ч, 11–13ч, 15–17ч, 22–24ч).
- Генотипирование MTNR1B (rs1387153, C> T): ПЦР в реальном времени, буккальный эпителий.

Статистика: Shapiro-Wilk (ненормальное распределение, p <0,05); Me [Q1; Q3]; U-критерий Манна-Уитни; χ^2 Пирсона; r_s Спирмена; p<0,05. Пакет: IBM SPSS Statistics 26.0.

Проведенные исследования показали, что у пациенток основной группы выявлено статистически высоко значимое снижение уровня мелатонина во всех временных точках по сравнению с группой сравнения. Наиболее выраженные различия зафиксированы для ночного уровня мелатонина, где значение U-критерия Манна-Уитни составило 0,5 (минимально возможное), Z=–13,35, а также для содержания мелатонина в фолликулярной жидкости (U=378,5, Z=–12,64). Уровень значимости для всех сравнений составил p <0,0001.

Медианные значения утреннего мелатонина (07:00) в основной группе составили 5 [4–6] пг/мл, тогда как в группе сравнения — 12 [11–15] пг/мл, что на 140 % выше. Дневной уровень мелатонина (11:00–15:00) в основной группе составил 2 [2–3] пг/мл против 3 [2–4] пг/мл в группе сравнения (p=0,0009). Вечерний уровень (19:00) в основной группе — 6 [4–6] пг/мл, в группе сравнения — 15 [11–18] пг/мл (на 150 % выше, p <0,0001). Ночной уровень (03:00) в основной группе составил 14 [11–17] пг/мл, в группе сравнения — 47 [43–51] пг/мл (на 235 % выше, p <0,0001).

Интегральный среднесуточный показатель мелатонина в слюне (МТс/с) в основной группе составил 6,75 [5,5–7,75] пг/мл против 19,5 [18,25–21,5] пг/мл в группе сравнения (на 189 % выше, p <0,0001). Содержание мелатонина в фолликулярной жидкости в основной группе составило 2,665 [2,241–3,089] пг/мл, что практически вдвое ниже, чем в группе сравнения — 4,555 [3,812–5,263] пг/мл (на 71 % выше, p <0,0001).

Таким образом, у женщин с идиопатическим бесплодием и неудачными попытками ЭКО дефицит мелатонина носит системный характер, отражается как в суточном профиле слюны, так и в фолликулярном микроокружении, что может непосредственно влиять на качество ооцитов.

Мутация C> T гена MTNR1B (rs1387153) выявлена у 29 из 115 пациенток основной группы, что составило 25,2 %. В группе сравнения частота носительства данной мутации была существенно ниже — 12 из 124 женщин (9,7 %). Различия статистически значимы (χ^2=9,14, p=0,0025).

У носителей мутации в основной группе синдром инсулинорезистентности (E88.81) диагностирован у 17,7 % (9 из 51 пациентки с ожирением или избыточной массой тела), тогда как в группе сравнения — только у 5,6 % (4 из 71) (χ^2=8,3, p=0,004). Кроме того, у носителей мутации C> T уровень ночного мелатонина был ещё ниже, чем у пациенток основной группы без мутации: медиана составила 11,5 [9–14] пг/мл против 15 [12–18] пг/мл (U=412,5, p=0,008).

При анализе корреляционных связей выявлена различная направленность связей между группами, что указывает на разные патогенетические механизмы регуляции мелатонина.

В основной группе (дефицит МТ) выявлена статистически значимая слабая отрицательная связь между окружностью живота и ночным уровнем мелатонина (r_s=–0,161, p=0,027): чем больше окружность живота, тем ниже ночной мелатонин. Корреляция между весом и ночным мелатонином составила r_s=–0,128 (p=0,175) — отрицательная тенденция, не достигшая значимости. Связь между индексом массы тела и ночным мелатонином также имела отрицательную направленность (r_s= =–0,148, p=0,082).

В группе сравнения (нормальный МТ) наблюдалась противоположная картина: выявлены слабые положительные связи между весом и ночным мелатонином (r_s=+0,168, p=0,031), а также между весом и вечерним мелатонином (r_s=+0,156, p=0,043). Связь окружности живота с ночным мелатонином имела положительную тенденцию (r_s=+0,141, p=0,059).

В основной группе выявлен ряд статистически значимых отрицательных корреляций между уровнем мелатонина и сопутствующей патологией. Наиболее сильная связь установлена между ночным мелатонином и болезнями кожи (хронический дерматит, акне, псориаз): r_s= =–0,269, p=0,003. Синдром инсулинорезистентности также продемонстрировал отрицательную корреляцию с ночным мелатонином (r_s=–0,254, p=0,005). Патология печени (жировой гепатоз, гепатит в анамнезе) коррелировала с ночным мелатонином с коэффициентом r_s=

=–0,246, p=0,007. Варикозная болезнь вен нижних конечностей показала корреляцию r_s=–0,217, p=0,018.

Среди гинекологической патологии наиболее значимая отрицательная корреляция выявлена между воспалительными заболеваниями шейки матки (хронический цервицит) и ночным мелатонином (r_s=–0,246, p=0,007), а также между воспалительными заболеваниями придатков (хронический сальпингоофорит) и утренним мелатонином (r_s=–0,198, p=0,031).

Во всех случаях наблюдалась именно отрицательная корреляция: низкий уровень мелатонина ассоциировался с наличием заболевания. В группе сравнения значимых корреляционных связей между уровнем мелатонина и перечисленными патологиями обнаружено не было (p>0,05 для всех сравнений).

При сравнительном анализе гормонального профиля репродуктивной оси статистически значимые различия между группами были обнаружены только по уровню эстрадиола. В основной группе медиана эстрадиола составила 62,8 [57,5–67,3] пг/мл, в группе сравнения — 58,9 [55,4–61,4] пг/мл (U=5120, Z=–3,76, p=0,0002). Таким образом, у пациенток с дефицитом мелатонина уровень эстрадиола был выше на 6,6 %.

По остальным показателям значимых различий не получено. Уровень ФСГ в основной группе составил 4,8 [4,4–6,1] мМЕ/мл против 5,3 [4,5–6,1] мМЕ/мл в группе сравнения (p=0,203). Уровень ЛГ в обеих группах оказался идентичным: 4,2 [3,5–5,9] мМЕ/мл (p=1,000). Пролактин в основной группе — 485 [335–510] мкМЕ/мл, в группе сравнения — 485 [330–510] мкМЕ/мл (p=0,829). Прогестерон — 20 [12–25] нмоль/л против 19 [10–25] нмоль/л (p=0,601). Антимюллеров гормон — 2,5 [1,8–3,1] нг/мл против 2,7 [2,1–3,2] нг/мл (p=0,129).

У пациенток основной группы с генетической мутацией C/T и без неё также не выявлено статистически значимых различий по гормональному профилю. Наибольшее различие наблюдалось по уровню ЛГ: 3,9 [2,85–5,8] мМЕ/мл в подгруппе C/T против 4,3 [3,8–5,9] мМЕ/мл в подгруппе C/C (p=0,147).

При оценке тиреоидной функции статистически значимое различие выявлено только по уровню свободного тироксина (Т4св.). В основной группе медиана Т4св. составила 15,4 [12,7–19,6] пмоль/л, в группе сравнения — 19,6 [12,85–21,7] пмоль/л (U=5850, Z=-2,40, p=0,016). Таким образом, у пациенток с дефицитом мелатонина уровень свободного тироксина был ниже на 21,4 %.

По остальным тиреоидным показателям значимых различий не выявлено. Уровень ТТГ в основной группе составил 2,01 [1,52–2,67] мкМЕ/мл против 2,07 [1,91–2,67] мкМЕ/мл в группе сравнения (p=0,171). Свободный Т3 — 4,08 [3,42–5,18] пмоль/л против 4,65 [3,42–5,32] пмоль/л (p=0,099, пограничное значение). Антитела к тиреопероксидазе — 33,1 [13,3–36,4] МЕ/мл в обеих группах (p=0,955).

У пациенток основной группы выявлена стойкая гиперкортизолемия в течение всех суток. Медианные значения утреннего кортизола в слюне (7–9 ч) составили 8,6 [7,9–9,1] нмоль/л в основной группе против 4,5 [3,8–5,2] нмоль/л в группе сравнения (U=1250, Z=-11,01, p <0,0001). Дневной кортизол (11–13 ч) — 8,1 [7,7–8,8] нмоль/л против 2,1 [1,6–2,8] нмоль/л (U=800, Z=–11,85, p <0,0001). Вечерний кортизол (15–17 ч) — 2,5 [2,2–3,0] нмоль/л против 1,1 [0,6–1,55] нмоль/л (U=1850, Z=–9,89, p <0,0001). Ночной кортизол (22–24 ч) — 1,6 [1,4–1,9] нмоль/л против 0,4 [0,2–0,6] нмоль/л (U=1050, Z=–11,38, p <0,0001).

Интегральный суммарный показатель кортизола за сутки в основной группе составил 5,4 [5,1–5,7] нмоль/л против 1,65 [1,25–1,93] нмоль/л в группе сравнения (U=450, Z=–12,51, p <0,0001).

Уровень ДГЭА в утренние часы (7–9 ч) был выше в группе сравнения: 8,9 [7,8–10,2] нг/мл против 7,05 [6,6–7,4] нг/мл в основной группе (U=4250, Z=–5,39, p <0,0001). В остальные временные точки (11–13 ч, 15–17 ч, 22–24 ч) уровни ДГЭА не различались и составили 0,07 [0,06–0,09] нг/мл в обеих группах (p>0,05).

Уровень ДГЭА-С в крови был выше в основной группе: 79 [66,6–92] нмоль/л против 68 [65–74,8] нмоль/л (U=5200, Z=–3,61, p=0,0003). Соотношение кортизол/ДГЭА-С в основной группе составило 5,0 [5,0–5,0] против 3,6 [3,15–4,01] в группе сравнения (U=2950, Z=–7,83, p <0,0001).

В основной группе проведён корреляционный анализ между уровнями мелатонина и кортизола в соответствующие временные интервалы. Корреляция между ночным мелатонином (03:00) и ночным кортизолом (22–24 ч) составила r_s=0,069 (p=0,464), что свидетельствует об отсутствии связи. Корреляция между вечерним мелатонином (19:00) и вечерним кортизолом (15–17 ч) — r_s=0,074 (p=0,432). Дневной мелатонин (11:00–15:00) и дневной кортизол (11–13 ч) — r_s=–0,133 (p=0,156). Утренний мелатонин (07:00) и утренний кортизол (7–9 ч) — r_s=–0,081 (p=0,389). Все рассчитанные коэффициенты корреляции были близки к нулю ($|r_s|$<0,14) и не достигали уровня статистической значимости (p>0,05). Это указывает на функциональную разобщённость между циркадной регуляцией (опосредованной МТ) и стресс-реализующей системой у женщин с дефицитом мелатонина — феномен десинхроноза.

Аналогичный анализ между МТ и ДГЭА в основной группе также не выявил значимых корреляций: МТ ночь с ДГЭА 22–24 ч — r_s=–0,001 (p=0,992); МТ вечер с ДГЭА 15–17 ч — r_s=–0,025 (p=0,791); МТ день с ДГЭА 11–13 ч — r_s=0,095 (p=0,313); МТ утро с ДГЭА 7–9 ч — r_s=0,035 (p=0,710).

При анализе синхронности секреции кортизола и ДГЭА в основной группе выявлена сильная положительная связь между интегральными показателями — общим уровнем кортизола в крови и ДГЭА-С (r_s=0,791, p <0,000001). Однако для парных временных точек корреляции отсутствовали: кортизол 7–9 ч с ДГЭА 7–9 ч — r_s=–0,12 (p=0,201); кортизол 11–13 ч с ДГЭА 11–13 ч — r_s=–0,002 (p=0,983); кортизол 15–17 ч с ДГЭА 15–17 ч — r_s=–0,038 (p=0,687); кортизол 22–24 ч с ДГЭА 22–24 ч — r_s=0,082 (p=0,383).

В группе сравнения выявлены слабые, но статистически значимые корреляции между мелатонином и кортизолом в периоды их физиологических экстремумов: утренний МТ с утренним кортизолом — r_s=-0,176 (p=0,050); ночной МТ с ночным кортизолом — r_s=0,201 (p=0,029). Корреляции между МТ и ДГЭА в группе сравнения отсутствовали (p>0,05).

Проведённое исследование продемонстрировало, что у женщин старшего репродуктивного возраста с идиопатическим бесплодием и неудачными попытками ЭКО в анамнезе дефицит мелатонина ассоциирован с комплексом нейроэндокринных нарушений, включающих дисбаланс суточной секреции кортизола, изменение соотношения кортизол/ДГЭА-С и формирование функциональной разобщённости между циркадной и стресс-реализующей системами [16, 17].

Выявленное у 25,2 % пациенток основной группы носительство мутации C> T гена MTNR1B согласуется с данными литературы о роли данного полиморфизма в нарушении метаболизма глюкозы и развитии инсулинорезистентности [18, 19]. Установленная ассоциация между низким уровнем мелатонина и синдромом инсулинорезистентности подтверждает патогенетическую связь между нарушением мелатониновой сигнализации и метаболическими расстройствами, которые сами по себе являются независимыми факторами снижения репродуктивного потенциала [20, 21].

Выявленные отрицательные корреляции между уровнем мелатонина и патологией печени, заболеваниями кожи, варикозной болезнью свидетельствуют о вовлечённости общих патогенетических механизмов, связывающих дисфункцию нейроэндокринной системы, иммунологические нарушения и метаболические расстройства [22, 23]. Низкий уровень мелатонина, обладающего противовоспалительными и антиоксидантными свойствами, может способствовать хронизации воспалительных процессов, в том числе в органах репродуктивной системы [24, 25].

Более высокий уровень эстрадиола в основной группе (62,8 против 58,9 пг/мл) может отражать особенности овариального ответа в условиях дефицита мелатонина и требует дальнейшего изучения [26]. Снижение уровня свободного тироксина в основной группе при отсутствии различий по ТТГ и АТ-ТПО согласуется с данными о влиянии мелатонина на регуляцию щитовидной железы [27].

Наиболее значимым результатом исследования является выявление у пациенток с дефицитом мелатонина стойкой гиперкортизолемии в течение всех суток при отсутствии корреляции между уровнями МТ и кортизола. Отсутствие значимых корреляций свидетельствует о функциональной разобщённости — десинхронозе — циркадной и стресс-реализующей систем. Этот феномен может играть ключевую роль в патогенезе возрастного бесплодия, поскольку хронический стресс и нарушение циркадных ритмов негативно влияют на овуляцию, качество ооцитов и рецептивность эндометрия [28, 29]. Повышенное соотношение кортизол/ДГЭА-С в основной группе указывает на смещение метаболизма в сторону катаболизма, что создаёт неблагоприятный гормональный фон для имплантации и развития беременности [30, 31].

Полученные результаты имеют важное клиническое значение. Определение уровня мелатонина у женщин с идиопатическим бесплодием и неудачными попытками ЭКО позволяет выявить потенциально корригируемый фактор — дефицит МТ и связанный с ним десинхроноз. Включение в прегравидарную подготовку препаратов мелатонина может способствовать восстановлению циркадной регуляции, снижению оксидативного стресса и улучшению исходов программ ВРТ [32].

Таким образом у женщин старшего репродуктивного возраста с идиопатическим бесплодием и дефицитом мелатонина выявлена функциональная разобщённость между циркадной и стресс-реализующей системами (десинхроноз), проявляющаяся гиперкортизолемией в течение всех суток при отсутствии корреляции между уровнями мелатонина и кортизола. Дефицит мелатонина ассоциирован с носительством мутации C> T гена MTNR1B (25,2 %), синдромом инсулинорезистентности (17,7 % против 5,6 % в контроле), снижением уровня свободного тироксина (15,4 против 19,6 пмоль/л) и повышением соотношения кортизол/ДГЭА-С (5,0 против 3,6). Полученные данные обосновывают целесообразность определения уровня мелатонина как важного диагностического и прогностического инструмента для персонализации подготовки к протоколам ВРТ у данной категории пациенток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адамян Л.В., Андреева Е.Н., Ашрафян Л.А. и др. Бесплодный брак. Современные подходы к диагностике и лечению. Под ред. Г.Т. Сухих, Т.А. Назаренко. М.: ГЭОТАР-Медиа; 2019. 416 с.
2. Vander Borght M, Wyns C. Fertility, and infertility: Definition and epidemiology. Clin Biochem. 2018; 62:2–10. doi: 10.1016/j.clinbiochem.2018.03.012
3. Корсак В.С., Смирнова А.А., Шурыгина О.В. Регистр ВРТ Российской Федерации за 2021 год. Проблемы репродукции. 2023;29(2):6–23.
4. Quaas A.M., Dokras A. Diagnosis, and treatment of unexplained infertility. Rev Obstet Gynecol. 2008;1(2):69–76.
5. Радзинский В.Е., Оразов М.Р., Токтар Л.Р. Мелатонин и репродуктивная система: от теории к практике. Акушерство и гинекология. 2020;(5):12–18.
6. Reiter R.J., Tan D.X., Korkmaz A., et al. Melatonin and reproduction: from basic research to clinical application. J. Endocrinol. 2019;241(1): R1-R18. doi: 10.1530/JOE-18–0530.
7. Леваков С.А., Боровкова Е.И., Муминова К.Т. Роль мелатонина в регуляции овариального резерва. Гинекология. 2019;21(4):34–38.
8. Tamura H., Takasaki A., Taketani T., et al. The role of melatonin as an antioxidant in the follicle. J. Ovarian Res. 2020;13(1):72. doi: 10.1186/s13048-020-00678-5.
9. Аполихина И.А., Горбунова Е.А., Касян Г.Р. Оксидативный стресс и антиоксидантная защита в репродуктологии. Акушерство и гинекология. 2021;(3):34–41.
10. Jamil M., Debbarh H., Aboulmaouahib S., et al. Melatonin and female fertility: A comprehensive review. Ther Adv Reprod Health. 2022; 16:26334941221092438. doi: 10.1177/26334941221092438
11. Назаренко Т.А., Дуринян Э.Р., Чечурова Т.Н. Эндокринное бесплодие у женщин. М.: МЕДпресс-информ; 2018. 352 с.
12. Espino J., Macedo M., Lozano G., et al. Impact of melatonin supplementation in women with unexplained infertility undergoing fertility treatment. Antioxidants. 2022;11(5):987. doi: 10.3390/antiox11050987.
13. Оразов М.Р., Радзинский В.Е., Хамошина М.Б. Мелатонин и репродуктивная система: современное состояние проблемы. Репродуктивное здоровье женщины. 2018;(6):22–28.
14. Смирнова А.А., Шурыгина О.В., Корсак В.С. Эффективность программ ЭКО в Российской Федерации: анализ регистра ВРТ за 2019–2021 гг. Проблемы репродукции. 2022;28(4):12–21.
15. Liu Y., Jia Y., Yang Y., et al. Melatonin supplementation improves oocyte quality and pregnancy outcomes in women undergoing in vitro fertilization: A systematic review and meta-analysis. Front Endocrinol. 2023; 14:1123456. doi: 10.3389/fendo.2023.1123456
16. Сеидова Г.Б., Доброхотова Ю.Э., Шестакова И.Г. Мелатонин и стресс: роль в репродуктивной системе. Акушерство и гинекология. 2022;(2):28–35.
17. Touitou Y., Reinberg A., Touitou D. Association between light at night, melatonin secretion, sleep deprivation, and the internal clock: Health impacts and mechanisms of circadian disruption. Life Sci. 2017; 173:94–106. doi: 10.1016/j.lfs.2017.02.008.
18. Bonnefond A., Clement N., Fawcett K., et al. MTNR1B genetic variability influences fasting glucose levels and type 2 diabetes risk. Diabetes. 2022;71(5):1120–1130. doi: 10.2337/db21-0892.
19. Лукьянова И.В., Рожкова Т.А., Колесникова Л.И. Полиморфизм гена рецептора мелатонина 1В и риск развития метаболических нарушений у женщин с бесплодием. Сахарный диабет. 2021;24(3):245–252.
20. Tain Y.L., Hsu C.N. Melatonin and insulin resistance: A systematic review. Int J Mol Sci. 2022;23(15):8456. doi: 10.3390/ijms23158456.
21. Боровкова Е.И., Леваков С.А., Муминова К.Т. Метаболические нарушения и репродуктивная функция у женщин: роль мелатонина. Ожирение и метаболизм. 2020;17(2):134–142.
22. Жукова Н.В., Самойлова Ю.Г., Колесникова Л.И. Циркадные ритмы и заболевания печени: роль мелатонина. Терапевтический архив. 2021;93(8):945–952.
23. Hardeland R. Melatonin and inflammation—Story of a double-edged blade. J Pineal Res. 2018;65(4): e12525. doi: 10.1111/jpi.12525
24. Шестакова И.Г., Доброхотова Ю.Э., Сеидова Г.Б. Воспалительные заболевания органов малого таза и мелатонин: патогенетические аспекты. Гинекология. 2021;23(5):412–419.
25. Zhao D., Yu Y., Shen Y., et al. Melatonin synthesis and function: Evolutionary history in animals and plants. Front Endocrinol. 2019; 10:249. doi: 10.3389/fendo.2019.00249.
26. Коган И.Ю., Лесик Е.А., Молотков А.С. Эстрадиол и мелатонин: взаимодействие на уровне яичников. Акушерство и гинекология. 2021;(8):45–52.
27. Rahman S.A., Kasturiratne A., Knipping K. The interplay between melatonin and thyroid function: A systematic review. Thyroid. 2023;33(2):156–168. doi: 10.1089/thy.2022.0456.
28. Гусейнова Г.Э., Оразов М.Р., Хамошина М.Б. Хронический стресс и репродуктивная функция у женщин: роль мелатонина. Репродуктивное здоровье женщины. 2020;(4):32–39.
29. Goldstein C.A., Rizvydeen W., Conroy D.A. Melatonin, and the circadian system in reproductive health. Sleep Med Clin. 2022;17(3):341–354. doi: 10.1016/j.jsmc.2022.06.005.
30. Kalantaridou S.N., Zoumakis E., Makrigiannakis A., et al. The role of cortisol and DHEA in female reproduction. Hormones. 2019;18(4):357–366. doi: 10.1007/s42000-019-00142-8.
31. Петрова Н.А., Колесникова Л.И., Даренская М.А. Соотношение кортизол/ДГЭА-С как маркер стресс-ассоциированных нарушений у женщин с бесплодием. Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2022;174(1):56–61.
32. Pacchierotti F., Spanò M. Melatonin as a potential therapeutic agent in assisted reproduction. Reprod Biomed Online. 2023;46(4):631–645. doi: 10.1016/j.rbmo.2022.12.008.

© Ичмелян Альберт Мисакович (ichmelyan@rambler.ru); Богдасаров Азат Юрьевич (azat-01@mail.ru);
Давидян Лиана Юрьевна; Богдасарова Регина Азатовна (bogdasarovar@bk.ru);
Олейникова Диана Валерьевна (cgkb79@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.23

РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ ОПТИМИЗИРОВАННОЙ ЛЕЧЕБНОЙ СТРАТЕГИИ ПРИ ПИОГЕННЫХ АБСЦЕССАХ ПЕЧЕНИ

RESULTS OF IMPLEMENTING AN OPTIMIZED TREATMENT STRATEGY FOR PYOGENIC LIVER ABSCESSES

V. Mustafina
D. Amarantov
A. Godovalov
A. Khlynova
N. Afanaseva

Summary. *Aim*. To develop a personalized algorithm for choosing a treatment method in patients with PAP.
Materials and methods. A retrospective analysis of the treatment of 178 PAP patients who were hospitalized in the surgical departments of City Clinical Hospital No. 1 between 2012 and 2025 was conducted. The patients were divided into two groups: a comparison group of 46 patients treated between 2012 and 2017, and a study group of 132 patients treated between 2018 and 2025. In the treatment of patients in the study group, we used an optimized algorithm developed based on the experience of treating patients in the comparison group.
Results and discussion. Results and discussion. In the study group, most patients underwent percutaneous drainage, while in the comparison group, most patients underwent laparotomy. In the comparison group, complications, repeated interventions, recurrences, and mortality were significantly higher.
Conclusion. The technique of percutaneous puncture drainage developed and optimized by us is an effective way of treating patients with liver abscess.

Keywords: liver abscess, percutaneous drainage, algorithm of treatment of liver abscesses.

Мустафина Варвара Николаевна
Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера;
Городская клиническая больница № 1, г. Пермь
var.pawlowa2013@yandex.ru
Амарантов Дмитрий Георгиевич
доктор медицинских наук, профессор,
Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера
svetlam1@yandex.ru
Годовалов Анатолий Петрович
кандидат медицинских наук, доцент,
Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера
agodovalov@gmail.com
Хлынова Анна Сергеевна
Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера
annakhlynova21@gmail.com
Афанасьева Нина Валерьевна
Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера
nina.v.afanaseva@yandex.ru

Аннотация. *Цель исследования*: разработать персонализированный алгоритм выбора метода лечения у больных ПАП.
Материалы и методы исследования. Проведён ретроспективный анализ лечения 178 пациентов с ПАП, госпитализированных в хирургические отделения Городской клинической больницы №1 в период с 2012 по 2025 г. Больные разделены на две группы: группа сравнения — 46 человек, пролеченные с 2012 по 2017 г. и исследуемая группа — 132 человека, пролеченные с 2018 по 2025 г. В лечении больных исследуемой группы мы применяли оптимизированный нами алгоритм, разработанный на основе опыта лечения больных группы сравнения.
Результаты и обсуждение. В исследуемой группе большинству пациентов проведено чрескожное дренирование, в группе сравнения большинству пациентов выполнена лапаротомия. В группе сравнения значимо выше: осложнения, повторные вмешательства, рецидивы и смертность.
Заключение. Разработанная и оптимизированная нами методика чрескожного пункционного дренирования является эффективным способом лечения пациентов с абсцессом печени.

Ключевые слова: абсцесс печени, чрескожное дренирование, алгоритм лечения абсцессов печени.

Введение

Пиогенный абсцесс печени (ПАП) — гнойное инфекционное поражение паренхимы печени. Несмотря на значительный прогресс в диагностике и лечении за последние десятилетия, ПАП остаётся жизнеугрожающим состоянием с высокой заболеваемостью и летальностью, что определяет неизменную актуальность данной проблемы.

По данным различных авторов госпитальная летальность при лечении ПАП составляет 2–15 %, 30-дневная — 5–14,6 %, а годичная достигает 22–58 % [1, 2, 3]. Прослеживается устойчивая тенденция к росту заболеваемости ПАП [2, 3].

ПАП представляет значительную диагностическую проблему вследствие не специфичности клинической картины. Лихорадка наблюдается лишь у 57–73 % пациентов, боль в животе — у 48–73 %, тошнота и рвота — у 28–46 % [2, 3, 4].

ПАП ассоциирован с широким спектром факторов риска (сахарный диабет, злокачественные новообразования) распространённость которых в популяции неуклонно растёт [5].

Микробиологический профиль ПАП претерпевает значительные изменения, все больше авторов сообщают об увеличении микроорганизмов с высокой гипервирулентностью и мультирезистентностью [3, 6].

Антибиотикотерапия является обязательным компонентом лечения ПАП любого размера. Эмпирическая терапия должна покрывать грамотрицательные энтеробактерии, стрептококки и анаэробы.

Лечение ПАП определяется размером, морфологией (одно- или многокамерные), тяжестью состояния пациента и микробиологическим профилем.

Большинство авторов считают, что мелкие ПАП необходимо лечить консервативно антибиотиками с динамическим ультразвуковым-контролем [1, 2, 3, 7]. В лечении более крупных ПАП мнения авторов разняться.

Pickens и соавт. [8] считают, что нужно дренировать абсцессы более 3 см, другие авторы [4] считают, что более 5 см. Meister и соавт. считают, что антибиотики в монотерапии имеют частоту неудач 82 %, и дренирование необходимо практически всегда [9].

Несмотря на высокую клиническую значимость проблемы, структурированные доказательные данные остаются ограниченными, а стандартизированные клинические рекомендации по лечению ПАП не разработаны. Разность взглядов на лечение ПАП определило цель нашего исследования.

Цель исследования: разработать персонализированный алгоритм выбора метода лечения у больных ПАП.

Материалы и методы исследования

Проведён ретроспективный анализ лечения 178 пациентов с ПАП, госпитализированных в хирургические отделения Городской клинической больницы №1 в период с 2012 по 2025 г. Больные разделены на две группы: группа сравнения — 46 человек, пролеченные с 2012 по 2017 г. и исследуемая группа — 132 человека, пролеченные с 2018 по 2025 г. В лечении больных исследуемой группы мы применяли оптимизированный нами алгоритм, разработанный на основе опыта лечения больных группы сравнения.

Результаты. Всего из 178 пациентов было 61 (34,3 %) женщина и 117 (65,7 %) мужчин. В исследуемой группе (n=132) женщин — 48 (36,4 %), мужчин — 84 (63,6 %); в группе сравнения (n=46) женщин — 13 (28,3 %), мужчин — 33 (71,7 %).

Средний возраст пациентов в исследуемой группе составил 59,9 ± 11,56 лет, в группе сравнения — 62,2±13,07 лет ($p > 0,05$).

При первичном осмотре ведущими жалобами в обеих группах были боль в правом подреберье и верхних отделах живота (50 % в исследуемой группе, 65,2 % в группе сравнения), лихорадка выше 37°С (81,8 % и 89,1 %) и общая слабость (46,9 % и 41,3 %) соответственно.

В исследуемой группе абсцесс локализовался в правой доле у 74,2 % (98 пациентов), в левой — у 12,9 % (17 пациентов), билобарное поражение — у 12,9 % (17 пациентов). В группе сравнения праводолевая локализация отмечена у 67,4 % (31 пациент), леводолевая — у 13,0 % (6 пациентов), обе доли — у 19,7% (9 пациентов.

По всем перечисленным гендерным, возрастным данным, клиническим проявлениям, локализации поражения межгрупповые различия не достигли статистической значимости ($p > 0,05$).

Результаты и обсуждение

Всем пациентам, которым проедены оперативные вмешательства мы проводили бактериологическое исследование отделяемого и его чувствительность к антибиотикам. При бактериологическом исследовании содержимого абсцессов у 172 пациентов положительные культуры получены в 88,4 % (152 случаев). Моноинфекция зарегистрирована у 140 (81,4 %) больных, полимикробная флора — у 12 (7,0 %), у 20 (11,6 %) пациентов роста микроорганизмов не отмечено. Достоверных различий по частоте мономикробного и полимикробного характера инфекции, а также доле стерильных посевов между группами не было. В этиологической структуре

доминировали грамотрицательные бактерии (63,4 % всех изолятов), среди которых лидировала Klebsiella pneumoniae (36,6 %) и Escherichia coli (20,9 %). Грамположительная флора была представлена преимущественно Staphylococcus aureus (13,4 %). Редкие возбудители, такие как Acinetobacter lwoffii, Corynebacterium spp., Staphylococcus epidermidis и Klebsiella terrigena, встречались в единичных наблюдениях.

Анализ антибиотикочувствительности штаммов Klebsiella pneumoniae показал сохранение высокой активности гентамицина и меропенема в обеих исследуемых группах. В то же время отмечалась значительная резистентность к амоксициллину, цефалоспоринам и фторхинолонам. В исследуемой группе наиболее высокий уровень устойчивости зарегистрирован к цефтриаксону (83 %), тогда как в группе сравнения преобладала резистентность к ципрофлоксацину (87,4 %) и амоксициллину (81,2 %).

Штаммы Escherichia coli в обеих группах характеризовались высокой чувствительностью к гентамицину и меропенему. Устойчивость наиболее часто выявлялась к цефтриаксону (25–50 %) и амоксициллину (33,3–37,5 %), тогда как резистентность к ципрофлоксацину встречалась реже (33,3–12,5 %).

Среди штаммов Staphylococcus aureus наибольшую активность сохраняли линезолид и азитромицин, к ко-



Рис. 1. Персонализированный алгоритм лечения пациентов с ПАП

торым резистентные изоляты практически не встречались. Чувствительность к цефалоспоринам оставалась высокой в обеих группах. Наиболее выраженная устойчивость наблюдалась в отношении ципрофлоксацина (25–45,8 %).

В целом результаты исследования антибиотикочувствительности свидетельствуют о сохранении высокой активности гентамицина и карбапенемов в отношении основных грамотрицательных возбудителей ПАП, а также линезолида в отношении Staphylococcus aureus. Одновременно обращает на себя внимание значительная распространённость резистентности энтеробактерий к цефалоспоринам и фторхинолонам, что необходимо учитывать при выборе схем эмпирической антибактериальной терапии.

В лечении исследуемой группы применяли оптимизированный нами алгоритм (рис. 1).

Сначала исключали перитонит — при его наличии выполняли лапаротомию. В отсутствие перитонита абсцессы диаметром ≤2 см лечили антибиотиками под УЗ-мониторингом, а при полостях >2 см определяли возможность чрескожного чреспечёночного дренирования. При безопасной УЗ-траектории и отсутствии показаний к симультанным операциям выполняли пункционное дренирование, подбирая катетер по размеру (>4 см — катетер Ившина, менее 4 см — прямой стилет-катетер). Если безопасный доступ отсутствовал или требовались симультанные вмешательства, использовали лапароскопический доступ, а при его невозможности — лапаротомию. Дренаж удаляли при стойкой нормотермии, отсутствии отделяемого и регрессе остаточной полости по данным УЗИ.

В исследуемой группе большинству пациентов проведено чрескожное дренирование (120 пациентов, 90,9 %), тогда как консервативная терапия, лапаротомия и лапароскопия применялись редко (6, 1 и 5 случаев соответственно). В группе сравнения лапаротомия проведена у 30 (65,2 %) пациентов, чрескожное дренирование 10 (21,7 %) и чрескожная пункция 6 (13,0 %).

Мы оценили продолжительность госпитализации, рецидивы, осложнения и смертность у двух групп. В исследуемой группе средняя длительность госпитализации составила 13,8±9,7 койко-дней, а в группе сравнения — 23,2±9,6 койко-дней.

В исследуемой группе частота осложнений составила 1,5 %, повторных вмешательств — 3,8 %, рецидивов — 2,3 %. В группе сравнения эти показатели были значимо выше: осложнения — 13,0 % ($p < 0,05$), повторные вмешательства — 15,2 % ($p < 0,05$), рецидивы — 13,0 % ($p < 0,05$).

Госпитальная летальность, в исследуемой группе зарегистрирована лишь у 2 (1,5 %) пациентов, тогда как в группе сравнения умерло 5 (10,9 %) пациентов.

Проведен анализ смертности в течение первого года. Одногодичная летальность в исследуемой группе составила 6,8 % (9 случаев), а в группе сравнения — 13,0 % (6 случаев).

Таким образом, в результате внедрения в лечебный процесс алгоритма оптимизированной тактики лечения больных с абсцессами печени достигнуто уменьшение сроков госпитализации, частоты осложнений, рецидивов и смертность.

Заключение

Внедрение оптимизированного алгоритма лечения ПАП позволило статистически значимо улучшить результаты лечения больных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wendt S., Bačák M., Petroff D. et al. Clinical management, pathogen spectrum and outcomes in patients with pyogenic liver abscess in a German tertiary-care hospital // Scientific Reports. — 2024. — Vol. 14. DOI: 10.1038/s41598-024-63819-w.
2. Dudina M., Olesen S.S., Søgaard K.K., Nielsen H.L. Pyogenic liver abscess in the North Denmark Region — a population-based cohort study (2010–2022) // European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases. — 2025. — [Epub ahead of print]. DOI: 10.1007/s10096-025-05307-1.
3. Agha A., Farooqi M.F., Khan M., Nabi N.G., Siddiqua A.R. Clinical characteristics and outcomes of liver abscesses: a 12-year retrospective analysis from a tertiary care center in the United Arab Emirates // Frontiers in Medicine. — 2025. — Vol. 12. DOI: 10.3389/fmed.2025.1673473.
4. Gastrointestinal surgical emergencies: textbook / American College of Surgeons. — 2020. — [Электронный ресурс].
5. Li W., Chen H., Wu S., Peng J. A comparison of pyogenic liver abscess in patients with or without diabetes: a retrospective study of 246 cases // BMC Gastroenterology. — 2018. — Vol. 18. — Article number: 96. DOI: 10.1186/s12876-018-0875-y.
6. Losie J.A., Lam J.C., Gregson D.B., Parkins M.D. Epidemiology and risk factors for pyogenic liver abscess in the Calgary Health Zone revisited: a population-based study // BMC Infectious Diseases. — 2021. — Vol. 21. — Article number: 1147. DOI: 10.1186/s12879-021-06649-9.
7. Rismiller K., Haaga J., Siegel C. et al. Pyogenic liver abscess: a review of 108 cases // American Journal of Surgery. — 2019. — Vol. 217, № 3. — P. 529–534.
8. Pickens R.C., Jensen S., Sulzer J.K. et al. Minimally invasive surgical management as effective first-line treatment of large pyogenic hepatic abscesses // The American Surgeon. — 2019. — Vol. 85, № 8. — P. 825–830.
9. Meister P., Irmer H., Paul A., Hoyer D.P. Therapy of pyogenic liver abscess with a primarily unknown cause // Langenbeck's Archives of Surgery. — 2022. — Vol. 407, № 6. — P. 2595–2602. DOI: 10.1007/s00423-022-02535-3.

© Мустафина Варвара Николаевна (var.pawlowa2013@yandex.ru); Амарантов Дмитрий Георгиевич (svetlam1@yandex.ru); Годовалов Анатолий Петрович (agodovalov@gmail.com); Хлынова Анна Сергеевна (annakhlynova21@gmail.com); Афанасьева Нина Валерьевна (nina.v.afanaseva@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.25

ИММУНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ШИЗОФРЕНИИ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ). ЧАСТЬ I

IMMUNOLOGICAL ASPECTS OF SCHIZOPHRENIA (LITERATURE REVIEW). PART I

I. Nikiforov
G. Kostyuk
L. Burygina
M. Belova
V. Istomina

Summary. This review, prepared based on an analysis of contemporary foreign and domestic literature, summarizes the key achievements in the study of the immunological mechanisms underlying the pathogenesis of schizophrenia. The evolution of views is examined — from the concept of the brain's «immune privilege» to the fundamentally critical role of neuroinflammation and dysregulation of the cytokine profile. Special attention is paid to evidence of microglial activation, changes in the concentration of pro-inflammatory and anti-inflammatory interleukins in the blood and cerebrospinal fluid of patients, as well as their correlation with cognitive deficits and positive symptoms.

The hypothesis about the influence of maternal immune activation during gestation as a factor of early risk for the development of endogenous psychosis is discussed. The prospects for using the immunomodulatory properties of antipsychotics in the treatment of schizophrenia are considered. The contradictions in the existing data and the need to find valid biomarkers for stratifying immunological subtypes of schizophrenia are discussed.

Keywords: schizophrenia, neuroinflammation, cytokines, microglia, innate immunity, adaptive immunity, biomarkers.

Никифоров Игорь Анатольевич
Доктор медицинских наук, профессор,
Академия постдипломного образования
ФГБУ Федеральный научно-клинический центр
специализированных видов медицинской помощи
и медицинских технологий Федерального
медико-биологического агентства России, г. Москва
narkolog.ipk@mail.ru
Костюк Георгий Петрович
Доктор медицинских наук, профессор, главный врач
ГБУЗ Психиатрическая клиническая
больница № 1 им. Н.А. Алексеева, г. Москва
pkb1@zdrav.mos.ru
Бурыгина Лариса Андреевна
Кандидат медицинских наук, главный врач
ГБУЗ Психиатрическая клиническая
больница № 4 им. П.Б. Ганнушкина, г. Москва
pkb4@zdrav.mos.ru
Белова Майя Юрьевна
Врач-психиатр, заведующий филиалом
Психиатрический стационар им. В.А. Гиляровского
ГБУЗ Психиатрическая клиническая
больница № 4 им. П.Б. Ганнушкина, г. Москва
pkb4-pb3@zdrav.mos.ru
Истомина Виктория Витальевна
Кандидат медицинских наук, врач-психиатр,
заведующий общепсихиатрическим отделением № 19
Психиатрического стационара им. В.А. Гиляровского —
филиал, Государственное бюджетное учреждение
здравоохранения, Психиатрическая клиническая
больница № 4 им. П.Б. Ганнушкина, г. Москва
pkb4-pb3@zdrav.mos.ru

Аннотация. В настоящем обзоре, подготовленном на основе анализа современной зарубежной и отечественной литературы, обобщены ключевые достижения в изучении иммунологических механизмов патогенеза шизофрении. Рассматривается эволюция взглядов от «иммунной привилегии» мозга к принципиально критической роли нейровоспаления и дисрегуляции цитокинового профиля. Особое внимание уделено доказательствам активации микроглии, изменению концентрации провоспалительных и противовоспалительных интерлейкинов в крови и ликворе пациентов, а также их корреляции с когнитивным дефицитом и продуктивной симптоматикой.

Обсуждается гипотеза о влиянии материнской иммунной активации во время гестации как фактора раннего риска развития эндогенного психоза. Рассматриваются перспективы использования иммуномодулирующих свойств антипсихотиков при лечении шизофрении. Обсуждаются противоречия существующих данных и необходимость поиска валидных биомаркеров для стратификации иммунологических подтипов шизофрении.

Ключевые слова: шизофрения, нейровоспаление, цитокины, микроглия, врожденный иммунитет, адаптивный иммунитет, биомаркеры.

Шизофрения представляет собой одно из наиболее сложных и социально значимых психических расстройств, этиология и патогенез которых остаются предметом интенсивных исследований. В последние десятилетия произошел существенный сдвиг в понимании этого заболевания: от классических нейротрансмиттерных теорий, к интегративным моделям, включающим иммунную дисфункцию и нейровоспаление, как ключевые патогенетические звенья [1, 2, 3].

Проблема шизофрении в современном мире

Современная психиатрия рассматривает шизофрению как прогредиентное заболевание с гетерогенной симптоматикой, включающей: продуктивные (бред, галлюцинации), негативные (апатия, ангедония, социальная отгороженность), когнитивные и аффективные расстройства. Болезнь приводит к специфическим изменениям личности и дезинтеграции психических функций [3, 4, 5].

Шизофрения является восьмой по значимости причиной инвалидизации в мире среди лиц в возрасте 15–44 лет. Пациенты с этим диагнозом теряют в среднем 15 лет потенциальной продолжительности жизни, что связано как с высоким риском суицида (от 5 до 10 %), так и с сопутствующими соматическими заболеваниями. Распространенность злоупотребления психоактивными веществами в этой популяции достигает 41 % [6, 7, 8].

Дополнительными факторами, способствующими сокращению жизни больных шизофренией, являются:

- неупорядоченный образ жизни;
- нездоровое питание;
- отсутствие физической активности;
- побочные эффекты антипсихотической терапии

Они способствуют развитию метаболического синдрома, сердечно-сосудистых и легочных заболеваний [7, 9].

Заболеваемость шизофренией составляет около 15 новых случаев на 100 тысяч населения, а болезненность колеблется в пределах 0,25–1 %.

Среди всех психических расстройств шизофрения несет наибольшее социально экономическое бремя, составляя около 54,5 %, от общего бремени психических заболеваний [7, 10, 11].

Для бюджетов здравоохранения развитых стран затраты на лечение комплекса проблем, связанных с этим заболеванием, складываются из:

- прямых медицинских расходов (госпитализация, медикаментозное лечение, амбулаторное наблюдение);
- прямых немедицинских расходов (социальное обеспечение, жилье);
- косвенных затрат (потеря производительности труда, выплаты по инвалидности) [11].

Согласно мнению некоторых исследователей, шизофрения — не единое заболевание с точки зрения патофизиологических механизмов, а группа расстройств, имеющих общие фенотипические проявления, но разные этиопатогенетические механизмы [12, 13].

Анализ иммунных гипотез шизофрении

Иммунологическое направление в психиатрии прошло длительный путь развития, тесно связанный с прогрессом фундаментальной иммунологии [3, 14].

Инфекционная гипотеза (бактериальная)

Эта гипотеза родилась в эпоху, когда основным методом поиска причин болезней было обнаружение патогенных бактерий. В 1928 г. Karl Menninger опубликовал работу, в который предположил, что острые инфекционные заболевания могут выступать триггером для развития шизофренического синдрома. Согласно наблюдением того времени, у некоторых пациентов психоз развивался после перенесенный тяжелой инфекции. Менингер также обратил внимание на случаи психоза, после пандемии испанского гриппа 1918–1919 годов, что стимулировало поиск бактериального возбудителя [15].

Несмотря на первоначальный интерес, гипотеза в последующих исследованиях не подтвердилась. Прямых доказательств роли конкретной кокковой или кишечной флоры найдено не было, а к середине XX века, интерес к ней угас [16].

Вирусная гипотеза (медленные и латентные вирусы)

На смену бактериальной теории пришла вирусная, ставшая доминирующей в конце XX века. Возродил интерес к инфекционной теории E. Fuller Torrey. Он в 1973 г. опубликовал в журнале The Lancet статью, в которой предположил, что вирус не убивает клетки мозга мгновенно, а может существовать в них в спящем (латентном) состоянии годами. Под воздействием стресса или возрастных изменений вирус активируется, нарушает метаболизм нейронов и вызывает симптомы шизофрении [17].

Эта модель объясняла характерные особенности болезни: позднее начало (юношеский возраст), отсутствие грубых структурных изменений в мозге и сезонность рождения пациентов (зима/весна).

В поздних исследованиях фокус сместился на конкретных агентов. Торри и его коллеги изучали цитомега-

ловирус, эндогенные ретро-вирусы и, особенно активно, паразита Toxoplasma gondii. Согласно их данным до 20 % случаев шизофрении могут быть связаны с этими паразитами [18, 19, 20]. Однако, несмотря на многочисленные исследования, убедительных доказательств того, что один вирус является причиной заболевания, до сих пор нет.

Аутоиммунная гипотеза

Эта гипотеза сдвинула фокус исследований с самого микроба на реакцию иммунной системы хозяина. Идея о том, что собственный иммунитет может атаковать мозг, впервые была высказана В.К. Хорошко в 1912 г. [14].

Современная молекулярная версия гипотезы предложена J.G. Knight в 1982 г. Ученый предположил, что у больных вырабатываются антитела не к микробам, а к собственным рецепторам дофамина. Эти антитела связываются с рецептором и постоянно его стимулируют, вызывая гиперактивность дофаминовой системы — состояние, которое, как известно, связано с психозом. Это объясняло, почему антипсихотики (блокирующие рецепторы) работают, хотя уровень самого дофамина в мозге не повышен [21].

Нобелевский лауреат Ф. Бёрнет в 1957 г. предложил модель «запрещенных клонов», согласно которой шизофрения рассматривается как болезнь, похожая на волчанку или ревматоидный артрит, когда в организме могут появиться «запрещенные клоны» лимфоцитов, которые из-за сбоя в регуляторной системе начинают атаковать ткани собственного тела, в данном случае головной мозг [16, 22].

В последние годы эта гипотеза рассматривается как перспективная. Обнаружено, что многие гены риска шизофрении связаны с иммунной системой (например, система комплемента) [14, 16, 23].

Кроме того, описано тяжелое аутоиммунное заболевание — антиNMDA-рецепторный энцефалит, которое ошибочно диагностируют как шизофрению, но оно успешно лечится иммунотерапией. Это доказывает сам принцип: аутоиммунная атака на рецепторы мозга может вызывать идентичный психоз.

С позиций современной нейроиммунологии связь между внутриутробным вирусным или инфекционным заражением и шизофренией реализуется посредством активации иммунной системы матери, нарушения цитокиновых сетей с последующей активацией микроглии плода и развитием нейровоспаления как важного патогенетического механизма шизофрении, на фоне определенной генетической уязвимости. Таким образом, воспалительная реакция на инфекцию является общим механизмом, лежащим в основе ассоциации внутриутробного заражения и шизофрении. Исследования, направленные на изучение аутоиммунных реакций после инфекции, свидетельствуют также о возможной активации приобретенного иммунитета и потенциальном повышении уровня аутоантител к белкам-мишеням, связанным с шизофренией, включая рецептор N-метил-D-аспартата [24].

Ряд авторов считают, что иммунологические показатели, их связь с серологическими, клиническими и морфологическими показателями, обосновывают представление о шизофрении как инфекционном процессе [25].

В соответствии с новой для второй половины XX века гипотезой патогенеза шизофрении вследствие нарушения развития нервной системы (neurodevelopmental hypothesis), особое внимание стали уделять внутриутробной инфекции, как возможной причине нарушения развития нервной системы и, соответственно, значимому фактору заболевания шизофренией в более позднем возрасте [26].

Повышенный риск манифестации шизофрении связывали с внутриутробным заражением Toxoplasma gondii, вирусом простого герпеса 2-го типа (ВПГ-2), цитомегаловирусом, вирусом гриппа, краснухи, вирусом Эпштейна-Барр, а также неспецифическими бактериальными инфекциями [26]. Показано, что повышенные уровни С-реактивного белка, фактора некроза опухоли альфа (TNF-α) и интерлейкина-8 (IL— 8) в сыворотке крови матери во время беременности также могут быть связаны с развитием шизофрении у потомства [27].

Макрофагально-Т-лимфоцитарная гипотеза (конец XX века)

Эта концепция определила важную роль моноцитов/макрофагов и продуцируемых ими цитокинов в патогенезе шизофрении. Она стала основной для современных представлений о нейровоспалении как ключевом процессе, связывающем системную дисфункцию с патологией ЦНС [7, 28, 29, 30, 31, 32, 33].

Современная теория нейровоспаления и ключевая роль в развитии шизофрении

В настоящее время хроническое слабо выраженное воспаление (нейровоспаление) рассматривается как неотъемлемый компонент патогенеза шизофрении.

Гипотеза нейровоспаления является одним из ведущих направлений исследования шизофрении [34,35,36,37].

Важно отметить, что это не классическое воспаление с отеком и болевым синдромом, а сложный клеточно-

молекулярный процесс, затрагивающий все типы клеток ЦНС [33, 38, 39].

Есть данные о том, что при шизофрении чаще, чем в общей популяции, встречаются воспалительные маркёры [7, 40, 41, 42, 43], показатели напряженности иммунитета [28, 39, 44], а также маркеры редокс-дисбаланса [45, 46].

Множество иммунологических исследований в последние два десятилетия направлены на прояснение роли хронического воспалительного процесса в развитии психических заболеваний. Предложен ряд гипотез развития шизофрении, связанными с теми или иными аспектами воспаления: микроглиальная, цитокиновая [47, 48, 49], кинуреновая [50].

Они опираются на следующие научные факты:

- провоспалительный статус иммунных клеток, повышение уровня маркеров воспаления в сыворотке крови, ликворе и мозге больных шизофренией [51, 52, 53];
- повышенные титры аутоантител [54];
- активация микроглии и атрофия мозга при нейровизуализационных и постмортальных морфологических исследованиях [55, 56, 57, 58];
- отсутствие выраженного снижения уровня IL-12 и TNF-α в сыворотке крови после завершения острого приступа шизофрении (их уровни остаются повышенными и в ремиссии) [39].
- активация врожденного иммунитета коррелирует с выраженностью симптомов по шкале PANSS-P;
- в экспериментальных исследованиях обнаружена корреляция поведенческих нарушений с выраженностью воспалительных процессов [58].

Состояние клеток головного мозга при шизофрении

Нейроны

Долгое время считавшиеся главными действующими лицами, нейроны при шизофрении подвергаются массовой гибели. Вместе с тем наблюдается снижение объема серого вещества в префронтальной коре, гиппокампе и других областях за счет уменьшения дендритной сложности, потери синапсов и нарушении нейропластичности. Эти изменения тесно связаны с дисфункцией глиальных клеток [59].

Микроглия

Микроглия является ключевым игроком врожденного иммунитета ЦНС. При шизофрении микроглия находится в состоянии хронической активации (priming).

Микроглия в норме осуществляет мониторинг микроокружения, синаптический прунинг, фагоцитоз. При развитии патологии она приобретает активированную амебиоидную форму, продуцирует провоспалительные цитокины (IL-1β, IL-1, FNO-α), активные формы кислорода и глутамат. Чрезмерный или аберрантный синаптический прунинг в подростковом и молодом возрасте может быть одной из причин потери синапсов и снижения когнитивных функций при шизофрении. Особую роль может играть: субпопуляция «темной микроглии» (dark microglia), ассоциированная с патологическими состояниями и тесно контактирующая с сосудами и синапсами [7, 60, 61, 62, 63].

Изменения микроглии при шизофрении описаны, главным образом, на экспериментальной модели шизофрении у животных — МИА, которая воспроизводится путем введения беременным грызунам агонистов врожденного иммунного ответа (в частности toll-подобных рецепторов TLR-3 и TLR-4).У взрослых потомков таких грызунов развиваются нейроанатомические, нейрохимические и поведенческие изменения, часть которых соответствует таковым при шизофрении (гиперактивность дофаминэргической системы, увеличение желудочков мозга,поведенческиеикогнитивныенарушения)[7,64,65].

Астроциты

Эти клетки в норме выполняют множество функций: поддержание гомеостаза, метаболическая поддержка нейронов, регуляция синаптической передачи (тройственный синапс), контроль за уровнем нейротрансмиттеров, (глутамат, ГАМК).

При шизофрении наблюдается дисфункция астроцитов, которая может приводить к глутаматной эксайтотоксичности, нарушению энергетического метаболизма нейронов и изменению синаптической пластичности.

Показано, что астроциты участвуют в воспалительном ответе, продуцируя цитокины и хемокины в ответ на активацию микроглии [59].

Клетки эндотелия сосудов головного мозга

Эндотелиальные клетки являются основным структурным компонентом ГЭБ.

При шизофрении выявляются признаки эндотелиальной дисфункции и нарушение микроциркуляции [41].

Происходит повышение проницаемости ГЭБ. Цитокины и другие медиаторы воспаления, продуцируемые как на периферии, так и в ЦНС, могут ослаблять плотные контакты между эндотелиальными клетками. Это приводит к повышению проницаемости ГЭБ и облегчает ми-

грацию периферических иммунных клеток (моноцитов, лейкоцитов) в паренхиму мозга, что дополнительно усиливает нейровоспаление [66].

Динамика маркеров нейровоспаления и связь с симптомами шизофрении

Маркеры нейровоспаления в крови и ликворе демонстрируют корреляцию с тяжестью симптомов шизофрении (таблица 1).

По данным различных авторов, сывороточные уровни IL-1β, IL-6 и TNFβ рассматриваются как маркеры состояния — остроты психоза, поскольку они значительно повышены у пациентов с острым рецидивом шизофрении и первым эпизодом психоза.

В российской выборке пациентов с шизофренией показана ассоциация IL-6 с тяжестью продуктивных симптомов и когнитивных расстройств; у пациентов стационара уровень IL-6 было выше, чем у амбулаторных, что косвенно согласуется с данными зарубежных авторов [71, 72, 76, 28, 70].

Известно, что С-реактивный белок (СРБ) является маркером воспаления, и его уровни повышаются при многих заболеваниях, включая шизофрению. Согласно систематическому обзору Fond et.al. [73] повышение уровня СРБ сыворотки при шизофрении ассоциируется с более выраженными когнитивными нарушениями, риском метаболических расстройств, никотиновой зависимостью.

Идентификация специфических иммунных профилей у пациентов рассматривается как перспективный подход для выделения подтипов заболевания и персонализированной терапии.

Во второй части настоящего обзора литературы мы осветим следующие разделы обсуждаемой темы:

- иммунные показатели — потенциальные маркеры шизофрении;

Таблица 1.

Связь маркеров нейровоспаления с тяжестью симптомов шизофрении

Категория маркеров	Маркеры/клетки	Динамика при шизофрении	Связь с симптомами шизофрении
Цитокины (сыворотка, ликвор)	IL-1β, IL-6, FNO-α, IL-17	Повышение на ранних этапах, снижается на фоне терапии	Высокий уровень коррелирует с выраженностью позитивных и негативных симптомов
Острофазные белки	С-реактивный белок	Повышение (свидетельствует о системном воспалении)	Связь с ухудшением когнитивных функций
Маркеры микроглии	TSPO (транслокационный белок 18 кДа)	Повышение связывания радиофармпрепаратов при ПЭТ-визуализации	Отражает плотность активированной микроглии, коррелирует с выраженностью психотической симптоматики
Аутоантитела	К NMDA-рецепторам, другим нейрональным структурам	Повышение титров у части пациентов	Может модулировать нейротрансмиссию и влиять на симптомообразование
Факторы роста	Фактор роста нерва (NGF), фактор роста эндотелия (VGF)	Изменение уровней	участвуют в нейропластичности и ангиогенезе.

[28, 67, 68, 69, 70].

- роль врожденного иммунитета;
- роль адаптивного иммунитета;
- аутоиммунные механизмы развития шизофрении;
- гематологические показатели и их динамику при шизофрении;
- влияние антипсихотических препаратов на нейровоспаление.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юрьева Л.Н. Этиология и патогенез шизофрении: лекция //Вестник психиатрии и психологии Чувашии. — 2010. — №. 6. — С. 139–153.
2. Кемпинский А. Шизофрения: теория энергетическо-информационного метаболизма / А. Кемпинский; пер. с польск. А. Боричев. — Москва: Альма Матер, — 2023. — 323 с. — ISBN 978-5-904993-93-1.
3. Торри Э.Ф. Шизофрения: книга в помощь врачам, пациентам и членам их семей / Э.Ф. Торри; пер. с англ. А.И. Ларин. — Санкт-Петербург: Питер, — 2025. — 558 с. — ISBN 978-5-4461-2238-7.
4. Жмуров В.А. Психиатрия / В.А. Жмуров. — Москва: Умный доктор, 2018. — 1312 с. — ISBN 978-5-6040667-1-3.
5. Незнанов Н.Г., Мазо Г.Э. (ред.). Тактика врача-психиатра: практическое руководство / Н.Г. Незнанов, Г.Э. Мазо. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2025. — 296 с. — ISBN 978-5-9704-9067-9.
6. Ерышев О.Ф., Аркадьев В.В. Сочетание аддиктивных расстройств и шизофрении в аспекте патогенеза и лечения // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. Спецвыпуски. 2010. Т. 110, № 5–2. С. 67–73.
7. Чугунов Д.А., Шмилович А.А., Николаева Д.В., Яшина Т.В., Ларина М.Р., Роговский В.С., Свиридова А.А. Шизофрения и нейровоспаление: патогенетические и терапевтические аспекты // Экстремальная биомедицина. 2025. Т. 27, № 1. С. 56–63. DOI: 10.47183/mes.2025-27-1-56-63.

8. McCutcheon RA, Reis Marques T, Howes OD. Schizophrenia-An Overview. JAMA Psychiatry. 2020;77(2):201–210. doi: 10.1001/jamapsychiatry.2019.3360.
9. Orsolini L., Pompili S., Volpe U. Schizophrenia: A Narrative Review of Etiopathogenetic, Diagnostic and Treatment Aspects. J Clin Med. 2022;11(17):5040. Published 2022 Aug 27. doi:10.3390/jcm11175040.
10. Kotzeva A., Mittal D., Desai S., Judge D., Samanta K. Socioeconomic burden of schizophrenia: a targeted literature review of types of costs and associated drivers across 10 countries. J Med Econ. 2023;26(1):70–83. doi:10.1080/13696998.2022.2157596.
11. Прожерина Ю. Современный взгляд на проблему шизофрении // Ремедиум. 2018. № 1–2. С. 49–54. DOI: 10.21518/1561–5936-2018-1-2-49–54.
12. Ahmed A.O., Strauss G.P., Buchanan R.W., Kirkpatrick B., Carpenter W.T. Schizophrenia heterogeneity revisited: Clinical, cognitive, and psychosocial correlates of statistically derived negative symptoms subgroups. J Psychiatr Res. 2018; 97:8–15. doi: 10.1016/j.jpsychires.2017.11.004.
13. Kirkpatrick B., Buchanan R.W., Ross D.E., Carpenter W.T. Jr. A separate disease within the syndrome of schizophrenia. Arch Gen Psychiatry. 2001;58(2):165–171. doi:10.1001/archpsyc.58.2.165.
14. Клюшник Т.П., Зозуля С.А. Иммунология шизофрении: современный взгляд на воспалительные гипотезы заболевания //Психиатрия. — 2024. — Т. 22. — №. 4. — С. 14–25. DOI: 10.30629/2618–6667–2024-22-4-14-25.
15. Menninger K.A. The Schizophrenic Syndrome as a Product of Acute Infectious Disease // Journal of Nervous and Mental Disease. 1928. Vol. 20. P. 464–481. DOI: 10.1001/ARCHNEURPSYC.1928.02210150024002.
16. Вартанян М.Е. Этиология и патогенез шизофрении. в кн.: Руководство по психиатрии /под ред. А.В. Снежневского. — М.: Медицина, 1983. — Т. 1. — С. 390–394.
17. Torrey E.F., Peterson M.R. Slow and latent viruses in schizophrenia // Lancet. 1973. Vol. 302. P. 22–24. DOI: 10.1016/s0140-6736(73)91952-1.
18. Nicolson G.L., Haier J. Role of Chronic Bacterial and Viral Infections in Neurodegenerative, Neurobehavioural, Psychiatric, Autoimmune and Fatiguing Illnesses: Part 2 // British Journal of Medical Practitioners. 2010. Vol. 3, No. 1. P. 301.
19. Kannan G., Pletnikov M.V. Toxoplasma gondii and cognitive deficits in schizophrenia: an animal model perspective. Schizophr Bull. 2012;38(6):1155–1161. doi:10.1093/schbul/sbs079.
20. Kim J.J. Viral Infections as Etiological Factors of Schizophrenia // Psychiatry Investigation. 2007. Vol. 4, No. 2. P. 61–65. doi:10.4306/pi.2007.4.2.61.
21. Knight J.G. Dopamine-receptor-stimulating autoantibodies: a possible cause of schizophrenia. Lancet. 1982;2(8307):1073-1076. doi:10.1016/s0140-6736(82)90007-1.
22. Burnet F.M. A modification of Jerne's theory of antibody production using the concept of clonal selection. C.A. Cancer J. Clin. 1976;26(2):119-121. doi:10.3322/canjclin.26.2.119.
23. Майорова М.А., Петрова Н.Н., Чурилов Л.П. Шизофрения как аутоиммунное заболевание: гипотезы и факты //Крымский журнал экспериментальной и клинической медицины. — 2018. — Т. 8. — №. 4. — С. 62–80.
24. Cartisano T., Kicker J. Anti-N-methyl-D-aspartate receptor encephalitis in 7-month-old infant following influenza vaccination (P5. 136) //Neurology. — 2016. — Т. 86. — №. 16_supplement. — С. P5. 136.
25. Михайлова И.И. и др. Приступообразная параноидная шизофрения как инфекционный процесс (мультидисциплинарное исследование) //Norwegian Journal of Development of the International Science. — 2019. — №. 37–1. — С. 31–35.
26. Blomström A., Karlsson H., Wicks S., Yang S., Yolken R.H., Dalman C. Maternal antibodies to infectious agents and risk for non-affective psychoses in the offspring--a matched case-control study. Schizophr Res. 2012;140(1-3):25–30. doi: 10.1016/j.schres.2012.06.035.
27. Canetta S., Sourander A., Surcel H.M., et al. Elevated maternal C-reactive protein and increased risk of schizophrenia in a national birth cohort. Am J Psychiatry. 2014;171(9):960–968. doi: 10.1176/appi.ajp.2014.13121579.
28. Miller B.J., Buckley P., Seabolt W., Mellor A., Kirkpatrick B. Meta-analysis of cytokine alterations in schizophrenia: clinical status and antipsychotic effects. Biol Psychiatry. 2011;70(7):663–671. doi: 10.1016/j.biopsych.2011.04.013.
29. Zheng Y., Zhang Q., Zhou X., Yao L., Zhu Q., Fu Z. Altered levels of cytokine, T- and B-lymphocytes, and PD-1 expression rates in drug-naïve schizophrenia patients with acute phase. Sci Rep. 2023;13(1):21711. Published 2023 Dec 7. doi:10.1038/s41598-023-49206-x.
30. Debnath M., Berk M. Th17 pathway-mediated immunopathogenesis of schizophrenia: mechanisms and implications. Schizophr Bull. 2014;40(6):1412–1421. doi:10.1093/schbul/sbu049.
31. Uranova N.A., Bonartsev P.D., Androsova L.V., Rakhmanova V.I., Kaleda V.G. Impaired monocyte activation in schizophrenia: ultrastructural abnormalities and increased IL-1β production. Eur Arch Psychiatry Clin Neurosci. 2017;267(5):417-426. doi:10.1007/s00406-017-0782-1.
32. Krause D.L., Wagner J.K., Wildenauer A., et al. Intracellular monocytic cytokine levels in schizophrenia show an alteration of IL-6. Eur Arch Psychiatry Clin Neurosci. 2012;262(5):393–401. doi:10.1007/s00406-012-0290-2.
33. Pedraz-Petrozzi B., Elyamany O., Rummel C., Mulert C. Effects of inflammation on the kynurenine pathway in schizophrenia — a systematic review. J Neuroinflammation. 2020;17(1):56. Published 2020 Feb 15. doi:10.1186/s12974-020-1721-z.
34. Клюшник Т.П., Смулевич А.Б., Зозуля С.А., Романов Д.В., Лобанова В.М. Клинико-иммунологические аспекты бредовых расстройств при параноидной шизофрении // Психиатрия. — 2023. — Т. 21. — №. 2. — С. 6–16. doi: 10.30629/2618–6667–2023-21-2-6-16.
35. Голимбет В.Е., Клюшник Т.П. Молекулярно-генетические и иммунологические аспекты формирования психопатологической симптоматики при шизофрении // Неврология и поведенческая физиология. — 2023. — Т. 53, — № 5. — С. 812–817. doi: 10.1007/s11055-023–01473-x.
36. Зозуля С.А., Отман И.Н., Аниховская И.А., Тихонов Д.В., Каледа В.Г., Яковлев М.Ю., Клюшник Т.П. Маркеры воспаления и показатели системной эндотоксемии у пациентов с резистентной к лечению шизофренией // European Psychiatry. — 2023. — Т. 66, — № 1. — С. 247–248. doi: 10.1192/j.eurpsy.2023.568.
37. Зозуля С.А. и др. Маркеры воспаления при шизофрении для науки и практики //Доктор. Ру. — 2023. — Т. 22. — №. 6. — С. 7–14. doi: 10.31550/1727–2378–2023-22-6-7-14.
38. Ушаков В.Л. и др. Связь между воспалением, когнитивными нарушениями и данными нейровизуализации при шизофрении //Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. — 2020. — Т. 120. — №. 11. — С. 70–78. doi: 10.17116/jnevro202012011170.

39. Borovcanin M.M., Jovanovic I., Radosavljevic G., et al. Interleukin-6 in Schizophrenia-Is There a Therapeutic Relevance? Front Psychiatry. 2017; 8:221. Published 2017 Nov 6. doi:10.3389/fpsyt.2017.00221.
40. Wang A.K., Miller B.J. Meta-analysis of Cerebrospinal Fluid Cytokine and Tryptophan Catabolite Alterations in Psychiatric Patients: Comparisons Between Schizophrenia, Bipolar Disorder, and Depression. Schizophr Bull. 2018;44(1):75-83. doi:10.1093/schbul/sbx035.
41. Сахаров А.В., Голыгина С.Е. Перспективные маркеры нейровоспаления при шизофрении // Нейрохимия. — 2024. — Т. 41, № 1. — С. 5–13. doi: 10.31857/S1027813324010015.
42. Goldsmith D.R., Rapaport M.H., Miller B.J. A meta-analysis of blood cytokine network alterations in psychiatric patients: comparisons between schizophrenia, bipolar disorder, and depression. Mol Psychiatry. 2016;21(12):1696-1709. doi:10.1038/mp.2016.3.
43. Miller B.J., Culpepper N., Rapaport M.H. C-reactive protein levels in schizophrenia: a review and meta-analysis. Clin Schizophr Relat Psychoses. 2014;7(4):223-230. doi: 10.3371/CSRP.MICU.020813.
44. Рукавишников Г.В., Жиляева Т.В., Дубинина Е.Е., Мазо Г.Э. Роль интерлейкина-6 в механизмах развития шизофрении // Нейрохимия. — 2023. — Т. 40, № 1. — С. 23–29. doi: 10.31857/S1027813323010168.
45. Do K.Q., Trabesinger A.H., Kirsten-Krüger M., et al. Schizophrenia: glutathione deficit in cerebrospinal fluid and prefrontal cortex in vivo. Eur J Neurosci. 2000;12(10):3721–3728. doi:10.1046/j.1460-9568.2000. 00229.x.
46. González-Blanco L., García-Portilla M.P., García-Álvarez L., et al. Oxidative stress biomarkers and clinical dimensions in first 10 years of schizophrenia. Biomarcadores de estrés oxidativo y dimensiones clínicas en los 10 primeros años de esquizofrenia. Rev Psiquiatr Salud Ment (Engl Ed). 2018;11(3):130–140. doi: 10.1016/j.rpsm.2018.03.003.
47. Munn N.A. Microglia dysfunction in schizophrenia: an integrative theory. Med Hypotheses. 2000;54(2):198–202. doi:10.1054/mehy.1999.0018.
48. Shnayder N.A., Khasanova A.K., Strelnik A.I., et al. Cytokine Imbalance as a Biomarker of Treatment-Resistant Schizophrenia. Int J Mol Sci. 2022;23(19):11324. Published 2022 Sep 26. doi:10.3390/ijms231911324.
49. Potvin S., Stip E., Sepehry A.A., Gendron A., Bah R., Kouassi E. Inflammatory cytokine alterations in schizophrenia: a systematic quantitative review. Biol Psychiatry. 2008;63(8):801–808. doi: 10.1016/j.biopsych.2007.09.024.
50. Erhardt S., Schwieler L., Nilsson L., Linderholm K., Engberg G. The kynurenic acid hypothesis of schizophrenia. Physiol Behav. 2007;92(1-2):203–209. doi: 10.1016/j.physbeh.2007.05.025.
51. Клюшник Т.П., Зозуля С.А., Андросова Л.В., Сарманова З.В., Отман И.Н., Дупин А.М., Борисова О.А. Иммунологический мониторинг эндогенных приступообразных психозов //Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. — 2014. — Т. 114. — №. 2. — С. 37–42.
52. Pandey G.N., Ren X., Rizavi H.S., Zhang H. Proinflammatory cytokines and their membrane-bound receptors are altered in the lymphocytes of schizophrenia patients. Schizophr Res. 2015;164(1-3):193–198. doi: 10.1016/j.schres.2015.02.004.
53. Miller B.J., Goldsmith D.R. Evaluating the Hypothesis That Schizophrenia Is an Inflammatory Disorder. Focus (Am Psychiatr Publ). 2020;18(4):391-401. doi: 10.1176/appi.focus.20200015.
54. Чехонин В.П. и др. К вопросу о механизмах аутоагрессии антител к нейроспецифическим белкам через гематоэнцефалический барьер //Российский психиатрический журнал. — 1997. — №. 1. — С. 43–45.
55. Ellison-Wright I., Bullmore E. Meta-analysis of diffusion tensor imaging studies in schizophrenia. Schizophr Res. 2009;108(1-3):3–10. doi: 10.1016/j.schres.2008.11.021.
56. Лебедева И.С., Томышев А.С., Ахадов Т.А., Каледа В.Г. О корреляциях особенностей серого и белого вещества головного мозга при шизофрении // Психиатрия. — 2017. — № 75. — С. 22–25. doi: 10.30629/2618–6667-2017-75-22-25.
57. Уранова Н.А., Вихрева О.В., Рахманова В.И. Особенности взаимодействия микроглии и олигодендроцитов в белом веществе при непрерывнотекущей шизофрении //Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. — 2022. — Т. 122. — №. 12. — С. 128–137. doi: 10.17116/jnevro2022122121128.
58. Müller N. Inflammation in schizophrenia: pathogenetic aspects and therapeutic considerations. Schizophr Bull. 2018;44(5):973–982. doi: 10.1093/schbul/sby024.
59. Seunghee Won Neuroglial Cells and Schizophrenia. Korean Journal of Biological Psychiatry 2015;22(2):47–54. Published online: Feb, 1, 2015.
60. Halstead S., Siskind D., Amft M., et al. Alteration patterns of peripheral concentrations of cytokines and associated inflammatory proteins in acute and chronic stages of schizophrenia: a systematic review and network meta-analysis. Lancet Psychiatry. 2023;10(4):260–271. doi:10.1016/S2215-0366(23)00025-1.
61. Xia Y., Zhang Z., Lin W., et al. Modulating microglia activation prevents maternal immune activation induced schizophrenia-relevant behavior phenotypes via arginase 1 in the dentate gyrus. Neuropsychopharmacology. 2020;45(11):1896-1908. doi:10.1038/s41386-020-0743-7.
62. Klaus F., Nguyen T.T., Thomas M.L., et al. Peripheral inflammation levels associated with degree of advanced brain aging in schizophrenia. Front Psychiatry. 2022; 13:966439. Published 2022 Aug 12. doi:10.3389/fpsyt.2022.966439.
63. Ľupták M., Michaličková D., Fišar Z., Kitzlerová E., Hroudová J. Novel approaches in schizophrenia-from risk factors and hypotheses to novel drug targets. World J. Psychiatry. 2021;11(7):277–296. Published 2021 Jul 19. doi:10.5498/wjp. v11.i7.277.
64. Mousaviyan R., Davoodian N., Alizadeh F., et al. Zinc Supplementation During Pregnancy Alleviates Lipopolysaccharide-Induced Glial Activation and Inflammatory Markers Expression in a Rat Model of Maternal Immune Activation. Biol Trace Elem Res. 2021;199(11):4193–4204. doi:10.1007/s12011-020-02553-6.
65. Eßlinger M., Wachholz S., Manitz M.P., et al. Schizophrenia associated sensory gating deficits develop after adolescent microglia activation. Brain Behav Immun. 2016; 58:99–106. doi: 10.1016/j.bbi.2016.05.018.
66. Brandl S., Reindl M. Blood-Brain Barrier Breakdown in Neuroinflammation: Current In Vitro Models. Int J Mol Sci. 2023;24(16):12699. Published 2023 Aug 11. doi:10.3390/ijms241612699.
67. Жиляева Т. и др. Интерлейкин-6 сыворотки при шизофрении: ассоциация с клиническими и социодемографическими характеристиками //Consortium Psychiatricum. — 2023. — Т. 4. — №. 4. — С. 5–16. doi:10.17816/CP11067.

68. Chaves C., Dursun S.M., Tusconi M., Hallak J.E.C. Neuroinflammation and schizophrenia — is there a link? Front Psychiatry. 2024; 15:1356975. Published 2024 Feb 8. doi:10.3389/fpsyt.2024.1356975.
69. Малашенкова И.К. и др. Иммунологический профиль у пациентов с эпизодической и непрерывной параноидной шизофренией //Consortium Psychiatricum. — 2021. — Т. 2. — №. 1. — С. 19–31. doi:10.17816/CP66.
70. Абдуманнонов Ж.А. и др. Ассоциация гематологических коэффициентов с маркерами воспаления и окислительного стресса при шизофрении: результаты пилотного анализа //Обозрение психиатрии и медицинской психологии имени ВМ Бехтерева. — 2025. — Т. 59. — №. 3. — С. 60–70. doi:10.31363/2313–7053-2025-3-1083.
71. Серазетдинова В.С., Петрова Н.Н., Дорофейков В.В., Майорова М.А. Клинико-иммунологические взаимосвязи у пациентов на раннем этапе шизофрении // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. — 2025. — Т. 125, № 2. — С. 35–42. doi: 10.17116/jnevro202512502135.
72. Романенко Р.Н., Демьяненко Г.И., Трубников С.А. Клинико-иммунологические показатели у больных шизофренией с преобладанием негативных расстройств //Прикладные информационные аспекты медицины. — 2007. — №. 10. — С. 116–118.
73. Fond G., Lançon C., Auquier P., Boyer L. C-Reactive Protein as a Peripheral Biomarker in Schizophrenia. An Updated Systematic Review. Front Psychiatry. 2018; 9:392. Published 2018 Aug 23. doi:10.3389/fpsyt.2018.00392.

© Никифоров Игорь Анатольевич (narkolog.ipk@mail.ru); Костюк Георгий Петрович (pkb1@zdrav.mos.ru);
Бурыгина Лариса Андреевна (pkb4@zdrav.mos.ru); Белова Майя Юрьевна (pkb4-pb3@zdrav.mos.ru);
Истомина Виктория Витальевна (pkb4-pb3@zdrav.mos.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.27

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОРГАНОСОХРАНЯЮЩЕГО ЛЕЧЕНИЯ КОРОТКИХ ОЖОГОВЫХ СТРИКТУР ПИЩЕВОДА

COMPARATIVE ANALYSIS OF ORGAN-PRESERVING TREATMENT FOR SHORT ESOPHAGEAL BURN STRICTURES

N. Petukhova
F. Vetshev
S. Osminin
K. Russkova
Sh. Adkhamov

Summary. *Background*. Short esophageal strictures are a severe complication of caustic esophageal injury; however, the optimal organ-preserving treatment strategy remains controversial.
Objective. To compare the effectiveness of organ-preserving treatment modalities for short caustic esophageal strictures.
Materials and Methods. This study included 43 patients with short caustic esophageal strictures treated between 2007 and 2025. The efficacy of fluoroscopy-guided balloon dilation and bougienage was evaluated. Immediate treatment outcomes were assessed based on the improvement of dysphagia and changes in the esophageal lumen diameter.
Results. Balloon dilation demonstrated the highest efficacy in patients with acid-induced strictures of less than 6 months' duration, achieving successful outcomes in 76 % of cases. In contrast, bougienage provided superior results in alkali-induced strictures, proving effective in 64 % of patients. Among patients with strictures caused by ingestion of boiling liquids or alcohol, balloon dilation achieved excellent outcomes in 100 % of cases. Conversely, bougienage was effective in all patients with radiation-induced esophageal strictures.
Conclusion. The choice of treatment for short caustic esophageal strictures should be guided by the etiology of the injury and the duration of the disease. Balloon dilation is the preferred treatment for acid-induced strictures, whereas bougienage is more appropriate for alkali-induced esophageal injuries.

Keywords: caustic esophageal injury; short esophageal stricture; organ-preserving treatment; bougienage; balloon dilation.

Петухова Наталья Васильевна
Ассистент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова
petukhova_n_v_1@staff.sechenov.ru
Ветшев Федор Петрович
доктор медицинских наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова
vetshev_f_p@staff.sechenov.ru
Осминин Сергей Викторович
доктор медицинских наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова
osminin_s_v@staff.sechenov.ru
Русскова Ксения Сергеевна
кандидат медицинских наук, ассистент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова
russkova_k_s@staff.sechenov.ru
Адхамов Шоаббос Аброрович
Аспирант, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова
adhamov.abbos@mail.ru

Аннотация. *Введение*. Короткие стриктуры пищевода являются тяжелым осложнением ожогов пищевода, однако выбор оптимального метода органосохраняющего лечения до настоящего времени остается предметом дискуссии.
Цель исследования — провести сравнительный анализ эффективности органосохраняющих методов лечения коротких ожоговых стриктур пищевода.
Материалы и методы. В исследование включено 43 пациента с короткими ожоговыми стриктурами пищевода, проходившие лечение в период с 2007 по 2025 гг. Оценивали эффективность баллонной дилатации и бужирования, выполненных под рентгенологическим контролем. Непосредственные результаты лечения оценивали по динамике купирования дисфагии и изменению диаметра просвета пищевода.
Результаты. Наиболее высокая эффективность баллонной дилатации отмечена у 76 % пациентов со стриктурами кислотной этиологии с давностью заболевания менее 6 месяцев. При щелочных стриктурах лучшие результаты продемонстрировало бужирование, эффективное у 64 % пациентов.



У больных со стриктурами после употребления кипятка и алкоголя баллонная дилатация обеспечила отличный результат в 100 % наблюдений. Однако при постлучевых стриктурах у всех больных было эффективно бужирование пищевода.

Заключение. Выбор метода лечения коротких ожоговых стриктур пищевода должен основываться на этиологии поражения и давности заболевания. Баллонная дилатация является методом выбора при стриктурах кислотной этиологии, тогда как при щелочных ожогах предпочтительно выполнение бужирования.

Ключевые слова: ожог пищевода, короткая стриктура пищевода, органосохраняющее лечения, бужирование, баллонная дилатация.

Введение

Ожоги пищевода остаются основной причиной формирования доброкачественных рубцовых стриктур, требующих длительного комплексного лечения. В клинической практике основными методами лечения коротких стриктур, протяжённостью до 3–5 см, считаются бужирование и баллонная дилатация, эффективность которых на ранних этапах рубцевания достигает 70–80 % [1,2]. Вместе с тем частота рецидивов после такого органосохраняющего лечения остается достаточно высокой — до 50 %, как и риск развития тяжелых осложнений, среди которых наиболее опасной является перфорация пищевода, наблюдаемая в 2–5 % случаев [3,4,5]. Выбор оптимального метода органосохраняющего лечения до настоящего времени остается предметом дискуссии.

Актуальность проблемы определяется отсутствием международных рекомендаций по срокам начала и периодичности дилатационных процедур [6,7,8]. Особое значение имеет характер химического агента, поскольку кислотные и щелочные ожоги отличаются по глубине поражения, длительности формирования рубцовой стриктуры и прогнозу заболевания [9,10]. В связи с этим представляется необходимым анализ эффективности различных органосохраняющих методов лечения коротких ожоговых стриктур пищевода с целью обоснования оптимальной лечебной тактики.

Целью настоящей статьи является анализ эффективности бужирования и баллонной дилатации в лечении пациентов с короткими ожоговыми стриктурами пищевода.

Материалы и методы

В исследование включено 43 пациента с короткими ожоговыми стриктурами пищевода, проходивших лечение на базе Клиники факультетской хирургии им. Н.Н. Бурденко ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет) в период с 2009 по 2025 гг.

Средний возраст составил 49,8±14,2 лет, мужчин было 21 (49 %) и женщин — 22 (51 %). Всем больным проводили комплексное обследование, которое включало: сбор жалоб и анамнеза, физикальное исследование, лабораторные и инструментальные методы диагностики (полипозиционную рентгенографию пищевода с контрастированием, эндоскопическое исследование и мультиспиральную компьютерную томографию органов грудной и брюшной полости с внутривенным контрастированием). На основании всех полученных данных оценивали локализацию, протяженность стриктуры и степень сужения, так же наличие осложнений.

У всех включенных в исследование больных присутствовали симптомы дисфагии. Степень выраженности дисфагии оценивали по классификации S.G. Bown, 1987 [11] (см. таблицу 1).

Таблица 1.

Распределение пациентов с короткими стриктурами пищевода в зависимости от степени дисфагии

Степень дисфагии	(n= 43)
I степень	4 (9 %)
II степень	14 (33 %)
III степень	25 (58 %)
IV степень	–

Основным этиологическим фактором формирования коротких стриктур пищевода являлось употребление концентрированных растворов кислот или щелочей, наиболее часто стриктуры пищевода располагались в средней трети пищевода (47 %). Большинство пациентов выпивали токсическую жидкость случайно, преднамеренное употребление ядовитых веществ зафиксировано у 7 (18 %) больных (см. таблицу 2).

В зависимости от давности получения ожога выделяли два временных периода: до 6 месяцев — 21 пациент (49 %), и более 6 месяцев — 22 пациента (51 %). В зависимости от степени сужения пищевода выделяли 4 степени

Таблица 2.

Распределение пациентов в зависимости от локализации и этиологии стриктуры пищевода (n=43)

Локализация	Этиология					
	Кислота (n= 17) (40 %)	Щелочь (n= 16) (37 %)	Кипяток (n= 4) (9 %)	Алкоголь (n= 3) (7 %)	Облучение (n= 3) (7 %)	Всего
Верхняя треть	2 (12 %)	6 (38 %)	2 (50 %)	–	–	10 (23 %)
Средняя треть	7 (41 %)	8 (50 %)	2 (50 %)	3 (100 %)	–	20 (47 %)
Нижняя треть	8 (47 %)	2 (12 %)	–	–	3 (100 %)	13 (30 %)

согласно классификации Ю.И. Галлингера и Э.А. Годжелло (1999 г.) [12] и Модифицированной классификации доброкачественных рубцовых стриктур пищевода и пищеводных анастомозов (2025 г.) [13] (см. таблицу 3).

Таблица 3.

Распределение пациентов в зависимости от степени сужения пищевода

Степень сужения	Количество больных (n= 43)
1 степень	2 (4,7 %)
2 степень	20 (46,5 %)
3 степень	21 (48,8 %)
4 степень	–

Важными аспектами при выборе метода лечения пациентов являлись степень сужения просвета пищевода, локализация и этиология стриктуры, а также давность заболевания. Бужирование и баллонную дилатацию выполняли под рентгенологическим контролем.

Эффективность органосохраняющего лечения оценивали по изменению степени дисфагии, расширению просвета пищевода, а также по Модифицированной шкале оценки непосредственных результатов лечения (2025) [13]. При обработке базы данных использованы методы описательной и аналитической статистики. Для анализа категориальных переменных и оценки различий в частоте исходов применяли критерий χ^2. Сравнения количественных переменных проводили с помощью t-критерия Стьюдента, для количественных переменных сравнительный анализ проводили с помощью непараметрического теста Манна-Уитни с точным расчетом p-уровня значимости. Статистически значимыми считали различия, полученные при уровне значимости $p < 0.05$.

Результаты

Пациентам с короткими ожоговыми стриктурами пищевода выполняли, преимущественно, мини-инвазивное органосохраняющее лечение — сеансы бужирования и баллонной дилатации (см. таблицу 4).

Таблица 4.

Структура выполненных вмешательств у больных с короткими ожоговыми стриктурами (n=43)

Группа	БД (n=28)	Бужирование (n=20)	Фундопликация (n=6)	Радикальная операция (n=5)
Кислота (n=17)	17 (100 %)	3 (18 %)	4 (24 %)	–
Щёлочь (n=16)	4 (25 %)	14 (88 %)	2 (12 %)	5 (31 %)
Кипяток (n=4)	4 (100 %)	–	–	–
Алкоголь (n=3)	3 (100 %)	–	–	–
Облучение (n=3)	–	3 (100 %)	–	–

Было выявлено, что эффективность лечения различалась в зависимости от этиологии стриктуры и давности заболевания.

Среди пациентов со стриктурой кислотной этиологии давностью заболевания менее 6 месяцев эффективность баллонной дилатации составила 82 %, что подтверждалось как снижением степени дисфагии, так и рентгенологической картиной — у 13 из 15 больных отмечено увеличение диаметра просвета пищевода до 15 мм и более. У 3 больных с длительным анамнезом заболевания БД была неэффективна, в связи с чем им выполнили бужирование по струне с положительным эффектом.

Среди 4 больных со щёлочными ожоговыми стриктурами пищевода попытки выполнения баллонной дилатации не увенчались успехом — клиническая эффективность была достигнута лишь у двух из четырех больных с локализацией стриктуры в верхнегрудном отделе пищевода и давностью заболевания менее 6 месяцев. У большинства пациентов со щелочной этиологией стриктур (88 %) несмотря на проведенное лечение сохранялась дисфагия, в связи с чем было принято решение о проведении им сеансов бужирования.

Немногочисленную группу составили пациенты со стриктурами, сформировавшимися в результате непреднамеренного употребления кипятка, алкогольных напитков, а также вследствие перенесенной лучевой терапии. У пациентов со стриктурами после употребления кипятка и алкоголя клинический и рентгенологический эффект был достигнут после проведения БД, вне зависимости от давности заболевания. Трем больным с постлучевой стриктурой до обращения в клинику неоднократно выполняли сеансы баллонной дилатации по месту жительства со слабым положительным эффектом, в связи с чем было принято решение в пользу бужирования, после которого достигнуто уменьшение выраженности дисфагии, подтвержденное рентгенологически (см. таблицу 5, 6).

Таблица 5.

Степень дисфагии до и после органосохраняющего лечения у пациентов с короткими ожоговыми стриктурами пищевода

Группа	Метод лечения	Степень дисфагии			p
			до лечения	после лечения	
Кислота (n=17)	Баллонная дилатация (n=17)	0 степень	–	**10 (59 %)**	**≤0,001**
		1 степень	2 (12 %)	**4 (23 %)**	
		2 степень	7 (41 %)	2 (12 %)	
		3 степень	8 (47 %)	1 (6 %)	
	Бужирование (n=3)	0 степень	–	**1 (33 %)**	0,102
		1 степень	–	**2 (67 %)**	
		2 степень	2 (67 %)		
		3 степень	1 (33 %)		
Щелочь (n=16)	Баллонная диллатация (n=4)	0 степень	–	**1 (25 %)**	0,157
		1 степень	–	**1 (25 %)**	
		2 степень	2 (50 %)	1 (25 %)	
		3 степень	2 (50 %)	1 (25 %)	
	Бужирование (n=14)	0 степень	–	**6 (42 %)**	**0,003**
		1 степень	1 (7 %)	**3 (21 %)**	
		2 степень	2 (14 %)	2 (14 %)	
		3 степень	11 (79 %)	3 (21 %)	
Кипяток (n=4)	Баллонная диллатация (n=4)	0 степень	–	2 (50 %)	0,063
		1 степень	1 (25 %)	2 (50 %)	
		2 степень	2 (50 %)	–	
		3 степень	1 (25 %)	–	
Алкоголь (n=3)	Баллонная диллатация (n=3)	0 степень	–	1 (33 %)	0,083
		1 степень	–	2 (67 %)	
		2 степень	1 (33 %)	–	
		3 степень	2 (67 %)	–	
Об-лучение (n=3)	Бужирование (n=3)	0 степень	–	1 (33 %)	0,083
		1 степень	–	2 (67 %)	
		2 степень	1 (33 %)	–	
		3 степень	2 (67 %)	–	

Таблица 6.

Диаметр просвета пищевода до и после органосохраняющего лечения у пациентов с короткими ожоговыми стриктурами пищевода

Группа	Метод лечения	Диаметр просвета пищевода, мм		p
		до лечения	после лечения	
Кислота (n=17)	Баллонная диллатация (n=17)	6,00±1,73	15,12±3,43	**≤0,001**
	Бужирование (n=3)	8,67±1,16	15,67±1,16	0,109
Щелочь (n=16)	Баллонная диллатация (n=4)	5,00±0,82	11,25±4,99	0,066
	Бужирование (n=14)	5,36±1,91	12,21±3,85	**0,001**
Кипяток (n=4)	Баллонная диллатация (n=4)	6,25±1,71	15,75±0,96	0,066
Алкоголь (n=3)	Баллонная диллатация (n=3)	5,33±0,58	15,33±0,58	0,083
Облучение (n=3)	Бужирование (n=3)	7,00±1,00	15,33±0,58	0,083

По Модифицированной шкале (2025) у пациентов со стриктурами кислотной этиологии отмечен лучший ответ на проведенные сеансы БД (отличный результат в 76 % случаев), в отличии от пациентов со стриктурами щелочной этиологии. Всем больным со стриктурами после употребления кипятка и алкоголя выполнение БД привело к отличному ответу на лечение, как и бужирование у пациентов с постлучевыми стриктурами пищевода (см. таблицу 7).

Таблица 7.

Результаты органосохраняющего лечения у пациентов с короткими ожоговыми стриктурами пищевода

Группа	Метод лечения	Результат лечения	
Кислота (n=17)	Баллонная диллатация (n=17)	удовлетворительный	3 (18 %)
		хороший	1 (6 %)
		отличный	13 (76 %)
	Бужирование (n=3)	отличный	3 (100 %)
Щелочь (n=16)	Баллонная диллатация (n=4)	удовлетворительный	1 (25 %)
		хороший	1 (25 %)
		отличный	2 (50 %)
	Бужирование (n=14)	неудовлетворительный	1 (7 %)
		удовлетворительный	4 (29 %)
		хороший	3 (21 %)
		отличный	6 (43 %)
Кипяток (n=4)	Баллонная диллатация (n=4)	отличный	4 (100 %)
Алкоголь (n=3)	Баллонная диллатация (n=3)	отличный	3 (100 %)
Облучение (n=3)	Бужирование (n=3)	отличный	3 (100 %)

Среди 14 больных со щелочными стриктурами проведение 4–6 сеансов бужирования было эффективно у 9 пациентов (64 %), остальным пяти (31 %) больным с давностью заболевания более 6 месяцев потребовалось выполнение радикального лечения в объеме резекции пищевода с пластикой желудочным трансплантатом. Трём больным выполнили трансхиатальную субтотальную резекцию пищевода с анастомозом на шее, двум другим — тораколапароскопическую субтотальную резекцию пищевода по типу McKeown. У одного пациента после трансхиатальной операции, на 4-е сутки при контрольном рентгенологическом исследование с пероральным контрастированием диагностировали несостоятельность эзофаго-гастроанастомоза тип I (классификация CAES, 2018), дефект анастомоза закрылся на фоне консервативной терапии. Других осложнений, включая перфорацию пищевода после бужирования или баллонной дилатации, отмечено не было.

У 6 (14 %) пациентов со стриктурами нижнегрудного отдела пищевода в срок от 1,5 до 3 месяцев после проведенного органосохраняющего лечения развилась клиническая картина рефлюкс-эзофагита, грыжи пищеводного отверстия диафрагмы и вторичного укорочения пищевода, подтвержденная данными инструментального исследования. Среди них было четверо пациентов со стриктурой кислотной этиологии, двое — со щелочной. Этим пациентам выполнили лапароскопическую фундопликацию в модификации А.Ф. Черноусова, с положительным эффектом в виде купирования симптомов рефлюкс-эзофагита и отсутствием рецидива дисфагии.

Заключение

Эффективность органосохраняющего лечения коротких ожоговых стриктур пищевода определяется этиологией поражения и давностью заболевания. Баллонная дилатация продемонстрировала наилучшие результаты у пациентов со стриктурами кислотной этиологии, а также со стриктурами после употребления кипятка и алкоголя, обеспечивая значимое уменьшение дисфагии и восстановление проходимости пищевода. При щелочных ожоговых стриктурах баллонная дилатация в большинстве случаев не позволяла добиться стойкого клинического эффекта, а более эффективным методом являлось бужирование, но лишь у ограниченного числа пациентов, получивших ожог в срок до 6 месяцев на момент обращения. При длительном анамнезе заболевания оправдано выполнение реконструктивных операций. Применение дифференцированного подхода к выбору метода лечения позволяет повысить эффективность органосохраняющей терапии, избежать радикальных вмешательств у большинства пациентов и обеспечить высокий профиль безопасности лечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chirica M., Kelly M.D., Siboni S. et al. Caustic ingestion // Lancet. — 2017. Vol. — 389. — № 10083. — P. 2041–2052. doi: 10.1016/S0140-6736(16)30313-0.
2. Zargar S.A., Kochhar R., Nagi B. et al. Ingestion of corrosive acids. Spectrum of injury to upper gastrointestinal tract and natural history // Gastroenterology. 1989. — Vol. 97. –№ 3. — P. 702–707.
3. Bonavina L., Chirica M., Skrobic M. et al. Foregut caustic injuries: results of the world society of emergency surgery consensus conference // World Journal of Emergency Surgery. — 2015. — Vol. 10. — P. 44. Bonavina L., Chirica M., Skrobic M. et al. Foregut caustic injuries: results of the world society of emergency surgery consensus conference // World Journal of Emergency Surgery. — 2015. — Vol. 10. — P. 44.
4. Poley J.W., Steyerberg E.W., Kuipers E.J. et al. Ingestion of acid and alkaline agents: outcome and prognostic value of early upper endoscopy // Gastrointestinal Endoscopy. — 2004. — Vol. — 60. –№ 3. — P. 372–377. doi: 10.1016/s0016-5107(04)01722-5.

5. Cheng H.T., Cheng C.L., Lin C.H. et al. Caustic injury of the upper gastrointestinal tract: a 10-year experience after introduction of a standardized management protocol at a tertiary care center // World Journal of Gastroenterology. — 2008. — Vol. 14. — № 8. — P. 1236–1242. doi: 10.3748/wjg. v19.i25.391.
6. Kasivisvanathan V. et al. Endoscopic management of benign esophageal strictures // Best Practice & Research Clinical Gastroenterology. — 2018. — Vol. 36–37. — P. 47–57. doi: 10.20524/aog.2021.0585.
7. Contini S., Scarpignato C. Caustic injury of the upper gastrointestinal tract: a comprehensive review // World Journal of Gastroenterology. — 2013. — Vol. 19. — № 25. — P. 3918–3930. doi: 10.3748/wjg. v19.i25.3918.
8. Sarfati E., Giraud F., Bernard B. et al. Management of caustic ingestion: results of 58 cases // Diseases of the Esophagus. — 1997. — Vol. 10. — № 4. — P. 271–275.
9. Riffat F., Cheng A. Peptic stricture, and caustic stricture of the esophagus // Surgical Clinics of North America. — 2015. — Vol. 95. — № 3. — P. 569–582.
10. Di Costanzo J., Noirclerc M., Jougon J. et al. Esophageal strictures after caustic burns: management and outcome // Annals of Surgery. — 1980. — Vol. 191 — № 5. — P. 590–596.
11. Bown S.G., Hawes R., Matthewson K., Swain C.P., Barr H., Boulos P.B., Clark C.G. Endoscopic laser palliation for advanced malignant dysphagia Gut // 1987. — Vol. 28. — № 7. — P. 799–807. doi:10.1136/gut.28.7.799. PMID: 244343
12. Галлингер Ю.И., Годжелло Э.А. Оперативная эндоскопия пищевода / Ю.И. Галлингер, Э.А. Годжелло / Москва: Российский научный центр хирургии РАМН, 1999. — 273 с.
13. Годжелло Э.А., Белисова Т.В., Булганина Н.А., Хрусталева М.В. Модификация классификации доброкачественных рубцовых стриктур пищевода и пищеводных анастомозов и шкалы оценки непосредственных результатов эндоскопического лечения // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. — 2025. –№5. — С. 47–58 doi: 10.31146/1682–8658-ecg-237-5-47-58.

© Петухова Наталья Васильевна (petukhova_n_v_1@staff.sechenov.ru); Ветшев Федор Петрович (vetshev_f_p@staff.sechenov.ru);
Осминин Сергей Викторович (osminin_s_v@staff.sechenov.ru); Русскова Ксения Сергеевна (russkova_k_s@staff.sechenov.ru);
Адхамов Шоаббос Аброрович (adhamov.abbos@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.29

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕСТАВРАЦИИ ПРИКУСА С ЦИФРОВЫМ ПРОТОКОЛИРОВАНИЕМ CAD/CAM И ОЦЕНКОЙ АДАПТАЦИИ ТКАНЕЙ ВИСОЧНО-НИЖНЕЧЕЛЮСТНОГО СУСТАВА

KINEMATIC APPROACH TO OCCLUSAL REHABILITATION WITH DIGITAL CAD/CAM PROTOCOL AND ASSESSMENT OF TEMPOROMANDIBULAR JOINT TISSUE ADAPTATION

E. Rochshin

Summary. The article reviews a kinematic concept of occlusal rehabilitation in which the digital CAD/CAM protocol couples in vivo mandibular trajectories with the morphology of the temporomandibular joint (TMJ) components. Three aspects are analysed comparatively: accuracy of mandibular motion capture and interocclusal registration; predictability of vertical dimension of occlusion (VDO) change in full-arch rehabilitations using lithium disilicate and zirconia ceramics; and morphofunctional adaptation of the condyle, disc, and articular fossa in the mid-term. The source base includes publications from 2017–2025 indexed in PubMed, Scopus, and Springer. Findings indicate that optical interocclusal registration matches conventional wax records under proper quadrant scan protocols; virtual facebows and kinematic articulators reproduce mandibular paths with a deviation of about 1.5–2 mm; raising VDO up to 5 mm with adequate diagnostic stabilisation does not produce persistent dysfunction, and the joint responds with remodelling that improves the condyle–fossa relationship.

Keywords: occlusal rehabilitation, mandibular kinematics, virtual articulator, digital facebow, CAD/CAM, temporomandibular joint, vertical dimension of occlusion, lithium disilicate.

Рощин Евгений Михайлович
Кандидат медицинских наук, врач стоматолог-ортопед, стоматолог-ортодонт,
Московский государственный медико-стоматологический университет
Evgenii-r.st@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена разбору кинематической модели реставрации прикуса, в которой цифровой протокол CAD/CAM выступает не только средством изготовления реставраций, но и инструментом сопряжения прижизненной траектории нижней челюсти с морфологией суставных компонентов. Актуальность темы связана с тем, что переход от усреднённых параметров артикулятора к индивидуальной кинематике стал технически доступным благодаря оптическим и ультразвуковым системам захвата движений, виртуальным лицевым дугам и мультимодальной визуализации височно-нижнечелюстного сустава (ВНЧС). Цель — обобщение и сравнительное обсуждение трёх связанных аспектов: точности захвата движений и регистрации межчелюстных соотношений, прогнозируемости изменения окклюзионной вертикали при полнодуговых реставрациях из стеклокерамики на основе дисиликата лития и диоксида циркония, а также морфофункциональной адаптации мыщелка, диска и суставной ямки в среднесрочном периоде. Материал составили публикации 2017–2025 годов из баз PubMed, Scopus и Springer, посвящённые in vivo точности интраоральных сканеров, валидации виртуальных артикуляторов, ретроспективным когортам пациентов с увеличением высоты прикуса и долговременным наблюдениям после ортопедической реабилитации. Показано, что прецизионность оптических систем для регистрации межчелюстного соотношения сопоставима с традиционным восковым прикусом при условии корректного протокола захвата квадрантов; виртуальные лицевые дуги и кинематические артикуляторы воспроизводят траектории нижней челюсти с расхождением порядка 1,5–2 мм; увеличение высоты прикуса до 5 мм при адекватной диагностической стабилизации не сопровождается стойкими дисфункциональными симптомами, а сустав отвечает ремоделированием с улучшением соотношения мыщелка и ямки. Основное ограничение — гетерогенность протоколов, отсутствие стандартизованного метода передачи кинематики в производственный CAD-модуль.

Ключевые слова: окклюзионная реабилитация, кинематика нижней челюсти, виртуальный артикулятор, цифровая лицевая дуга, CAD/CAM, височно-нижнечелюстной сустав, высота прикуса, дисиликат лития.

Введение

Восстановление утраченной окклюзионной геометрии перестало сводиться к копированию контуров изношенных зубов и подбору высоты по среднестатистическому межальвеолярному расстоянию. На приёме всё чаще встречаются пациенты с многолетней комбинированной патологией прикуса — стираемостью, миграцией зубов после потери опор, деформациями зубных рядов, сопутствующими щелчками или болью в области ВНЧС, — у которых попытка вернуть «исходную» окклюзию заведомо лишена смысла, поскольку ни сами зубы, ни сустав уже не находятся в исходном состоянии. Параметры стандартного полурегулируемого артикулятора в подобных ситуациях остаются грубым приближением к реальной траектории нижней челюсти конкретного человека. Технологическая база за последние десять лет изменилась радикально. Интраоральные сканеры обеспечили цифровой оттиск с приемлемой точностью на полной челюсти [1; 2], программные виртуальные артикуляторы получили возможность импортировать персональные траектории движения [3], появились оптические и ультразвуковые системы регистрации движений нижней челюсти, конкурирующие по точности с механическим аксиографом [4]. Параллельно совершенствовались материалы — монолитные дисиликаты лития и поликристаллические диоксиды циркония, перекрывшие по выживаемости в течение 5–15 лет металлокерамику в большинстве клинических ситуаций [5; 6]. Накопленные ретроспективные данные показали, что повышение высоты прикуса в пределах 4–5 мм при правильной диагностической стабилизации переносится пациентами без стойких функциональных осложнений [7; 8], а магнитно-резонансная томография подтвердила возможность сохранения положения мыщелков при условии чисто ротационного открытия [9].

Эти факты объединяются в одну логику: реставрация прикуса должна планироваться от траектории нижней челюсти и от состояния сустава, а не от усреднённой геометрии. Цифровой протокол CAD/CAM в такой модели — не просто способ фрезерования коронок, а среда переноса индивидуальной кинематики в окклюзионный дизайн. Цель настоящего обзора — систематизировать имеющиеся данные о точности отдельных звеньев цифрового протокола, обсудить последствия изменения вертикальной составляющей прикуса и проследить морфофункциональную реакцию ВНЧС на новую окклюзионную схему.

Материал и методы

Аналитический обзор с элементами сравнительного обобщения. Поиск выполнен в базах PubMed, Scopus, Web of Science и Springer Link за период с 2017 по октябрь 2025 года по комбинациям ключевых слов: «virtual articulator», «digital facebow», «jaw motion tracking», «interocclusal registration accuracy», «vertical dimension of occlusion», «lithium disilicate full mouth rehabilitation», «monolithic zirconia survival», «TMJ adaptation prosthetic rehabilitation», «condylar position MRI». В первичной выборке оказались 142 публикации, после применения критериев релевантности (наличие количественных данных in vivo либо in vitro с переносом на клинику, минимум одногодичный период наблюдения для клинических работ, чёткая методология) отобрано 38 источников; в основу обсуждения положены 15 опорных. Структура анализа включает три блока: точность цифровой регистрации и кинематика; ортопедическая нагрузка на сустав при изменении высоты прикуса; морфологическая адаптация компонентов ВНЧС в среднесрочном наблюдении.

Результаты

Точность цифрового цикла: от оптического оттиска до виртуального артикулятора

Полный цифровой протокол окклюзионной реабилитации формально состоит из шести звеньев: интраоральное сканирование обеих челюстей, регистрация межчелюстного соотношения, передача положения верхней челюсти относительно черепа (виртуальная лицевая дуга), запись индивидуальных движений нижней челюсти, виртуальная артикуляция и фрезерование. Слабым местом долгое время оставался последний километр — перенос пациентских траекторий в проектную среду. На сегодняшний день эта проблема решена не полностью, но точечные звенья достигли клинически удовлетворительных показателей. В исследовании in vivo на десяти участниках показано, что современные интраоральные сканеры воспроизводят полнодуговую геометрию с истинностью и прецизионностью, существенно зависящими от модели аппарата: при увеличенной вертикали окклюзии лучшие показатели продемонстрировали системы i900 и TRIOS 5, тогда как iTero Lumina оказалась наименее точной из шести протестированных сканеров [1]. Различие между сканерами становится клинически заметным именно в нестандартных межчелюстных положениях, где отсутствует стабильная межбугорковая опора, а программное наложение основано на минимальной площади контакта.

Точность регистрации межчелюстного соотношения цифровым способом сопоставима с конвенциональной восковой регистрацией при условии корректного протокола: квадрантный буккальный скан в положении максимального межбугоркового смыкания обеспечивает сопоставимый разброс отклонений, тогда как полнодуговой буккальный скан приводит к артефакту наклона модели в сторону выполненной регистрации [2]. Это контринтуитивный момент: при работе с обширными

реставрациями клиницист стремится к максимально полному скану, но в задаче регистрации прикуса лучше работает локальный референс. Виртуальная лицевая дуга стала самостоятельной альтернативой механической. В обзоре методов цифровой передачи положения верхней челюсти в виртуальный артикулятор показано, что для этой задачи могут применяться цифровые фотографии с калибровочными маркерами, лицевые сканеры, конусно-лучевая компьютерная томография (КЛКТ) и оптические системы трекинга — каждый со своими ограничениями по точности [10]. Подход на основе данных КЛКТ позволяет полностью отказаться от физической лицевой дуги: франкфуртская плоскость задаётся анатомически, а движения нижней челюсти, наложенные на цифровую модель черепа, обеспечивают персональную кинематику виртуального артикулятора с расхождением траектории около 1,7 мм по метрике Фреше [3].

Сравнение ультразвуковой системы захвата движений с электронным аксиографом показало, что величина угла Беннетта различается между двумя устройствами в силу различной локализации референсной точки: механическая лицевая дуга позиционируется по эмпирической шарнирной оси, тогда как ультразвуковая система определяет кинематический центр мыщелка — расстояние между этими точками у бессимптомных пациентов составляет в среднем 4,96 мм [4]. При калибровке обеих систем относительно франкфуртской горизонтали сагиттальный мыщелковый наклон, напротив, измеряется обоими методами без статистически значимых отличий, что делает выбор аппарата задачей клинической эргономики, а не точности.

В табл. 1 систематизированы основные звенья цифрового протокола и их типичные погрешности на текущем уровне технологий.

Окклюзионная вертикаль и реакция жевательного аппарата

Вопрос об увеличении высоты прикуса исторически был окружён большим количеством опасений, чем подтверждённых рисков. Многоцентровое ретроспективное исследование на 100 пациентах с фиксированными полнодуговыми реставрациями показало, что увеличение окклюзионной вертикали в пределах до 5 мм при наличии адекватной диагностической стабилизации (мокап, временные коронки, съёмная капа) не сопровождается стойкими функциональными осложнениями; единичные кратковременные жалобы исчезали в среднем в течение двух недель и чаще встречались при полностью имплантационной поддержке боковых сегментов [7]. В обзоре концепций высоты прикуса делается схожий вывод: организм располагает диапазоном комфорта, а не единственно правильным значением, и адаптационные механизмы периодонта, альвеолы

Таблица 1.

Звенья цифрового протокола окклюзионной реабилитации и их характерные погрешности

Звено протокола	Характерная инструментальная погрешность	Клинически значимые ограничения
Интраоральное сканирование полной дуги	30–80 мкм истинности; зависит от модели сканера и стратегии захвата	Снижение точности при увеличенной вертикали и протяжённых беззубых участках
Цифровая регистрация межчелюстного соотношения	Сопоставима с восковой регистрацией при квадрантном протоколе	Ошибка наклона при полнодуговом буккальном скане
Виртуальная лицевая дуга на основе КЛКТ	Расхождение траектории ≈ 1,5–2 мм	Дополнительная лучевая нагрузка
Запись траектории нижней челюсти (оптическая, ультразвуковая)	Прецизионность 100–200 мкм для исследовательских систем	Артефакты от мягких тканей, требуется жёсткое крепление трекера
Виртуальный артикулятор	Воспроизведение пациентских траекторий с погрешностью до 1°	Отсутствие универсального стандарта импорта кинематических данных
Фрезерование монолитной керамики	Краевой зазор 30–80 мкм для дисиликата лития	Зависимость от системы CAD-CAM и параметров спекания

и сустава поглощают изменения в пределах нескольких миллиметров [8].

Кинематический протокол позволяет уточнить эту концепцию количественно. Открытие прикуса, выполненное в пределах чисто ротационного движения мыщелка вокруг межмыщелковой оси, не вызывает смещения суставных головок и сохраняет соотношение «мыщелок — диск — ямка». В клиническом протоколе с предоперационной и контрольной МРТ ВНЧС подтверждено, что увеличение вертикали по ротационной траектории сопровождается стабильным положением мыщелков в верхне-передних отделах ямки, что считается оптимальным для функциональной нагрузки [9]. Принципиально важно то, что МРТ позволяет объективизировать центральное соотношение, ранее определявшееся преимущественно мануально и на основании ощущений пациента.

Цифровой артикулятор, выполняющий тонкую настройку открытия в пределах диапазона центрального соотношения, технически дополняет этот подход: внутри программной среды раскрытие прикуса оптимизируется по объёму пространства для реставрации и по

соотношению передних зубов, а не подбирается на гипсовой модели [11]. В цикле контроля обязательным звеном остаётся клиническая фаза временных реставраций, в которой пациент адаптируется к новой высоте перед окончательным фрезерованием.

В материалах ортопедической части цикла современный стандарт почти полностью сместился к монолитным керамикам. Систематические данные по выживаемости коронок показывают сопоставимые показатели для монолитных реставраций из дисиликата лития и диоксида циркония при опоре на зубы — около 1 % отказов на горизонте до 5 лет с минимальной разницей между материалами [5]. На горизонте 15 лет одиночные коронки из дисиликата лития, выполненные по чейрсайд-протоколу, продемонстрировали кумулятивную выживаемость 80,1 % при 64,2 % успешности по строгим критериям USPHS — приемлемый результат для аддитивной адгезивной концепции с длительным сроком службы [6]. В пятилетнем сравнении когорт на 200 пациентах диоксид циркония показал тенденцию к меньшему числу технических осложнений в задних сегментах и при имплантационной поддержке, тогда как дисиликат лития сохранил преимущество по эстетической интеграции в переднем отделе [12]. Эти данные позволяют дифференцировать выбор материала по локализации, а не противопоставлять их как конкурирующие.

Адаптация компонентов ВНЧС: морфометрия и функция

Реакция височно-нижнечелюстного сустава на новую окклюзионную схему — наиболее тонкий и наименее предсказуемый аспект протокола. В литературе сосуществуют две точки зрения: одна предполагает первичную роль окклюзионных факторов в патогенезе дисфункций, другая трактует сустав как самостоятельную мишень, лишь косвенно реагирующую на изменения прикуса. Реальная картина, по-видимому, ближе ко второй модели с уточнением: сустав адаптируется охотно, если новая окклюзия не выводит мыщелок из физиологически приемлемой зоны. В ретроспективном наблюдении пациентки с двусторонним остеоартрозом ВНЧС и дистальным смещением мыщелков на сроке двадцать лет после ортодонто-ортопедической реабилитации с увеличением задней вертикали авторы зафиксировали ротационное репозиционирование мыщелков с увеличением суставной щели в верхнем и переднем отделах, а также положительное ремоделирование костной ткани — то есть улучшение, а не ухудшение исходного состояния [13]. Этот случай иллюстрирует адаптивный потенциал сустава при условии устранения избыточной нагрузки.

В когорте из двенадцати пациентов с одномоментной имплантацией и немедленной нагрузкой полнодуговыми протезами показано, что КЛКТ-морфометрия суставной щели и положения мыщелка после реабилитации оставалась в пределах исходных значений у пациентов без предсуществующих симптомов ВНЧС [14]. Авторы интерпретируют это как сохранение нейромышечной памяти о привычной окклюзии: при бережной передаче имеющегося соотношения через временные реставрации мыщелок не покидает свою рабочую позицию.

Полнодуговой цифровой протокол с интеграцией трекинга движений нижней челюсти, КЛКТ и оптического сканирования у пациентов с дисфункциями ВНЧС позволил сократить среднее время кресельной коррекции окончательных реставраций до 9,42 минут против ~16 минут в предыдущих исследованиях, при количестве правок менее трёх за случай и без значимых изменений электромиографических паттернов [15]. В такой постановке цифровой протокол даёт не столько лечебный эффект для самого сустава, сколько снижает ятрогенную нагрузку на этап адаптации.

В табл. 2 обобщены морфометрические показатели, рекомендуемые для клинического мониторинга ВНЧС в цикле полнодуговой реабилитации.

Таблица 2.

Параметры мониторинга ВНЧС при цифровой окклюзионной реабилитации

Параметр	Метод оценки	Клиническая интерпретация
Передне-заднее положение мыщелка	МРТ Т1, КЛКТ сагиттальный срез	Сохранение центрированного или верхне-переднего положения после реабилитации — благоприятный признак
Верхняя суставная щель	КЛКТ, МРТ	Расширение в пределах 0,3–0,8 мм допустимо при ротационном открытии
Положение диска относительно мыщелка	МРТ в максимальном межбугорковом смыкании и при открытии	Восстановление соотношения «12 часов» в покое — целевое; редукция диска при открытии — приемлемое
Морфология мыщелка (контур, кортикальные изменения)	КЛКТ, серийное наблюдение через 6–12 мес	Округление вершины и восстановление кортикала — признаки положительного ремоделирования
Электромиография жевательных и височных мышц	Поверхностная ЭМГ	Симметризация активности и снижение фоновой активности в покое
Субъективная симптоматика	DC/TMD, ВАШ боли	Устранение или снижение боли и щелчков на сроке 1–6 мес после фиксации окончательных реставраций

Отдельный практический вывод касается критериев включения МРТ в стандартный диагностический пакет. Рутинное назначение МРТ ВНЧС всем пациентам с планируемой полнодуговой реабилитацией нецелесообразно ни клинически, ни экономически; однако наличие болезненности при пальпации, щелчков, ограничения открывания или планируемое увеличение вертикали более 3–4 мм являются обоснованными показаниями. Дополнительная МРТ с временной капой в межчелюстном положении новой высоты прикуса даёт объективное подтверждение сохранности соотношения «мыщелок — диск — ямка», прежде чем будут выполнены окончательные реставрации [9].

Интеграция: что меняет кинематический подход в клинической логике

Если вернуться от частных результатов к концепции, кинематический подход к реставрации прикуса перестраивает причинно-следственную цепочку планирования. В традиционной логике врач определял желаемую эстетику и функцию, а сустав «подстраивался» под решение клинициста; в кинематической логике именно траектории нижней челюсти и текущее состояние ВНЧС задают допустимую область решений, внутри которой подбирается высота прикуса, передняя и боковая направляющие и материал реставраций. Цифровой протокол CAD/CAM в этой связке выполняет функцию переводчика между биологическими данными и производственным процессом.

Возможность синтеза перегруппировывает и приоритеты в материаловедении. Решение о выборе между дисиликатом лития и диоксидом циркония перестаёт быть универсальным и становится локальным: в переднем сегменте, где значимы оптические свойства, прозрачность ЛДС обеспечивает естественную интеграцию [5]; в боковых сегментах с максимальной нагрузкой и риском бруксизма приоритет получает монолитный циркон со стабильно высокими показателями выживаемости в задних участках [12]. Важной деталью становится правильная полировка окклюзионных поверхностей: глазурование монолитной керамики в боковых сегментах ускоряет износ как реставрации, так и антагонистов, и в идеале остаётся только эстетической мерой для переднего сегмента. Кинематический подход также даёт практическую схему страхования рисков. Перед окончательной фиксацией пациент обязательно проходит фазу временных реставраций или мокапа, в течение которой проверяется субъективное и объективное (ЭМГ, при необходимости — МРТ) принятие новой окклюзии. Цифровой архив случая — STL-файлы, КЛКТ, записи кинематики — сохраняется для последующего сопоставления и при необходимости позволяет вернуться к промежуточным состояниям без повторной диагностики.

Заключение

Кинематический подход к реставрации прикуса, опирающийся на цифровой протокол CAD/CAM и оценку адаптации тканей ВНЧС, на сегодняшний день представляет собой не отдельную методику, а рамку, в которой связываются точная регистрация межчелюстных соотношений, индивидуальные траектории движения нижней челюсти, контролируемое изменение высоты прикуса и последующая морфофункциональная реакция сустава. Точность отдельных звеньев цифрового цикла достигла уровня, при котором ограничивающим фактором становится не аппаратура, а отсутствие универсального стандарта переноса пациентских траекторий в проектную среду виртуального артикулятора. Увеличение вертикали в пределах 4–5 мм при условии диагностической стабилизации и контроля положения мыщелка по визуализационным методам не приводит к стойкой дисфункции и в ряде случаев сопровождается положительным ремоделированием суставных структур.

Из этого следует ряд практических ориентиров. Первый — обязательное использование временных реставраций в качестве функционального теста новой окклюзии, продолжительность которого рассчитывается не по календарному графику, а по скорости адаптации конкретного пациента. Второй — выбор реставрационных материалов исходя из функциональной зоны (дисиликат лития в эстетической области, монолитный диоксид циркония — в зоне основной нагрузки) с отказом от глазурования окклюзионных поверхностей в боковых сегментах. Третий — селективное применение МРТ ВНЧС при увеличении высоты более 3–4 мм или при наличии исходной симптоматики, чтобы избежать рутинных и недостаточно обоснованных назначений. Четвёртый — цифровой архив случая как обязательный компонент протокола, обеспечивающий преемственность данных и возможность ретроспективного контроля.

Перспективные направления исследований включают разработку открытых форматов обмена кинематическими данными между системами трекинга и CAD-модулями, прецизионные клинические исследования по протоколам реабилитации с обязательной парной МРТ до и после, а также накопление достаточно длинных когорт для сравнения долгосрочной выживаемости реставраций при кинематическом и стандартном протоколах планирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Revilla-León M., Pérez-Barquero J.A., Barmak A.B. et al. Full arch accuracy of intraoral scanners with different acquisition technologies: An in vivo study // The Journal of Prosthetic Dentistry. — 2025. — Article in press. — DOI: 10.1016/j.prosdent.2025.03.002.
2. Morsy N., El Kateb M. In vivo precision of digital static interocclusal registration for full arch and quadrant arch scans: a randomized controlled clinical trial // BMC Oral Health. — 2022. — Vol. 22, No. 1. — Art. 559. — DOI: 10.1186/s12903-022-02612-5.
3. Cheng C.H., Chien J.H., Hsu J.T., Tsai M.T. Virtual dental articulation using computed tomography data and motion tracking // Bioengineering. — 2023. — Vol. 10, No. 11. — Art. 1248. — DOI: 10.3390/bioengineering10111248.
4. Wang Y., Chen J., Yang J., Liao Y., Lin Y., Yu H. Comparison of the accuracy of an ultrasonic-based jaw tracking device with conventional electronic tracking device // Journal of Prosthodontic Research. — 2025. — Vol. 69, No. 2. — P. 230–238. — DOI: 10.2186/jpr.JPR_D_24_00080.
5. Zarone F., Di Mauro M.I., Ausiello P., Ruggiero G., Sorrentino R. Current status on lithium disilicate and zirconia: a narrative review // BMC Oral Health. — 2019. — Vol. 19, No. 1. — Art. 134. — DOI: 10.1186/s12903-019-0838-x.
6. Rauch A., Reich S., Dalchau L., Schierz O. Long-term survival of monolithic tooth-supported lithium disilicate crowns fabricated using a chairside approach: 15-year results // Clinical Oral Investigations. — 2023. — Vol. 27, No. 7. — P. 4053–4060. — DOI: 10.1007/s00784-023-05031-0.
7. Fabbri G., Sorrentino R., Cannistraro G., Mintrone F., Bacherini L., Turrini R., Bombardelli T., Nieri M., Fradeani M. Increasing the vertical dimension of occlusion: a multicenter retrospective clinical comparative study on 100 patients with fixed tooth-supported, mixed, and implant-supported full-arch rehabilitations // The International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry. — 2018. — Vol. 38, No. 3. — P. 323–335. — DOI: 10.11607/prd.3295.
8. Yadfout A., El Aoud J., Merzouk N., Slaoui Hasnaoui J. Increasing vertical dimension of occlusion (VDO): review // Clinical, Cosmetic and Investigational Dentistry. — 2024. — Vol. 16. — P. 131–142. — DOI: 10.2147/CCID.S458443.
9. Goracci C., Ferrari M. Safe clinical technique for increasing the occlusal vertical dimension in case of erosive wear and missing teeth // Clinical Case Reports. — 2021. — Vol. 9, No. 12. — Art. e05182. — DOI: 10.1002/ccr3.5182.
10. Revilla-León M., Zeitler J. M., Barmak A. B., Kois J. C. An overview of the different digital facebow methods for transferring the maxillary cast into the virtual articulator // Journal of Esthetic and Restorative Dentistry. — 2024. — Vol. 36, No. 9. — P. 1190–1201. — DOI: 10.1111/jerd.13266.
11. Stanley M., Paz A.G., Miguel I., Coachman C. Fully digital workflow, integrating dental scan, smile design and CAD-CAM: case report // BMC Oral Health. — 2018. — Vol. 18, No. 1. — Art. 134. — DOI: 10.1186/s12903-018-0597-0.
12. Avetisyan A., Markaryan M., Rokaya D., Tovani-Palone M.R., Zafar M.S., Khurshid Z., Vardanyan A., Heboyan A. Comparison of long-term clinical outcomes of zirconia and lithium disilicate prostheses: a retrospective cohort study // Biomimetics. — 2025. — Vol. 10, No. 11. — Art. 740. — DOI: 10.3390/biomimetics10110740.
13. Lo Russo L., Salamini A. Condylar reshaping in a TMD patient after ortho-prosthetic treatment: a 20-year follow-up case report // Journal of Clinical and Experimental Dentistry. — 2022. — Vol. 14, No. 2. — P. e191–e196. — DOI: 10.4317/jced.59104.
14. Lin Y., Pan Y., Wang Y., Mao R., Zhao L., Yan F. A CBCT study of changes in temporomandibular joint morphology with immediate implant placement and immediate loaded full-arch fixed dental prostheses // BMC Oral Health. — 2024. — Vol. 24, No. 1. — Art. 1379. — DOI: 10.1186/s12903-024-05187-5.
15. Cicciù M., Cervino G., Terranova A., Risitano G., Raffaele M., Cucinotta F., Salmeri F., Fiorillo L. Assessment of fully digitalized workflow for implant-prosthetic rehabilitation in temporomandibular disorders patients: a clinical study // The Saudi Dental Journal. — 2023. — Vol. 35, No. 5. — P. 488–495. — DOI: 10.1016/j.sdentj.2023.05.013.

© Рощин Евгений Михайлович (Evgenii-r.st@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.30

КРАТКОСРОЧНЫЕ И ДОЛГОСРОЧНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ГЕСТАЦИОННОГО САХАРНОГО ДИАБЕТА ДЛЯ МАТЕРИ

SHORT- AND LONG-TERM EFFECTS OF GESTATIONAL DIABETES ON THE MOTHER

A. Sizov

Summary. Gestational diabetes mellitus is one of the most common metabolic disorders of the gestation period, but its consequences are not limited to the time of pregnancy and have an impact on a woman's health in subsequent years. The presented article analyzes the short- and long-term effects of gestational diabetes mellitus on the mother. The results demonstrate that in the short term, gestational diabetes mellitus is associated with an increased risk of hypertensive disorders, preeclampsia, and surgical delivery. In the long term, women with gestational diabetes have an increased risk of developing type 2 diabetes, cardiovascular disease, metabolic syndrome, and chronic kidney disease. The factors determining the progression of metabolic disorders have been identified and systematized. Critical time points have been identified when the risk of complications is highest. As an author's development, a methodology for monitoring and preventing the effects of gestational diabetes mellitus on the mother is proposed, including early detection, structured lifestyle interventions and long-term follow-up. The author concludes that it is necessary to introduce lifelong monitoring programs for women with gestational diabetes mellitus.

Keywords: gestational diabetes mellitus, short-term consequences, long-term consequences, type 2 diabetes mellitus, cardiovascular diseases, postpartum follow-up, prevention.

Сизов Алексей Викторович
Кандидат медицинских наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный
педиатрический медицинский университет
avsizov@inbox.ru

Аннотация. Гестационный сахарный диабет представляет собой одно из наиболее частых метаболических нарушений периода гестации, однако его последствия не ограничиваются периодом беременности и оказывают влияние на здоровье женщины в последующие годы. В представленной статье проведён анализ краткосрочных и долгосрочных последствий гестационного сахарного диабета для матери. Результаты демонстрируют, что в краткосрочной перспективе гестационный сахарный диабет связан с повышенным риском гипертензивных расстройств, преэклампсии и оперативного родоразрешения. В долгосрочной перспективе женщины с перенесённым гестационным сахарным диабетом имеют повышенный риск развития сахарного диабета 2 типа, сердечно-сосудистых заболеваний, метаболического синдрома и хронической болезни почек. В работе были также выявлены и систематизированы факторы, определяющие прогрессирование метаболических нарушений. Установлены критические временные точки, когда риск развития осложнений наиболее высок. В качестве авторской разработки предложена методика мониторинга и профилактики последствий гестационного сахарного диабета для матери, включающая раннее выявление, структурированные интервенции образа жизни и долгосрочное наблюдение. Автор приходит к выводу о необходимости внедрения программ пожизненного наблюдения за женщинами с перенесённым гестационным сахарным диабетом.

Ключевые слова: гестационный сахарный диабет, краткосрочные последствия, долгосрочные последствия, сахарный диабет 2 типа, сердечно-сосудистые заболевания, послеродовое наблюдение, профилактика.

Введение

Гестационный сахарный диабет (ГСД) традиционно рассматривается в клинической практике как временное состояние, разрешающееся после родоразрешения. Однако накопленные за последние десятилетия научные данные свидетельствуют об обратном: ГСД определяет здоровье женщины на последующие годы. Актуальность изучения краткосрочных и долгосрочных последствий ГСД обусловлена неуклонным ростом распространённости данной патологии, достигающей 14 % в мире и до 25 % в отдельных странах, а также эпидемией ожирения и увеличения возраста первородящих [3].

Целью настоящей статьи является анализ краткосрочных и долгосрочных последствий гестационного сахарного диабета для материнского организма, а также выявление факторов, определяющих прогрессирование метаболических нарушений. Новизна исследования заключается в разработке авторской методики мониторинга и профилактики, учитывающей индивидуальные факторы риска и критические временные точки, когда вероятность развития осложнений наиболее высока. В отличие от существующих разрозненных рекомендаций, предлагаемый подход интегрирует данные о краткосрочных и долгосрочных рисках в единую систему ведения женщины на протяжении всей жизни после ГСД-беременности.

Материалы и методы исследования

Материалами исследования выступали научные статьи отечественных и зарубежных авторов, представля-

ющие оригинальные исследования (проспективные когортные, рандомизированные клинические испытания, мета-анализы) и систематические обзоры, посвящённые краткосрочным и долгосрочным исходам у женщин с ГСД. Методы исследования: описание, сопоставление, анализ, сравнение, систематизация, классификация.

Результаты и обсуждения

ГСД оказывает существенное влияние на течение беременности, родов и ранний послеродовой период [2]. Обзор источников позволил выявить следующие результаты клинических исследований, отражающие краткосрочные и долгосрочные последствия ГСД у беременных.

Согласно результатам мета-анализа, включавшего данные более 16 тыс. беременностей, риск преэклампсии у женщин с ГСД повышен в 1,65 раза по сравнению с женщинами без нарушений углеводного обмена, а риск гестационной гипертензии — в 1,93 раза [8]. Данное исследование показывает, что женщины с ГСД имеют значительно более высокий риск развития гипертензивных расстройств, включая гестационную гипертензию и преэклампсию. Эти нарушения обусловлены общими патогенетическими механизмами, включающими эндотелиальную дисфункцию, системное воспаление и прогрессирующую инсулинорезистентность, которые лежат в основе гипергликемии и сосудистых осложнений.

Оперативное родоразрешение путём кесарева сечения также значительно чаще встречается у женщин с ГСД, как показало указанное выше исследование. Относительный риск кесарева сечения у женщин с ГСД составляет 1,14 (95 % доверительный интервал 1,01–1,29) по сравнению с женщинами без диабета [8]. Частота преждевременных родов также повышена, как показало исследование Grantz K.L.: женщины с ГСД имеют в 2,06 раза более высокий риск родоразрешения до 37 недель гестации по сравнению с контрольной группой [6]. Указанные осложнения не только ухудшают материнские исходы в момент родов, но и увеличивают продолжительность госпитализации, частоту послеродовых инфекционных осложнений и замедляют восстановление после родов. Авторы подчеркивают, что даже пограничные формы гипергликемии, не достигающие диагностических критериев ГСД, связаны с повышенным риском неблагоприятных исходов.

Что касается долгосрочных последствий ГСД для матери, то наиболее изученным и клинически значимым из них является прогрессирование в сахарный диабет 2 типа (СД2). Это подтверждается данными клинических исследований [4]:

— женщины с перенесённым ГСД имеют 12 % ежегодный риск развития СД2, в течение 15 лет после родов диабет развивается у одной трети из них;
— риск СД2 у женщин с ГСД в 7–10 раз выше по сравнению с женщинами с нормогликемической беременностью.

Другим клиническим наблюдением является то, что ранняя диагностика и лечение ГСД не всегда обеспечивают долгосрочную защиту от СД2. Мета-анализ, проведенный García-Patterson A., Balsells M., Solà I., Corcoy R., показал, что выявление и лечение ГСД на ранних сроках (до 20 недель) не даёт однозначных преимуществ в отношении отдалённых исходов, а качество доказательств в этой области оценивается как низкое или очень низкое [5]. Это означает, что послеродовое наблюдение и профилактические вмешательства имеют критическое значение независимо от того, насколько успешно был скомпенсирован ГСД во время беременности.

Wei L., Jiang Y., Gao P., Zhang J., Zhou X., Zhu Sh., Chen Y., Zhang H., Du Y. провели анализ, включавший 15 когортных исследований с общим числом участниц более 7,5 миллионов. Авторы подтвердили повышенный риск и идентифицировали критические временные точки его нарастания. Было установлено, что в течение первых пяти лет после родов женщины с ГСД имеют на 19 % более высокий риск развития ССЗ по сравнению с женщинами без ГСД в анамнезе. К десятому году этот показатель возрастает до 78 %. В отдалённой перспективе (до 25 лет) риск остаётся стабильно повышенным — на 26–31 % выше по сравнению с контрольной группой [10]. Механизмы, связывающие ГСД с сердечно-сосудистой патологией, включают персистирующую эндотелиальную дисфункцию, хроническое субклиническое воспаление, ускоренное развитие атеросклероза и раннее возникновение артериальной гипертензии. Женщины с ГСД имеют повышенный риск не только ишемической болезни сердца, но и цереброваскулярных событий, включая ишемический инсульт [10].

Помимо СД2 и ССЗ, ГСД ассоциирован с повышенным риском развития метаболического синдрома, неалкогольной жировой болезни печени и хронической болезни почек. Кроме того, у женщин с ГСД чаще выявляются дислипидемия (повышение уровня триглицеридов и липопротеинов низкой плотности при снижении липопротеинов высокой плотности) и абдоминальное ожирение, которые являются независимыми факторами сердечно-сосудистого риска. Это подтверждается Luo Q.-J., Ni Q., которые выявили, что женщины с перенесённым ГСД имеют в 2–3 раза более высокую вероятность развития метаболического синдрома в течение 5–10 лет после родов [7].

Важно подчеркнуть, что риск развития указанных состояний не является неизбежным. Результаты исследования Rawal A., Maindal H.T., Dahl-Petersen I.K., Jensen D.M., Damm P., Ovesen P., Vinter C.A., Mathiesen E.R., Kampmann U., Christensen D.L., Nielsen K.K. показали [9]:

— до 66 % женщин модифицируют свои пищевые привычки в первый год после родов, однако улучшение и ухудшение диетического качества наблюдаются с равной частотой;
— женщины с исходным индексом массы тела 30 кг/м^2 и выше имели в 3,29 раза более высокие шансы на улучшение диеты по сравнению с женщинами с нормальной массой тела;
— полностью кормящие грудью женщины имели более низкие шансы на улучшение диетического качества (отношение шансов 0,39), что может быть связано с повышенными энергетическими потребностями и специфическими пищевыми предпочтениями в период лактации.

Представленные данные показывают гетерогенность послеродовых поведенческих паттернов и необходимость персональных вмешательств.

Анализ литературы позволил выделить факторы, определяющие, у каких женщин с ГСД разовьются отдалённые метаболические осложнения, а у каких — нет (рис. 1).

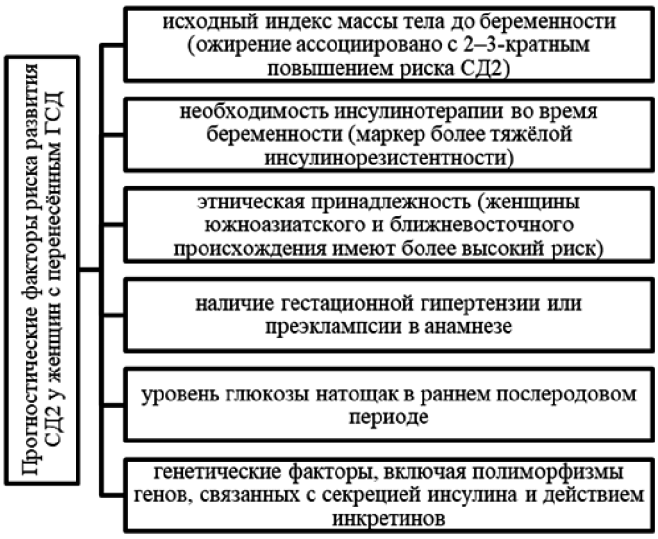


Рис. 1. Прогностические факторы риска развития СД2 у женщин с перенесённым ГСД

Источник: составлено автором

Оценка перечисленных факторов позволяет:
— стратифицировать женщин по степени риска развития сахарного диабета 2 типа;
— определить индивидуальную частоту скрининга (от 6 месяцев до 1 года);
— персонализировать профилактические вмешательства (интенсивность модификации образа жизни);
— выделить группы наибольшего риска для приоритетного наблюдения.

По результатам проведенного исследования была разработана методика мониторинга и профилактики в рамках ведения женщин с перенесённым гестационным сахарным диабетом (рис. 2).

На втором этапе важно обратить внимание на мотивационное консультирование, учитывающее тот фактор, что женщины, которые воспринимали свою диету как нездоровую, имели в 3,84 раза более высокие шансы на улучшение, тогда как женщины с низкой самооценкой своих пищевых привычек требовали дополнительной поддержки [9]. На третьем этапе следует особое внимание уделить 5–10-летнему периоду после родов, который является критическим в отношении риска сердечно-сосудистых заболеваний [10].

Предлагаемая методика учитывает не только медицинские, но и психосоциальные аспекты. Женщины с ГСД имеют более высокий уровень тревожности и депрессивности в послеродовом периоде, что может снижать приверженность профилактическим мероприятиям [2]. Поэтому в методику включены элементы психологической поддержки и скрининга психических расстройств на каждом этапе наблюдения. Кроме того, методика предполагает активное использование цифровых технологий (мобильные приложения для отслеживания питания и физической активности, телемедицинские консультации), которые повышают доступность и персонализацию профилактических вмешательств.

Выводы

Проведён анализ краткосрочных и долгосрочных последствий гестационного сахарного диабета для матери. Результаты демонстрируют, что в краткосрочной перспективе гестационный сахарный диабет связан с повышенным риском гипертензивных расстройств, преэклампсии и оперативного родоразрешения. В долгосрочной перспективе женщины с перенесённым гестационным сахарным диабетом имеют повышенный риск развития сахарного диабета 2 типа, сердечно-сосудистых заболеваний, метаболического синдрома и хронической болезни почек. В работе были также выявлены и систематизированы факторы, определяющие прогрессирование метаболических нарушений. Установлены критические временные точки, когда риск развития осложнений наиболее высок. В качестве авторской разработки предложена методика мониторинга и профилактики последствий гестационного сахарного диабета для матери. Она охватывает ранний послеродовой период (6–12 недель), первый год после родов и долгосрочное наблюдение (до 10 лет и более), учитывает индивидуальные факторы риска, критические временные точки (особенно первое десятилетие после родов), психосоциальные аспекты и возможности цифровых технологий. Внедрение предлагаемой методики в клиническую

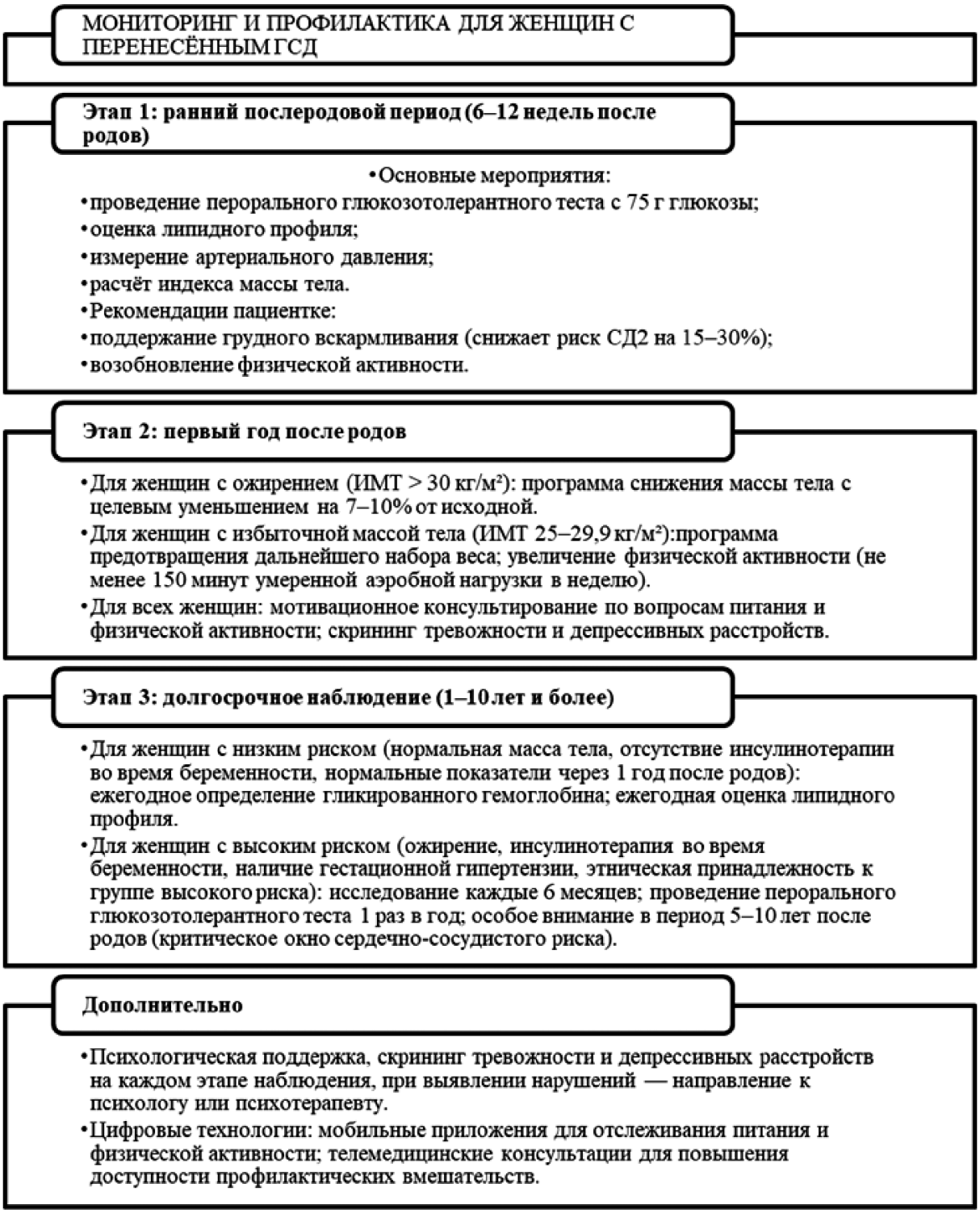


Рис. 2. Методика ступенчатого мониторинга и профилактики в рамках ведения женщин с перенесённым гестационным сахарным диабетом

Источник: составлено автором

практику позволит не только снизить риск развития сахарного диабета 2 типа и сердечно-сосудистых заболеваний у женщин с перенесённым ГСД, но и обеспечить более эффективное использование ресурсов системы здравоохранения за счёт стратификации пациенток по степени риска и персонализации профилактических вмешательств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блох Р.А., Блох М.Е., Мухамедрахимов Р.Ж. Психологические и клинические особенности беременности, родов и послеродового периода у женщин с гестационным сахарным диабетом // Национальный психологический журнал. — 2026. — Т. 21. — № 1. — С. 19–29. — DOI: 10.11621/npj.2026.0102.
2. Куценко А.А., Васильева А.Г., Мелых Д.Р., Белокоровий Е.В., Попова И.С., Бирулина Ю.Г., Юрьев С.Ю., Франкевич В.Е. Поиск новых биомаркеров для создания технологий в прогнозировании перинатального исхода беременности, осложненной гестационным диабетом // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. — 2025. — Т. 24, № 11. — С. 16–25. — DOI 10.15829/1728–8800-2025-4454.
3. American Diabetes Association. Classification and diagnosis of diabetes: Standards of medical care in diabetes–2021 // Diabetes Care. — 2021. — Vol. 44. — Suppl. 1. — pp. S15–S33. — DOI: 10.2337/dc21-S002.
4. Dennison R.A., Chen E.S., Green M.E., et al. The absolute and relative risk of type 2 diabetes after gestational diabetes: a systematic review and meta-analysis of 129 studies // Diabetes Research and Clinical Practice. — 2021. — Vol. 171. — pp 108625. — DOI: 10.1016/j.diabres.2020.108625.
5. García-Patterson A., Balsells M., Solà I., Corcoy R. Detection, and treatment of early gestational diabetes mellitus: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials // American Journal of Obstetrics and Gynecology. — 2025. — Vol. 233. — № 5. — pp. 380–395. — DOI: 10.1016/j.ajog.2025.04.059.
6. Grantz K.L., et al. Maternal, Obstetric and Perinatal Outcomes in Late Preterm and Term Births with Gestational Diabetes Versus Normoglycemia // American Journal of Perinatology. — 2026. — №3. — URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/41791420/. DOI: 10.1055/a-2827-9690.
7. Luo Q.J., Ni Q. Life-course management of gestational diabetes mellitus: A narrative review // World J Clin Cases. — 2025. — №13(29). — pp. 111096. doi: 10.12998/wjcc. v13.i29.111096.
8. Pal A., Rawat D., Sadananda S., Goyal A., Haldar P., Garg D., Gupta Y., Tandon N. Pregnancy and postpartum cardiometabolic outcomes among women with overt diabetes compared to women with normoglycaemia, gestational diabetes and pre-existing diabetes: A systematic review and meta-analysis // Diabetes, Obesity and Metabolism. — 2025. — Vol. 27. — № 7. — pp. 3747–3756. — DOI: 10.1111/dom.16400.
9. Rawal A., Maindal H.T., Dahl-Petersen I.K., Jensen D.M., Damm P., Ovesen P., Vinter C.A., Mathiesen E.R., Kampmann U., Christensen D.L., Nielsen K.K. Dietary Changes and Their Predictors in the First Year After Childbirth in Women with Gestational Diabetes Mellitus: A Post Hoc Longitudinal Analysis from the Face-it Trial // The Journal of Nutrition. — 2025. — Vol. 155. — № 12. — pp. 4380–4389. — DOI: 10.1016/j.tjnut.2025.10.015.
10. Wei L., Jiang Y., Gao P., Zhang J., Zhou X., Zhu Sh., Chen Y., Zhang H., Du Y. Role of melatonin receptor 1B gene polymorphism and its effect on the regulation of glucose transport in gestational diabetes mellitus // Journal of Zhejiang university-science B. — 2023. — №24(1). — pp. 78–88.

© Сизов Алексей Викторович (avsizov@inbox.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.08.48

МАЛОИНВАЗИВНЫЙ СПОСОБ ЛЕЧЕНИЯ МИОМЫ МАТКИ С ПОМОЩЬЮ РАДИОЧАСТОТНОЙ АБЛЯЦИИ ПОД УЛЬТРАЗВУКОВЫМ КОНТРОЛЕМ

A MINIMALLY INVASIVE METHOD FOR TREATING UTERINE FIBROIDS USING ULTRASOUND-GUIDED RADIOFREQUENCY ABLATION

Z. Yumtarova

Summary. The relevance of this study is due to the high prevalence of uterine fibroids among women of reproductive age (20–60 % of cases), as well as the need to find effective and minimally invasive treatment methods. The Russian Federation ranks second in the world for uterine fibroid incidence, making the development of new treatment approaches particularly relevant.

The aim of the study was to evaluate the efficacy and safety of a minimally invasive treatment for uterine fibroids using ultrasound-guided radiofrequency ablation.

The study included the examination and treatment of 19 patients with confirmed uterine fibroids. The average age of the participants was 45 ± 8 years. The study was conducted using a modern radiofrequency generator and real-time ultrasound guidance. The results of the study demonstrated the high efficacy of the method. Technical success of the procedure was achieved in 100 % of cases. Six months after the procedure, a statistically significant reduction in the volume of fibroid nodes by 63 % was noted. Positive dynamics of clinical symptoms were recorded in 95 % of patients. No serious complications were observed during or after the procedure.

Keywords: uterine fibroids, radiofrequency ablation, ultrasound guidance, minimally invasive surgery, organ-preserving treatment, gynecological diseases, reproductive health, ablative therapy, myomectomy, gynecological surgery.

Юмтарова Зинаида Александровна
Врач акушер-гинеколог,
ООО «Медицинский центр Сонар», г. Улан-Удэ
perinatolog@mail.ru

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена высокой распространенностью миомы матки среди женщин репродуктивного возраста (20–60 % случаев), а также необходимостью поиска эффективных и малотравматичных методов лечения. Российская Федерация занимает второе место в мире по заболеваемости миомой матки, что делает разработку новых подходов к лечению особенно актуальной.

Цель исследования — оценка эффективности и безопасности малоинвазивного метода лечения миомы матки с помощью радиочастотной абляции под ультразвуковым контролем.

Организация исследования включала обследование и лечение 19 пациенток с подтвержденной миомой матки. Средний возраст участниц составил 45±8 лет. Исследование проводилось с использованием современного радиочастотного генератора и ультразвукового контроля в режиме реального времени.

Результаты исследования показали высокую эффективность метода. Технический успех процедуры достигнут в 100 % случаев. Через 6 месяцев после вмешательства отмечено статистически значимое уменьшение объема миоматозных узлов на 63 %. Положительная динамика клинической симптоматики зафиксирована у 95 % пациенток. Серьезных осложнений в ходе и после процедуры не выявлено.

Ключевые слова: миома матки, радиочастотная абляция, ультразвуковый контроль, малоинвазивная хирургия, органосохраняющее лечение, гинекологические заболевания, репродуктивное здоровье, абляционная терапия, миомэктомия, гинекологическая хирургия.

Введение

Миома матки — одно из наиболее распространенных гинекологических заболеваний невоспалительного генеза [6]. В настоящее время ее диагностируют у 20–60 % женщин репродуктивного возраста. При этом в возрасте моложе 30 лет данное заболевание отмечается в 3,3–7,8 % случаев, в 31–39 лет — 45–50 %, и в более старшем возрасте — от 50 % до 70 %. Российская Федерация занимает второе место в мире по заболеваемости миомой матки – 586,64 на 100 000 населения – в 2019 году [2]. Важно отметить, что инвалидизация и смертность от данной патологии снижаются, что косвенно свидетельствует о значительном прогрессе диагностических методик, а также широком внедрении малоинвазивной хирургии с использованием различных видов физической энергии [7].

Экспериментально и клинически установлено, что миоматозный узел возникает в результате клональной экспансии одной гладкомышечной клетки миометрия. Одной из причин этого является нетипичный воспалительный ответ. При хроническом воспалении миофибробласты становятся устойчивыми к элиминации пу-

тем апоптоза и продуцируют чрезмерное количество компонентов внеклеточного матрикса (extracellular matrix, ECM), что приводит к фиброзной трансформации. Ремоделирование ECM регулируется ком бинированным действием матриксных металлопротеиназ (matrix metalloproteinases, MMP) и тканевыми ингибиторами матриксных металлопротеиназ (tissue inhibitors of metalloproteinases, TIMP). MMP представляют собой класс цинкзависимых эндопептидаз, которые отвечают за деградацию ECM, в то время как TIMP действуют как физиологические регуляторы MMP.

Среди изученных металлопротеиназ уровень экспрессии повышен у MMP -1, -2, -3, -9, -11, -14, -16, и -24 при лейомиоме, именно они ответственны за повышение уровня синтеза коллагенов. Нарушение экскреции и метаболического превращения эстрогенов, а также соотношения их фракций, приводит к морфологическим изменениям в миометрии. Наряду с эстрогенами рост опухоли стимулирует прогестерон, повышая в лютеиновую фазу менструального цикла митотическую активность клеток миомы, а также индуцируя выработку факторов роста [2].

Традиционные хирургические подходы к лечению миомы, такие как гистерэктомия и миомэктомия, несмотря на доказанную эффективность, сопряжены с рядом серьёзных ограничений и потенциальных осложнений [1; 12; 13]. Гистерэктомия влечёт за собой полную утрату репродуктивной функции и способна провоцировать развитие постгистерэктомического синдрома, влиять на состояние костной ткани и общее самочувствие женщины. Миомэктомия, в свою очередь, не исключает риска рецидивов, формирования спаечного процесса и рубцовых изменений миометрия, что может осложнить течение последующей беременности и родов [5].

В этих условиях особую значимость приобретают малоинвазивные органосохраняющие методики, к числу которых относится радиочастотная абляция [3]. Данный метод позволяет избирательно воздействовать на патологические ткани миомы, снижая степень повреждения здоровых участков миометрия и сохраняя анатомическую целостность матки. Это особенно ценно для женщин, которые еще собираются рожать детей или не готовы к удалению органа [11]. Радиочастотная абляция менее травматична, имеет меньший срок реабилитации и низкий уровень риска осложнений по сравнению с традиционными оперативными методами [4].

Однако ее применение связано с некоторыми ограничениями и проблемами, а эффективность зависит от множества факторов, в том числе размер, локализация и тип миоматозного узла согласно классификации FIGO, а также индивидуальные особенности пациентки [8]. Метод не может быть рекомендован при некоторых вариантах расположения узлов, значительных объёмах поражения или подозрении на злокачественный процесс. Нельзя забывать, что сохраняется вероятность рецидива заболевания либо появления новых образований в будущем [10]. Ограничением также выступает необходимость точного контроля за ходом операции. Для этого необходимо современное диагностическое оборудование и высокая квалификация медицинского персонала [9]. С целью широкого внедрения метода и повышения его эффективности требуется дальнейшее изучение долгосрочных результатов, уточнение показаний и противопоказаний, а также совершенствование технических аспектов проведения процедуры.

Цель исследования — оценить эффективность малоинвазивного способа лечения миомы матки с помощью радиочастотной абляции под ультразвуковым контролем.

Материалы и методы

В исследовании приняло участие 19 пациенток с подтвержденным диагнозом миома матки. Средний возраст 45 ± 8 лет, диапазон 36–53 года.

Пациентки соответствовали следующим критериям включения:

1) наличие симптоматической миомы матки;
2) отказ от гистерэктомии или миомэктомии;
3) завершение репродуктивного периода
4) доброкачественная природа миомы.

Критериями исключения были:

1) злокачественные гинекологические заболевания за последние пять лет;
2) текущая беременность;
3) предшествующее лечение агонистами гонадотропин-рилизинг-гормона
4) неконтролируемые нарушения свертываемости крови.
5) наличие кардиостимулятора.

Диагностика миомы матки основывалась на данных бимануального осмотра и ультразвукового исследования гениталий. Ультразвуковое обследование выполнялось на аппарате Samsung HS50 с использованием конвексных датчиков: для трансабдоминального исследования применялся датчик с частотой 2–7 МГц, для трансвагинального сканирования — с частотой 5–9 МГц. Исследование проводилось в режимах серой шкалы, цветового допплеровского картирования и импульсно-волновой допплерографии. Отбор пациенток осуществлялся с учётом объёма матки не более 750 см^3 (что соответствует 12 неделям условной беременности), типа миомы по классификации FIGO (2, 3, 4, 5, а также гибридного 2–5 типа) и диаметра доминирующего миоматозного узла в диапазоне от 6 до 7 см.

Перед проведением вмешательства все участницы проходили стандартное предоперационное обследование, включающее общий и биохимический анализы крови, общий анализ мочи, гемокоагулограмму, определение группы крови и резус-фактора, госпитальный комплекс, мазок на флору и онкоцитологию, электрокардиографию, а также осмотр терапевта и профильных специалистов при необходимости.

Радиочастотная абляция миоматозных узлов выполнялась в условиях дневного стационара, в малой операционной, под контролем ультразвукового исследования и в состоянии контролируемой седации, с применением трансцервикального доступа. Для проведения процедуры использовался радиочастотный генератор VIVA multi производства «СТАРмед Ко., Лтд.» (Корея), работающий на частоте 480 кГц и способный обеспечивать подачу до 400 Вт радиочастотной мощности. В ходе вмешательства применялся охлаждаемый изнутри радиочастотный электрод длиной 35 см, калибра 17G, с открытым кончиком длиной 10 мм, который фиксировался на внутриполостном ультразвуковом датчике. Заземляющие пластины размещались на передних поверхностях бёдер, а для охлаждения электрода использовался стерильный раствор 0,9 % NaCl.

Пациентка располагалась в положении для дорсальной литотомии. Процедура выполнялась с применением внутривенной седации с использованием пропофола в дозировке 1,5–2 мг/кг для индукции и поддержанием дозы на уровне 100–200 мкг/кг/мин. Перед началом абляции проводилось трансвагинальное ультразвуковое исследование для определения локализации опухоли и планирования зоны воздействия. В процессе планирования выполнялась разметка образования — его условное разделение на «срезы» толщиной 10 мм в сагиттальной плоскости с учётом расположения близлежащих структур: газосодержащих органов, костных элементов, крупных нервных стволов и сплетений. При их близости к миоме точка фокусировки смещалась не менее чем на 10 мм от этих структур.

Под контролем УЗИ в режиме реального времени электрод подводился к своду влагалища, затем наконечник ультразвукового датчика поворачивался в сторону миомы и выдвигался игольчатый электрод, проникающий в ткань новообразования. После подтверждения безопасного положения устройства оно фиксировалось неподвижно, и подавалась радиочастотная энергия. При необходимости положение электрода корректировалось — либо путём подтягивания назад с последующей сменой траектории, либо лёгкими веерообразными движениями для визуализации конца иглы. Продвижение электрода без визуализации его конца не допускалось.

Абляция выполнялась по технике «движущегося и ступенчатого воздействия»: электрод вводился в дистальную часть узла, затем перемещался на 10 мм назад и вверх с шагом 5–10 секунд. Процесс воздействия на миому отслеживался на УЗИ как формирование гиперэхогенной зоны без симптома усиления. По завершении абляции генератор автоматически отключался, электрод извлекался, и при наличии других миом процедура повторялась аналогичным образом.

После завершения вмешательства пациентки возвращались домой в тот же день, получая для купирования болевого синдрома нестероидные противовоспалительные препараты. Радиочастотная абляция обеспечивала органосохраняющий эффект за счёт теплового воздействия, вызывающего гибель клеток миомы в результате коагуляции без повреждения окружающих тканей, образование тромбов в питающих миому сосудах с последующей ишемией и атрофией, а также инактивацию гормональных рецепторов, препятствующую дальнейшему росту опухолевой ткани.

Результаты и обсуждения

В рамках исследования предложенный метод трансвагинальной радиочастотной абляции под ультразвуковым контролем был применён у 19 пациенток в возрасте 45 ± 8 лет (диапазон 36–53 года), имевших в общей сложности 35 симптоматических миом матки. Среднее количество миоматозных узлов у одной пациентки составило 2,7 (от 1 до 5), при этом более двух мином было выявлено у 10 участниц исследования (52,6 %). Средний объём миомы на момент начала лечения достигал 154 мл (диапазон 5,3–700 мл).

Процедура выполнялась с использованием специальной радиочастотной иглы калибра 17 G длиной 35 см с внутренним охлаждением и активного электрода длиной 1 см, а визуализация положения электрода в ходе вмешательства обеспечивалась посредством ультразвукового исследования. Продолжительность одной процедуры варьировалась от 16 до 43 минут, составив в среднем 28 минут; длительность вмешательства зависела от количества и размеров миоматозных узлов. Все пациентки проходили лечение в условиях дневного стационара, общее время их пребывания в клинике не превышало двух часов.

Технический успех процедуры был достигнут в 100 % случаев — все 35 миоматозных узлов были успешно подвергнуты радиочастотной абляции. Через 6 месяцев после вмешательства отмечено статистически значимое уменьшение среднего объёма миомы с исходных 154 мл до 56 мл, что соответствует коэффициенту уменьшения 63 % (диапазон 49–76 %). Помимо объективного регресса размеров новообразования, у 95 % женщин зафик-

сирована положительная динамика клинической симптоматики. При этом в ходе проведения процедур и в отдалённом послеоперационном периоде серьёзных осложнений зарегистрировано не было.

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность малоинвазивной радиочастотной абляции под контролем УЗИ как органосохраняющего метода лечения симптоматической миомы матки. Метод демонстрирует клинически значимое улучшение состояния пациенток и устойчивый регресс размеров опухоли в течение полугода после вмешательства.

Показанием к применению данной методики служат симптоматические миомы у женщин, завершивших репродуктивную функцию либо не планирующих беременность, при объёме матки до 700 см^3 и диаметре доминирующего миоматозного узла до 7 см. Особое значение имеет локализация миомы согласно классификации FIGO: оптимальными кандидатами для радиочастотной абляции являются пациентки с узлами 2-го типа (более 50 % интрамуральной локализации, с выступом в полость матки менее чем наполовину), 3-го типа (интерстициально-субмукозные, контактирующие с эндометрием), 4-го типа (интрамуральные, расположенные в толще миометрия) и 5-го типа (субсерозно-интрамуральные, выступающие над наружной поверхностью матки в брюшную полость менее чем на 50 %), а также с гибридными формами (2–5 тип по FIGO), сочетающими признаки поражения эндометрия и серозной оболочки. Далее рассмотрим отдельные клинические случаи.

Клинический случай 1

Пациентка — женщина, 48 лет, с жалобами на обильные и длительные менструации (со слов пациентки, в течение месячных она тратила до двух пачек гигиенических прокладок). Кроме того, на постоянной основе проявлялись симптомы анемии, в том числе слабость и головокружение. Пациентку периодически беспокоило давящее ощущение в нижней части живота, а также чувство тяжести в этой зоне. С целью повышения уровня гемоглобина женщина на постоянной основе принимала препараты, содержащие железо.

Анамнез пациентки: миома матки была диагностирована в 40 лет, пациентка регулярно наблюдалась, каждый год проходя обследование. По данным проведенных УЗИ на протяжении двух лет наблюдался рост миоматозных узлов. Отметим, что у матери исследуемой пациентки тоже выявилась миома матки.

При гинекологическом осмотре на момент начала исследования объем ее матки был эквивалентен размеру матки на десятой неделе беременности. Матка отличалась высокой плотностью и бугристостью, а при смещении была достаточно подвижной. При этом пальпация матки причиняла боль пациентке. Тогда как область придатков была без особенностей.

По данным УЗИ, интерстициально-субсерозный узел достигал размера 75 × 83 × 67 мм (220 мл): больше половины его объёма отмечено внутри передней стенки матки, а остальная часть выступала наружу под серозную оболочку (5-й тип по классификации FIGO).

Кроме того, цветное допплеровское картирование (ЦДК) выявило умеренную пролиферацию в миоме — признаки умеренного роста (усиленное образование новых сосудов и деление клеток).

По результатам лабораторной диагностики:

ПАП-тест — NILM (атипичных и злокачественных клеток не было);

общий анализ крови — анемия 1-й (лёгкой) степени: гемоглобин — 100 г/л.

Был поставлен диагноз «Интерстициально-субсерозная миома матки (5-й тип по классификации FIGO), рост узла в динамике».

Далее было выполнено малоинвазивное лечение миомы матки в виде радиочастотной абляции (РЧА) миомы матки под контролем УЗИ.

По результатам операции через четыре месяца пациентка отметила улучшение состояния. С ее слов объём кровотечения во время менструации сократился, при этом снизилось количество дней менструации. Проведенное через четыре месяца контрольное УЗИ подтвердило сокращение миомы матки на 40 %, ее объем миомы был равен 132 мл. Произошло улучшение общего состояния пациентки, повышение качества жизни, как отмечено самой исследуемой.

Клинический случай 2

Пациентка С. Женщина, 42 года, поступила на исследование с жалобами на болезненные обильные менструации в течение последних двух лет, а также на кровянистые выделения между менструациями на протяжении тех месяцев. Женщина была против удаления матки. Диагноз «множественная миома матки» был поставлен женщине в 35 лет. На протяжении 2 лет наблюдался рост узлов. В 39 лет была проведена гистерорезектоскопия по поводу субмукозной миомы матки.

Проведенное гистологическое исследование подтвердило диагноз «субмукозная миома матки». На протяжении 3-х лет женщина употребляла оральные кон-

трацептивы с их прямой целью, а также для коррекции метроррагии. В результате проведенного исследования выявлен рост матки до размеров эквивалентно 11–12 недель беременности. Проведенное УЗИ органов малого таза выявило в структуре миометрия четыре миоматозных узла: один узел диаметром 7 см, объемом 281 мл, расположен по левому ребру матки, узел межмышечный, менне 50 % расположено субмукозно, деформируя полость матки; миоматозные интерстициальные узлы размерами 2,0*3,0 см, 3,0×3,0 см и 3,0×2,0 см — рядом расположенные, в толще передние стенки; миоматозный узел размерами 3,0×4,0×3,5 см, объемом 70 мл, расположен по передней стенке, ближе к правому ребру матки, субсерозно-межмышечный.

В анамнезе у пациентки было три беременности, в том числе двое родов (самостоятельные и оперативные) и один медицинский аборт. Их сопутствующих заболеваний была отмечена артериальная гипертензия корригируемая.

Поставлен диагноз «миома матки 3 типа по FIGO, менометроррагия, хроническая анемия легкой степени тяжести». По результатам общего анализа крови уровень гемоглобина был равен 90 г\л, эритроциты — $3{,}2\times10^{12}$\л, гематокрит — 36 %.

Далее пациентке была выполнена радиочастотная абляция четырёх миоматозных узлов. Операция прошла без осложнений.

При проведении контрольного УЗИ и МРТ через шесть месяцев после операции было выявлено сокращение миоматозных узлов до 116 мл, то есть на 59 % от первоначального объема. По словам женщины, менструации стали безболезненными, умеренными. Уменьшились симптомы анемии, уровень гемоглобина по результатам общего анализа кроки достиг 125 г\л, без употребления препаратов, содержащих железо.

Через год после операции контрольное УЗИ показало сокращение миоматозных узлов до 76 мл, то есть на 73 % от первоначального исходного объема. Исчезли клинические проявления миомы матки, женщина сама заметила улучшение состояния и повышение качества жизни.

Выводы

Результаты проведённого исследования подтверждают высокую эффективность и безопасность радиочастотной абляции (РЧА) под ультразвуковым контролем в лечении симптоматической миомы матки. Метод продемонстрировал клинически значимый эффект у пациенток разного возраста с различными типами локализации миоматозных узлов по классификации FIGO, в том числе при множественном поражении. Во всех случаях удалось достичь технического успеха процедуры без развития серьёзных осложнений на этапах вмешательства и в отдалённом периоде.

Анализ двух клинических случаев показал эффективность радиочастотной абляции (РЧА) под контролем УЗИ в лечении симптоматической миомы матки у женщин разного возраста, в том числе при множественных узлах и наличии сопутствующих состояний. В обоих наблюдениях пациентки имели выраженную клиническую симптоматику, включавшую обильные и болезненные менструации, межменструальные выделения, анемию различной степени тяжести и снижение качества жизни.

У первой пациентки 48 лет с интерстициально-субсерозной миомой 5-го типа по классификации FIGO после РЧА отмечено уменьшение объёма узла на 40 % за 4 месяца и значительное снижение объёма кровопотери во время менструации. Вторая пациентка 42 лет с множественной миомой матки (3-й тип по FIGO) и хронической анемией после проведения РЧА четырёх миоматозных узлов продемонстрировала более выраженный регресс: через 6 месяцев объём узлов сократился на 59 %, а через год — на 73 % от исходного размера. При этом у неё нормализовался уровень гемоглобина до 125 г/л без приёма железосодержащих препаратов, исчезли клинические проявления миомы и восстановился нормальный менструальный цикл.

Вместе с морфологическими изменениями была выявлена положительная динамика клинической симптоматики: снижение объёма кровопотери во время менструации, купирование анемии без необходимости приёма железосодержащих препаратов, исчезновение болевого синдрома и ощущения давления внизу живота.

Оба случая объединяет достижение технического успеха процедуры без осложнений на всех этапах наблюдения. Положительная динамика подтверждается как объективными данными инструментальной диагностики (УЗИ, МРТ), так и субъективной оценкой пациенток: улучшением общего состояния и качества жизни. Метод оказался эффективным при различных типах локализации миоматозных узлов по классификации FIGO (включая 3-й и 5-й типы), а также при множественном поражении. РЧА позволила избежать радикального хирургического вмешательства (гистерэктомии), к которому пациентки либо изначально относились отрицательно, либо рассматривали как нежелательный вариант.

Исследование подтверждает, что радиочастотная абляция под ультразвуковым контролем представляет собой действенный органосохраняющий метод лечения миомы матки, обеспечивающий клинически значимое уменьшение размеров миоматозных узлов, купирование симптомов и коррекцию анемии, что в совокупности способствует существенному улучшению качества жизни пациенток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахмудова Е.А., Амирханова Ч. Р. Миома матки в современных реалиях: комплексный обзор // Вестник науки. — 2024. — №1(70). — С. 670–673.
2. Зингалюк И.В., Тихоновская О.А., Логвинов С.В., Петров И.А., Ткачев В.Н., Чернов Д.Ю. Миома матки: современное состояние проблемы // Фундаментальная и клиническая медицина. — 2024. — №9(2). — С. 103–111.
3. Ибрагимова Т.М., Бабаджанов Н.Н., Каныбекова А.Т. Случай эффективного использования радиочастотной абляции при желудочковой экстрасистолии // Вестник науки. — 2023. — №10 (67). — С. 690–696.
4. Ионкин Д.А., Степанова Ю.А., Алимурзаева М.З. Резекция селезенки с применением радиочастотной абляции // Клиническая и экспериментальная хирургия // Журнал имени академика Б.В. Петровского. — 2024. — № 3. — С. 40–47.
5. Карамян Р.А., Ордиянц И.М., Хорольский В.А., Асатрян Д.Р. Миома матки: взгляд на проблему // Медицинский вестник Юга России. — 2022. — №13(2). — С. 18–25.
6. Коваль М.В., Кудрявцева Е.В., Кондрашова Ю.К., Тагоев Ю.Ш. Генетика миомы матки // Сибирское медицинское обозрение. — 2023. — №6. — С. 16–24.
7. Пономаренко М.С., Решетников Е.А., Пономаренко И.В., Чурносов М.И. Молекулярно-генетические факторы формирования миомы матки // Медицинский совет. — 2025. — №19(4). — С. 21–25.
8. Слабожанкина Е.А., Кира Е.Ф., Политова А.К. Современные представления об этиологии и патогенезе миомы матки // Медицинский вестник Башкортостана. — 2021. — №3(93). — С. 85–93.
9. Слюсарева О.А., Маркаров А.Э., Апресян С.В. Мультидисциплинарный подход в лечении миомы матки // Медицинский совет. — 2023. — №17(5). — С. 58–71.
10. Соловьева А.В., Чегус Л.А., Алейникова Е.Ю., Семенченко С.И., Меньших О.И., Каспарова А.Э. Эмболизация маточной артерии в лечении миомы матки и сохранении репродуктивного здоровья у женщин 40 лет и старше // Гинекология. — 2024. — №26(1). — С. 76–82.
11. Хусанходжаева М.Т., Азимова Ф.А., Исмоилова Ф.Т. Хирургические аспекты лечения миомы матки // Journal of modern medicine. — 2025. — №2(9). — С. 12–17.
12. Шидловская С.А., Андреев Д.А., Сыркин А.Л., Гогниева Д.Г., Суворов А.Ю., Сайгина О.А., Сафонов Н.В. Эффективность и факторы риска рецидивов фибрилляции предсердий после проведения радиочастотной абляции устьев легочных вен // Рациональная фармакотерапия в кардиологии. — 2025. — №5. — С. 449–456.
13. Шолин И.Ю., Устинов Д.Д., Киселев Д.Г. Радиочастотная абляция при лечении рецидивирующих желудочковых тахикардий с применением ЭКМО: клинические наблюдения // Общая реаниматология. — 2026. — №22 (1). — С. 56–63.

© Юмтарова Зинаида Александровна (perinatolog@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

Наши авторы

Adkhamov Sh. — Postgraduate Student, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University

Afanaseva N. — Perm State Medical University named after Academician E.A. Wagner

Akhmetov R. — Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor, Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmullax

Aleksandrova A. — Siberian Federal University

Allakhverdieva A. — Rostov State Medical University, Rostov-on-Don

Amarantov D. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Perm State Medical University named after Academician E.A. Wagner

Anoshin A. — Technician of the Development Department, Center for Geodesy, Aerial Photography and Cadastral Works Kemerovo State University

Antonov V. — Doctor of Technical Sciences, Professor, Ufa University of Science and Technology

Belova M. — Psychiatrist, Head of the V.A. Gilyarovsky Psychiatric Hospital Branch, State Medical University, P.B. Gannushkin Psychiatric Clinical Hospital No. 4, Moscow

Berdysh D. — Lecturer, Maikop State Technological University

Blinov V. — Postgraduate student, Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University

Bogdasarov A. — Doctor of Medical Sciences, Professor, State Educational Institution of Higher Professional Education Ulyanovsk State University

Bogdasarova R. — Postgraduate Student, State Educational Institution of Higher Professional Education Ulyanovsk State University

Borzykh N. — RTU MIREA (Russian Technological University)

Brysin A. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, MIREA — Russian Technological University

Burygina L. — Candidate of Medical Sciences, Chief Physician, Psychiatric Clinical Hospital No. 4 named after P.B. Gannushkin, Moscow

Butakov V. — Research Assistant, Postgraduate, Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Our authors

Bychkov E. — Doctor of Technical Sciences, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Omsk State Transport University

Cao Fuquan — Professor, Heihe University

Chernykh L. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

Chumakova A. — Postgraduate student, FSBEI of HE I.N. Ulyanov Chuvash State Universaty"

Davidyan L. — Doctor of Medical Sciences, Professor, State Educational Institution of Higher Professional Education Ulyanovsk State University

Dzyubaylo A. — Doctor of Medical Sciences, Samara State Medical University

Eskov V. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Surgut State University

Fedorchuk D. — Moscow Polytechnic University

Fedoseev A. — Back-end Developer, at LLC «Skillbox», Moscow

Fetaroni Malak — Postgraduate, National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow

Filatov M. — Doctor of Biological Sciences, Professor, Surgut State University

Gaurgov S. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Gazya G. — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Industrial Institute – Branch, Ugra State University, Nefteyugansk

Gazya N. — Pediatrician, Surgut City Clinical Polyclinic No. 4, Surgut

Gidinda Grace Muchigo — Postgraduate student, Ufa University of Technology and Science

Godovalov A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Perm State Medical University named after Academician E.A. Wagner

Gromov A. — Doctor of Medical Sciences, Kursk State Medical University

Hreniykov S. — MIREA — Russian Technological University

Ichmelyan A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, State Educational Institution of Higher Professional Education Ulyanovsk State University

Istomina V. — Candidate of Medical Sciences, psychiatrist, Head of the General Psychiatric Department No. 19 of the V.A. Gilyarovsky Psychiatric Hospital, a branch of the State Budgetary Healthcare Institution, Psychiatric Clinical Hospital No. 4 named after P.B. Gannushkin, Moscow

Kalamittseva E. — Postgraduate Student, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg

Kalashnikova M. — Project Support Analyst at the Center for Geodesy, Aerial Photography and Cadastral Works Kemerovo State University

Kazennov D. — Medical University «Reaviz»

Khismatov I. — Graduate student, Ufa University of Science and Technology

Khlynova A. — Perm State Medical University named after Academician E.A. Wagner

Khrustalev M. — Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

Khrustaleva I. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

Komarova A. — Head of the Cadastral Works Department, Center for Geodesy, Aerial Photography and Cadastral Works Kemerovo State University

Kostyuk G. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Chief Physician of the Moscow State Medical University, N.A. Alekseev Psychiatric Clinical Hospital No. 1

Kovalchuk A. — Graduate student, FGAOU VO MSTU "Stankin", Moscow

Ladynin A. — Doctor of Economics, Professor, MIREA — Russian Technological University

Lesovaya A. — Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara

Lisovoi V. — Postgraduate student, Moscow Polytechnic University

Lunev M. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Kursk State Medical University

Lvova L. — Postgraduate, Moscow State University named after. M.V. Lomonosov

Maidanov Yu. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Siberian State University of Telecommunications, and Informatics

Mailler E. — District Pediatrician, Shcherbinovsky Central District Hospital of the Ministry of Health, Rostov-on-Don, Russia

Medelyanova A. — Graduate student, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Omsk State Transport University

Mindlin Yu. — Moscow state academy of veterinary medicine and biotechnology of K.I. Scriabin

Mustafina V. — Perm State Medical University named after Academician E.A. Wagner; City Clinical Hospital No. 1, Perm

Nazarova N. — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Almetyevsk Branch of Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

Nikiforov I. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Academy of Postgraduate Education, Federal State Budgetary Institution Federal Scientific, and Clinical Center for Specialized Medical Care and Medical Technologies of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Moscow

Oleynikova D. — Candidate of Medical Sciences, Senior Lecturer, State Educational Institution of Higher Professional Education Ulyanovsk State University

Osminin S. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University

Ovechkina S. — MIREA — Russian Technological University

Petrash D. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Kursk State Medical University

Petukhova N. — Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University

Rochshin E. — Candidate of Medical Sciences, prosthodontist, orthodontist, Moscow State Medical and Dental University

Romashkova O. — Doctor of Engineering, Professor, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow

Rozhnova V. — Kerch State Maritime Technological University

Russkova K. — Candidate of Medical Sciences, Assistant, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University

Sharapova E. — GBUZ SB Central District Hospital

Shatalov A. — Candidate of Technical Sciences, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

Shmelev O. — Research Assistant, Postgraduate, Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Shulga M. — Postgraduate student, Moscow Technical University of Communications, and Informatics

Sizov A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University

Soanhu Javier Wilfried — Graduate student, Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod

Sozykin A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Russian State Social University, Moscow

Spevakov A. — candidate of technical sciences, Moscow polytechnic university

Starostin P. — Postgraduate, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

Stepanov S. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

Stepin Yu. — Doctor of Science in Engineering Sciences, professor, National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow

Sun Lei — Senior Lecturer, Heihe University

Taran V. — Candidate of cultural studies, Head of Laboratory for computer design and applied informatics «SPLASH»

Tarasov A. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, FGAOU VO MSTU "Stankin", Moscow

Tarasov V. — Postgraduate student, MIREA — Russian Technological University

Timofeev M. — Independent researcher

Toychina O. — Leading Specialist, Southeastern Territorial Administration Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Tatarstan

Trifonov S. — Candidate of Biological Sciences, Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Uvarov M. — Graduate student, A.N. Kosygin Russian State University, Moscow

Vereshchagin V. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow Polytechnic University

Verezubova I. — Moscow state academy of veterinary medicine and biotechnology of K.I. Scriabin

Vetoshkin N. — Graduate student, The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow

Vetshev F. — Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University

Vlasov S. — Rostov State Medical University, Rostov-on-Don

Vvedenskaya I. — Candidate of Medical Sciences, Samara State Medical University

Vvedensky V. — GBUZ SB Otradnenskaya city hospital

Wang Zeyu — Postgraduate student, Bauman Moscow State Technical University

Yakovets D. — Candidate of Psychological Sciences, Associate Professor, Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev

Yakovleva O. — Moscow state academy of veterinary medicine and biotechnology of K.I. Scriabin

Yakushev V. — Candidate of Technical Sciences, Federal Autonomous Institution Central Aerohydrodynamic Research Institute named after Professor N.E. Zhukovsky

Yang Decheng — Research Intern, Heihe University

Yazikova K. — Kursk State Medical University

Yumtarova Z. — obstetrician-gynecologist, Limited Liability Company «Sonar Medical Center», Ulan-Ude

Zakharova O. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara

Zhikharev E. — Radiologist, Krasnogorsk Clinical Hospital

Zhu Long — Postgraduate student, Bauman Moscow State Technical University

Zinovev V. — Researcher, Moscow City University

Zinoviev R. — Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg

Требования к оформлению статей, направляемых для публикации в журнале



Для публикации научных работ в выпусках серий научно-практического журнала "Современная наука: актуальные проблемы теории и практики" принимаются статьи на русском языке. Статья должна соответствовать научным требованиям и общему направлению серии журнала, быть интересной достаточно широкому кругу российской и зарубежной научной общественности.

Материал, предлагаемый для публикации, должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях, написан в контексте современной научной литературы, и содержать очевидный элемент создания нового знания. Представленные статьи проходят проверку в программе "Антиплагиат".

За точность воспроизведения дат, имен, цитат, формул, цифр несет ответственность автор.

Редакционная коллегия оставляет за собой право на редактирование статей без изменения научного содержания авторского варианта.

Научно-практический журнал "Современная наука: актуальные проблемы теории и практики" проводит независимое (внутреннее) рецензирование.

Правила оформления текста.

- Текст статьи набирается через 1,5 интервала в текстовом редакторе Word для Windows с расширением ".doc", или ".rtf", шрифт 14 Times New Roman.
- Перед заглавием статьи указывается шифр согласно универсальной десятичной классификации (УДК).
- Рисунки и таблицы в статью не вставляются, а даются отдельными файлами.
- Единицы измерения в статье следует выражать в Международной системе единиц (СИ).
- Все таблицы в тексте должны иметь названия и сквозную нумерацию. Сокращения слов в таблицах не допускается.
- Литературные источники, использованные в статье, должны быть представлены общим списком в ее конце. Ссылки на упомянутую литературу в тексте обязательны и даются в квадратных скобках. Нумерация источников идет в последовательности упоминания в тексте.
- Литература составляется в соответствии с ГОСТ 7.1-2003.
- Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Правила написания математических формул.

- В статье следует приводить лишь самые главные, итоговые формулы.
- Математические формулы нужно набирать, точно размещая знаки, цифры, буквы.
- Все использованные в формуле символы следует расшифровывать.

Правила оформления графики.

- Растровые форматы: рисунки и фотографии, сканируемые или подготовленные в Photoshop, Paintbrush, Corel Photopaint, должны иметь разрешение не менее 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, CMYK.
- Векторные форматы: рисунки, выполненные в программе CorelDraw 5.0-11.0, должны иметь толщину линий не менее 0,2 мм, текст в них может быть набран шрифтом Times New Roman или Arial. Не рекомендуется конвертировать графику из CorelDraw в растровые форматы. Встроенные — 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, CMYK.

По вопросам публикации следует обращаться к шеф-редактору научно-практического журнала «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики» (e-mail: redaktor@nauteh.ru).